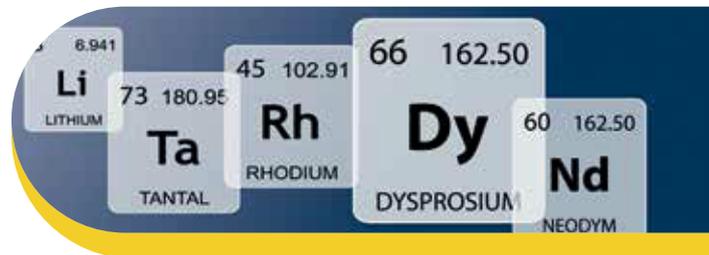


28

DERA Rohstoffinformationen



**Rohstoffe für
Zukunftstechnologien 2016**

»Auftragsstudie«

Impressum

Editor: Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Wilhelmstraße 25–30
13593 Berlin
Tel.: +49 30 36993 226
dera@bgr.de
www.deutsche-rohstoffagentur.de

Autoren: Frank Marscheider-Weidemann, Sabine Langkau,
Torsten Hummen, Lorenz Erdmann, Luis Tercero Espinoza
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Str. 48
76139 Karlsruhe

Gerhard Angerer
Karlsruhe

Max Marwede, Stephan Benecke
Fraunhofer IZM, Berlin

Kontakt

DERA: Ulrike Dorner | ulrike.dorner@bgr.de

Zitierhinweis: Marscheider-Weidemann, F., Langkau, S., Hummen, T., Erdmann, L.,
Tercero Espinoza, L., Angerer, G., Marwede, M. & Benecke, S. (2016):
Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. –
DERA Rohstoffinformationen 28: 353 S., Berlin.

Datenstand: März 2016

Titelbilder: ©BGR

ISBN: 978-3-943566-72-7 (Druckversion)

ISBN: 978-3-943566-71-0 (PDF)

ISSN: 2193-5319

Berlin, 2016



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe ist eine
technisch-wissenschaftliche Oberbehörde im Geschäftsbereich des
Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi).



Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016

»Auftragsstudie«

Im Auftrag der Deutschen Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für
Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin



Vorwort

Mineralische Rohstoffe sind für die industrielle Wertschöpfung, den technologischen Fortschritt und den Erhalt unseres Wohlstands unverzichtbar. Sie leisten einen wichtigen Beitrag für den zukünftigen Wandel unserer Gesellschaft auf allen Ebenen der Ökonomie, Ökologie und der soziokulturellen Entwicklung.

Mit Bezug auf den Koalitionsvertrag zur 18. Legislaturperiode des Deutschen Bundestages zwischen CDU, CSU und SPD „Deutschlands Zukunft gestalten“ und dessen Handlungsempfehlungen im Bereich „Rohstoffsicherung“ führt die Deutsche Rohstoffagentur (DERA) ein Monitoring potenziell kritischer mineralischer Rohstoffe durch, ohne die der technologische Fortschritt unserer Wirtschaft nicht möglich wäre. Der vorliegende Bericht des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI) ist Teil des DERA-Rohstoffmonitorings und wurde im Auftrag der DERA erstellt.

Das Ziel des Rohstoffmonitorings besteht darin, die Wirtschaft und die Politik über aktuelle Nachfrage-, Angebots- und Preistrends bei primären mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten der ersten Wertschöpfungsstufen zu informieren. Kritische Entwicklungen auf den internationalen Rohstoffmärkten können dadurch frühzeitig erkannt und mögliche Ausweichstrategien in den Unternehmen entwickeln werden.

Für das Monitoring der „Rohstoffnachfrage“ findet in der Studie ein Screening der Rohstoffbedarfe aus Schlüssel- und Zukunftstechnologien statt. Im Mittelpunkt steht die Frage, bei welchen Rohstoffen mögliche Nachfrageschübe aufgrund zukünftiger Technologieentwicklungen in den nächsten 20 Jahren zu erwarten sind. Unerwartete Nachfrageschübe aufgrund technologischer Veränderungen im Markt können einen erheblichen Einfluss auf zukünftige Rohstoffpreis- und Lieferrisiken haben. Daher wird die Studie alle fünf Jahre in engem Austausch mit der deutschen Wirtschaft aktualisiert.



Dr. Peter Buchholz

Leiter

*Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)*



Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| Vorwort | 3 |
| Abkürzungen und Glossar | 7 |
| Zusammenfassung | 13 |
| Executive Summary | 17 |
| 1 Hintergrund und Ziele | 21 |
| 2 Methodik und Vorgehensweise | 23 |
| 3 Auswahl der Zukunftstechnologien | 30 |
| 4 Technologiesynopsen | 31 |
| Fahrzeugbau, Luft- und Raumfahrt, Verkehrstechnik | 31 |
| 4.1 Stahlleichtbau mit Tailored Blanks | 31 |
| 4.2 Elektrische Traktionsmotoren für Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge | 35 |
| 4.3 PEM-Brennstoffzellen für Elektrofahrzeuge | 42 |
| 4.4 Superkondensatoren für Kraftfahrzeuge | 46 |
| 4.5 Legierungen für den Airframe-Leichtbau | 49 |
| 4.6 Automatisches Pilotieren von Straßenfahrzeugen | 53 |
| 4.7 Unbemannte Luftfahrzeuge für kommerzielle Anwendungen („Drohnen“) | 60 |
| Informations- und Kommunikationstechnik, optische Technologien, Mikrotechniken | 66 |
| 4.8 Bleifreie Lote | 66 |
| 4.9 RFID – Radio Frequency Identification | 73 |
| 4.10 Indium-Zinn-Oxid (ITO) in der Displaytechnik | 78 |
| 4.11 Infrarot-Detektoren in Nachtsichtgeräten | 84 |
| 4.12 Weiße LED | 88 |
| 4.13 Glasfaserkabel | 91 |
| 4.14 Mikroelektrische Kondensatoren | 96 |
| 4.15 Hochleistungs-Mikrochips | 101 |
| Energie-, Elektro- und Antriebstechnik | 106 |
| 4.16 Ultraeffiziente industrielle Elektromotoren | 106 |
| 4.17 Thermoelektrische Generatoren | 109 |
| 4.18 Farbstoffsolarzellen | 113 |
| 4.19 Dünnschicht-Photovoltaik | 117 |
| 4.20 Solarthermisches Kraftwerk | 126 |
| 4.21 SOFC – Stationäre Brennstoffzelle | 132 |
| 4.22 CCS – Carbon Capture and Storage | 136 |
| 4.23 Lithium-Ionen-Hochleistungs-Elektrizitätsspeicher für PKW | 142 |
| 4.24 Redox-Flow-Speicher | 146 |
| 4.25 Vakuumisolation | 149 |
| 4.26 Induktive Übertragung elektrischer Energie | 155 |
| 4.27 Thermische Speicher | 160 |
| 4.28 Micro-Energy Harvesting aus der Umgebungsenergie | 166 |
| 4.29 Windkraftanlagen | 176 |

| | |
|---|------------|
| Chemie-, Prozess-, Fertigungs- und Umwelttechnik, Maschinenbau | 186 |
| 4.30 Synthetische Kraftstoffe | 186 |
| 4.31 Meerwasserentsalzung | 189 |
| 4.32 Festkörper-Laser für die industrielle Fertigung | 194 |
| 4.33 Nanosilber | 200 |
| Medizintechnik | 203 |
| 4.34 Medizinische Implantate | 203 |
| 4.35 Medizinische Tomographie | 207 |
| Werkstofftechnik | 211 |
| 4.36 Superlegierungen | 211 |
| 4.37 Hochtemperatursupraleiter | 217 |
| 4.38 Hochleistungs-Permanentmagnete | 223 |
| 4.39 Industrie 4.0 | 231 |
| 4.40 Carbonfaserverstärkter Kunststoffleichtbau | 234 |
| 4.41 CNT (Carbon Nanotubes) | 241 |
| 4.42 Additive Fertigung („3D-Drucker“) | 245 |
| 5 Rohstoffsynopsen | 252 |
| 5.1 Gallium | 252 |
| 5.2 Germanium | 254 |
| 5.3 Indium | 256 |
| 5.4 Kobalt | 258 |
| 5.5 Kupfer | 260 |
| 5.6 Lithium | 263 |
| 5.7 Palladium | 265 |
| 5.8 Platin | 267 |
| 5.9 Rhenium | 269 |
| 5.10 Scandium | 271 |
| 5.11 Seltenerdmetalle | 273 |
| 5.12 Silber | 278 |
| 5.13 Tantal | 281 |
| 5.14 Titan | 283 |
| 5.15 Zinn | 285 |
| 6 Schlussfolgerungen | 287 |
| 7 Quellen | 295 |
| Anhang | 335 |

Abkürzungen und Glossar

| | |
|----------------------|---|
| 3D | Dreidimensional |
| A | |
| ABS | Anti-Blockiersystem für Kraftfahrzeuge |
| ABS-Schaum | Schaum aus Acrylnitril-Butadien-Styrol |
| ACC | Adaptive Cruise Control |
| ACP | Adhesive Conductive Paste |
| Ag | Silber |
| AG | Asynchrongenerator |
| Ah | Amperestunden |
| AIM | Association for Automatic Identification and Mobility |
| Al | Aluminium |
| AM | Asynchronmotor |
| As | Arsen |
| a-Si | amorphes Silizium |
| ASR | Antischlupfregelung |
| ATO | Antimony-Tin-Oxide |
| Au | Gold |
| B | |
| B | Bor |
| Ba | Barium |
| Barrel | Volumeneinheit (1 Barrel = 159 l) |
| BEV | Battery-Electric-Vehicle (rein elektrisches Fahrzeug mit Batterie) |
| BGR | Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe |
| Bi | Bismut (Wismut) |
| BiCMOS | Kombination von Feldeffekttransistoren mit Bipolartransistoren |
| BIP | Bruttoinlandsprodukt |
| BMUB | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit |
| Body-in White | Rohkarosserie ohne Anbauten wie Türen, Heckklappe, Motorhaube und Kotflügel |
| bpd | barrels per day |
| BRIC-Länder | Brasilien, Russland, China, Indien |
| BSCCO | Bismut-Strontium-Calcium-Kupfer-Oxide |
| BSP | Bruttosozialprodukt |
| BST | Barium Strontium Titanit |
| BtL | Biomass to liquid |

| | |
|-------------------------------------|---|
| C | |
| C | Kohlenstoff |
| C₂H₅OH | Ethanol |
| Ca | Calcium |
| CA | Kanada |
| CAD | Computer Aided Design |
| CAGR | Compound Annual Growth Rate |
| CCS | Carbon capture and storage |
| CSS | Close Space Sublimation |
| Cd | Kadmium |
| CDA | Copper Development Association |
| CdTe | Kadmiumtellurid |
| Ce | Cer |
| CEPI | Confederation of European Paper Industries |
| CFK | Carbonfaserverstärkter Kunststoff |
| CFRP | Carbon Fiber Reinforced Plastics |
| CIGS | Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid |
| CIS | Kupfer-Indium-Diselenid |
| Cl | Chlor |
| CMOS | Complementary Metal Oxide Semiconductor |
| CNT | Carbon Nanotubes |
| Co | Kobalt |
| CO | Kohlenmonoxid |
| CO₂ | Kohlenstoffdioxid |
| CP | Complexphasen(Stahl) |
| Cr | Chrom |
| CRT | Röhrenfernseher (Cathode Ray Tube) |
| Cs | Caesium |
| CSP | Concentrating solar power |
| CT | Computertomographie |
| CtL | Coal to liquid |
| Cu | Kupfer |
| CVD | Chemische Gasabscheidung (Chemical Vapor Deposition) |
| D | |
| DC | Gleichstrom (Direct Current) |
| DD | Direct Drive |
| DED | Direct Energy Deposition (direkte Abscheidung durch Energieübertragung) |
| DeNO_x | Reduktion von Stickstoffoxiden zu Stickstoff in Abgasen („Entstickung“) |

| | |
|-----------------|---|
| DIW | Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin |
| DKI | Deutsches Kupferinstitut |
| DLAR | Double Layer Anti Reflection |
| DLR | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt |
| DNA | Desoxyribonukleinsäure |
| DP | Dualphasen(Stahl) |
| DR Kongo | Demokratische Republik Kongo |
| DSK | Doppelschichtkondensator |
| dt | Differenzial der Zeit |
| Dy | Dysprosium |

E

| | |
|----------------|--|
| E-PKW | PKW mit elektrischem oder teilelektrischen Antriebsstrang |
| EDLC | Electrochemical Double Layer Capacitor |
| EDV | Elektronische Datenverarbeitung |
| EE | Elektrische und elektronische (Produkte) |
| EG | Electronic Grade (Silizium) |
| EMPA | Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Schweiz |
| EnEV | Energie Einsparverordnung |
| EoL-RR | End of Life Recycling Rate |
| EOR | Enhanced Oil Recovery |
| E-PKW | (teil-)elektrisch angetriebener Personenkraftfahrzeuge |
| Er | Erbium |
| ESP | Elektronisches Stabilitätsprogramm für Kraftfahrzeuge |
| ETF | Exchange-traded fund (London) |
| Ethanol | C ₂ H ₅ OH |
| EU | Europäische Union |
| eV | Elektronenvolt (Energieeinheit. 10 ¹⁹ eV = 1,6 Joule) |
| EVA | Ethylen-Vinyl-Acetat |

F

| | |
|-------------|--|
| F | Fluor |
| F | Faraday (Einheit der Kapazität von elektrischen Kondensatoren) |
| FAT | Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V., Berlin |
| FCEV | Fuel-Cell-Electric-Vehicle (Brennstoffzellenfahrzeug) |
| Fe | Eisen |
| FED | Field Emitter Display |

| | |
|--------------------|---|
| FHG-IZM | Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration |
| FI Schalter | Fehlerstromschutzschalter |
| FIR | Ferninfrarot |
| FOB | „Free On Board“/„Frei an Bord“ bedeutet, dass die Ware vom Verkäufer an das vom Käufer benannte Schiff im benannten Verschiffungshafen geliefert wird |
| ft | foot (1 ft = 30,48 cm) |
| FT | Fischer-Tropsch (Prozess zur Kraftstoffsynthese) |
| FTTB | Fibre to the Building |
| FTTH | Fibre to the Home |
| FTTP | Fibre to the Premises |
| FuE | Forschung und Entwicklung |
| FSZ | Farbstoffsolarzellen |

G

| | |
|---------------|--|
| g | Gramm |
| Ga | Gallium |
| GE | General Electric Company |
| Ge | Germanium |
| Gd | Gadolinium |
| Gew.-% | Gewichtsprozent |
| GfK | Glasfaserverstärkter Kunststoff |
| GHz | Gighertz |
| GIPV | gebäudeintegrierte Photovoltaik |
| GLR | Das gewichtete Länderrisiko der Förderung (GLR) errechnet sich als Summe der Anteilswerte der Länder an der Bergwerksproduktion multipliziert mit dem Länderrisiko (LR). Das gewichtete Länderrisiko bewegt sich in der Regel in einem Intervall zwischen +1,5 und -1,5. Bei Werten über 0,5 wird das Risiko als niedrig eingestuft (grün markiert), zwischen +0,5 und -0,5 liegt ein mäßiges Risiko vor (gelb) und Werte unter -0,5 gelten als kritisch (rot markiert). |
| Gol | Germanium on Insulator |
| GPS | Global Positioning System (Navigationssatellitensystem des US Militärs) |
| GtL | Gas to liquid |
| GuD | Gas- und Dampf- (Kombikraftwerk) |
| GUS | Gemeinschaft unabhängiger Staaten (Nachfolgestaaten der Sowjetunion) |
| GWp | Gigawatt peak power (Leistungsangabe bei Solarzellen) |

| H | |
|-----------------------|---|
| H₂ | Wasserstoff |
| H₂O | Wasser(dampf) |
| HCCI | Homogeneous Charge Compression Ignition |
| HDL | High definition laser |
| HDPE | High density propylene |
| HEV | Hybrid-Electric-vehicle (elektrisches Hybrid-Fahrzeug) |
| HF | Hochfrequenz |
| Hg | Quecksilber |
| HHI | Herfindahl-Hirschman-Index. Der HHI ist eine Kennzahl, die die Konzentration in einem Markt angibt. Der Index nimmt Werte zwischen 0 und 10.000 an. Bei einem HHI unter 1.500 gilt ein Markt als niedrig konzentriert (grün markiert), zwischen 1.500 und 2.500 Punkten als mäßig (gelb) und über 2.500 als hoch konzentriert (rot gekennzeichnet). |
| Ho | Holmium |
| HPDL | dioden-gepumpte Hochleistungs-Laser |
| HPMSR | Hybrid aus permanenterregtem und reluctancegetriebenen Motor |
| HREE | Heavy rare earth elements |
| HSS | High Speed Steel (Schnellarbeitsstahl) |
| HTS | Hochtemperatursupraleiter |
| Hz | Hertz (Frequenzeinheit) |
| I | |
| IC | Integrierter Schaltkreis (Integrated Circuit) |
| ICE | Internal Combustion Engine |
| IEA | Internationale Energieagentur (International Energy Agency) |
| IEC | Internationale Elektrotechnische Kommission |
| ifak | Institut für Automation und Kommunikation e. V., Magdeburg |
| IGCC | Integrated Gasification Combined Cycle |
| IGFC | Integrated Gasification Fuel Cell Cycle |
| IKT | Informations- und Kommunikationstechnik |
| In | Indium |
| InGaAs | Indium-Gallium-Arsenid-Halbleiter |
| IP | Internet Protocol |

| | |
|-------------|---|
| IPM | Inset-mounted Permanent Magnets (einsatzmontierte PM) |
| IPTV | Internet Protocol Television |
| IR | Infrarotstrahlung (Wellenlänge über 800 nm) |
| IRR | Internal Rate of Return (interner Zinsfuß der Kapitalwertmethode) |
| ISGS | International Copper Study Group |
| ISI | Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung |
| ISO | Internationale Organisation für Normung |
| IT | Informationstechnologie |
| ITO | Indium-Zinn-Oxid (Indium Tin Oxide) |
| IZT | Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung |

| K | |
|-------------|---------------------------------------|
| K | Kelvin |
| k.A. | keine Angaben |
| KfZ | Kraftfahrzeug |
| KIT | Karlsruher Institut für Technologie |
| kt | Kilotonnen (1000 t) |
| ksi | kilo-pound per square inch (1000 psi) |

| L | |
|-----------------|--|
| La | Lanthan |
| LAN | Local Area Network |
| Laser | Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation |
| lb | pound. Gewichtseinheit. 1 lb = 0,454 kg |
| LCD | Liquid-Crystal-Display |
| LED | Leuchtdiode (Light Emitting Diode) |
| Li | Lithium |
| LiCAF | LiCaAlF ₆ |
| LiDAR | Light detection and ranging |
| LiLuF | LiLuF ₄ |
| LiSAF | LiSrAlF ₆ |
| LiSGAF | LiSrGaF ₆ |
| Li-Ionen | Lithium-Ionen (wiederaufladbares Batteriesystem) |
| Lkw | Lastkraftwagen |
| LME | London Metal Exchange |
| LR | Das Länderrisiko (LR) wird über die Indikatoren der Weltbank zur Regierungsführung (Worldwide Governance Indicators, WGI) bewertet |
| LREE | Light rare earth elements |
| LTS | Niedrigtemperatur-Supraleiter |

| M | |
|-------------------|--|
| MAGLEV | Magnetic levitation (Magnetschwebbahn) |
| MAK | Maximale Arbeitsplatzkonzentration |
| MBCCO | Quecksilber- Barium-Calcium-Kupfer-Oxide |
| MED | Multi-Effekt-Destillation |
| MEMS | Mikroelektromechanischen Systeme |
| Mg | Magnesium |
| Mio. | Millionen |
| MLCC | Multi Layer Ceramic Capacitor |
| MMIC | Monolithic Microwave Integrated Circuit |
| Mn | Mangan |
| Mo | Molybdän |
| MOCVD | Metal Organic Chemical Vapor Deposition |
| Mono-coque | Selbsttragende Fahrzeugkarosserie |
| Mrd. | Milliarden |
| MRI | Magnetic resonance imaging |
| MRT | Magnetresonanz-Tomographie |
| MIV | Motorisierter Individualverkehr |
| MW | Megawatt (1 Mio. Watt) |
| µm | Mikrometer (10 ⁻⁶ Meter) |

| N | |
|-------------------------|---|
| N | Newton (Krafteinheit, 1 N = 1 kg m/s ²) |
| N | Stickstoff |
| n. a. | not available |
| Nb | Niob |
| Nd | Neodym |
| Nd:YAG Laser | Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser |
| NEFZ | Neuer Europäischer Fahrzeugzyklus |
| NEM | Nichteisenmetall-Industrie (Kupfer, Aluminium, Blei, Zink etc.) |
| NFC | Near field communication |
| NGCC | Natural gas combined cycle |
| Ni | Nickel |
| Ni-Cd | Nickel-Kadmium (wiederaufladbares Batteriesystem) |
| Ni-MH | Nickel-Metallhydrid (wiederaufladbares Batteriesystem) |
| NIR | Nahinfrarot |
| nm | Nanometer (1 nm = 10 ⁻⁹ m) |
| Nm | Newtonmeter (Einheit des Drehmoments) |
| N/mm² | Einheit der Materialspannung (1.000 N/mm ² = 1 GPa) |
| n. v. | nicht verfügbar |

| O | |
|-------------|--|
| O | Sauerstoff |
| OCR | Optical Character Recognition |
| OCT | Optische Kohärenz-Tomographie |
| OECD | Organisation for economic cooperation and development |
| OICA | International Organization of Motor Vehicle Manufacturers, Paris |
| OLED | Organic Light-Emitting Diode |
| Os | Osmium |
| ORC | Organic Rankine Cycle |

| P | |
|-------------------|---|
| P | Phosphor |
| Pa | Pascal (1 Pa = 1 N/m ²) |
| PAN | Polyacrylnitril |
| Pb | Blei |
| PBB | Polybromierte Biphenyle |
| PBDE | Polybromierte Diphenylether |
| PBF | Powder Bed Fusion (Verschmelzung im Pulverbett) |
| PCB | Polychlorierte Biphenyle |
| PC | Polycarbonat |
| Pd | Palladium |
| PDP | Plasma Display Panel |
| PECVD | Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition |
| PE-DOT:PSS | Poly-3,4-ethylendioxythiophen Polystyrol-Sulfonat |
| PEM | Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle |
| PET | Polyethylenterephthalat |
| PET | Positronen-Emissions-Tomographie |
| PHEV | Plug-In-Hybrid-Vehicle (netzladefähiges elektrisches Hybrid-Fahrzeug) |
| pin | positive intrinsic negative diode |
| PJ | Petajoule (10 ¹⁵ Joule) |
| PKW | Personkraftwagen |
| PLA | Polylactic acid (Polymilchsäure) |
| plc | public limited company |
| Pm | Promethium (radioaktiv) |
| PM | Permanentmagnet |
| PP | Polypropylen |
| Pr | Praseodym |
| PS | Polystyrol |
| psi | pounds per square inch (1 psi = 6.894,76 N/mm ²) |
| Pt | Platin |
| PTFE | Polytetrafluorethylen |

| | |
|------------|---|
| PV | Photovoltaik |
| PUR | Polyurethan |
| PVC | Polyvinylchlorid |
| PVD | Physical Vapour Deposition (Beschichtungsverfahren) |

R

| | |
|--------------|--|
| Radar | Radio detection and ranging |
| Re | Rhenium |
| REM | Seltene Erden Metalle |
| REEV | Range-Extended-Electric-Vehicle (Reichenweitenverlängertes Elektrofahrzeug) |
| RFID | Radio Frequency Identification |
| Rh | Rhodium |
| RO | Reverse osmosis (Umkehrosmose) |
| RoHS | Restriction of the use of certain Hazardous Substances (Richtlinie 2002/95/EG) |
| ROW | Rest Of the World |
| Ru | Ruthenium |
| RU | Russische Föderation |

S

| | |
|--------------|--|
| S | Schwefel |
| Sb | Antimon |
| Sc | Scandium |
| SCR | Selective Catalytic Reduction (Reduktion von Stickstoffoxiden) |
| ScSZ | Scandiumdotiertes Zirkoniumdioxid |
| Se | Selen |
| SEO | Seltenerdmetalloxide |
| SED | Surface Conduction Electron Emitter Display |
| SG | Synchrongenerator |
| Si | Silizium |
| SiGe | Silicium-Germanium-Halbleiter |
| Sm | Samarium |
| SM | Synchronmotor |
| SMD | Surface Mounted Device (elektronische Aufsteckbauteile) |
| Sn | Zinn |
| SOFC | Festoxidbrennstoffzelle (Solid Oxid Fuel Cell) |
| SPECT | Single Photon Emission Computed Tomography |
| SPM | Surface-mounted Permanent Magnets (oberflächenmontierte PM) |
| Sr | Strontium |
| SR | Switched Reluctance |

| | |
|----------------|--|
| S-Sätze | Sicherheitssätze. Sicherheitsratschläge für den Umgang mit einem Stoff |
| STC | Siliziumtetrachlorid |
| SWOT | Strength, Weakness, Opportunities and Threats |

T

| | |
|------------------------|---|
| T | Tesla (Einheit der magnetischen Feldstärke) |
| t | Tonnen |
| t Inh. | Tonnen des jeweils genannten Elements/Metalls |
| t/a | Tonnen pro Jahr |
| Ta | Tantal |
| tag | Smart Label, Smart Ticket, Smart Card (RFID Transponder) |
| Tailored Blanks | Karosserieblech, das aus verschiedenen Blechstärken unterschiedlicher Stahlgüte verschweißt ist |
| Tb | Terbium |
| TBCCO | Thallium-Barium-Calzium-Kupfer-Oxide |
| TCO | Transparent Conducting Oxide |
| Te | Tellur |
| TEG | Thermoelektrische Generatoren |
| THT | Through Hole Technology (elektronische Durchsteckbauteile) |
| Ti | Titan |
| TIC | Tantalum-Niobium International Study Center |
| TJ | Terajoule (10^{12} Joule) |
| Tm | Thulium |
| TRIP | Transformation Induced Plasticity (Stahl) |

U

| | |
|---------------------|---|
| u | unified atomic mass unit (Atomare Masseneinheit). 1/12 der Masse des Kohlenstoffisotops ^{12}C |
| UBA | Umweltbundesamt |
| UBSW | University of New South Wales, Sydney, Australia |
| UHF | Ultrahochfrequenz |
| UHMWPE | Ultra High Molecular Weight PolyEthylene (ultrahochmolekulares Polyethylen) |
| U/min | Umdrehungen pro Minute (60 U/min = 1 Hz) |
| Ultra-schall | Schall mit Frequenz oberhalb 16 kHz |

| | |
|-------------|--|
| UMTS | Universal Mobile Telecommunications System |
| US | United States of America (Länderkürzel) |
| USGS | United States Geological Survey |
| UV | Ultraviolett |
| V | |
| V | Vanadium |
| VAE | Vereinigte Arabische Emirate |
| VAT | Behälter für Photopolymerisation (englisch: "vat") |
| VC | Dampfkompresseur |
| VDA | Verband der Automobilindustrie e. V. |
| VDE | Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure |
| VERL | Vacuum Evaporation on Running Liquids |
| VIP | Vakuum-Isolations-Paneel |
| VIS | Vakuum-Isolations-Sandwich |
| VRB | Vanadium-Redox-Batterien |
| W | |
| W | Wolfram |
| WEEE | Waste Electric and Electronic Equipment (EU Richtlinie 2002/96/EC) |
| WiFi | Wireless Ethernet Compatibility Alliance |
| WKA | Windkraftanlage |
| WLAN | Wireless Local Area Network |
| WLED | Weißleuchtdioden (White Light Emitting Diode) |
| X | |
| XtL | Sammelbegriff für GtL, CtL, und BtL Verfahren |
| Y | |
| Y | Yttrium |
| YAG | $Y_6Al_5O_{12}$ (Yttrium-Aluminium-Granat) |
| Yb | Ytterbium |
| YBCO | Yttrium-Barium-Kupfer-Oxide |
| YGO | Yttrium-Gadolinium-Oxid |
| YLF | $YLiF_4$ |
| YSZ | Yttriumdotiertes Zirkoniumdioxid |
| Z | |
| Zn | Zink |
| Zr | Zirkonium |
| ZVEI | Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V. |

Zusammenfassung

Die deutsche Wirtschaft sichert sich ihren Erfolg auf dem Weltmarkt durch den Export von Technologien, ist dabei aber von Rohstoffimporten abhängig. Gerade der technologische Wandel kann jedoch, zusätzlich zum Weltwirtschaftswachstum, signifikante Auswirkungen auf die Nachfrage nach einzelnen mineralischen Rohstoffen haben. Bereits 2009 gab die Studie „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“ im Auftrag des BMWi einen exemplarischen Überblick über besonders vielversprechende und rohstoffrelevante Technologien (ANGERER et al. 2009). Dabei wurden deren Nachfrageimpulse auf technologiebedeutsame Rohstoffe mit einem Zeithorizont von 24 Jahren analysiert.

In der nun vorliegenden Überarbeitung „Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016“ wurden insgesamt 42 Technologien betrachtet, davon wurden 32 aktualisiert und zehn neu ausgewählt. Basierend auf diesen Analysen wurden Szenarien für den Rohstoffbedarf der Technologien im Jahr 2035 erarbeitet. Daraus ergab sich für 16 Rohstoffe eine besondere Relevanz für die ausgewählten Zukunftstechnologien. Um die technologiegetriebene Nachfragesteigerung dieser Rohstoffe besser einschätzen zu können, wurde als Rohstoffindikator der Bedarf des jeweiligen Rohstoffs für die ausgewählten Zukunftstechnologien im Jahr 2035 ins Verhältnis zur weltweiten Primärproduktion dieses Rohstoffs im Jahr 2013 gesetzt. Abb. 0.1 und Tab. 0.1 stellen die ermittelten Indikatoren dar.

Für fünf Metalle könnte der Bedarf im Jahr 2035 allein für die betrachteten Zukunftstechnologien in der Größenordnung der Primärproduktion 2013 oder darüber liegen: Germanium, Kobalt, Scandium, Tantal, Neodym/Praseodym. Für weitere drei Metalle könnte der Bedarf im Jahr 2035 für die analysierten Zukunftstechnologien sogar mehr als das Doppelte der Primärproduktion 2013 ausmachen: Lithium, Dysprosium/Terbium, Rhenium. Insbesondere für diese Metalle ergibt sich eine durch den technologischen Wandel getriebene Nachfragesteigerung, die sich signifikant gegenüber der durch das Weltwirtschaftswachstum getriebenen Nachfragesteigerung abhebt.

Die Ergebnisse in Tab. 0.1 haben sich gegenüber der Vorgängerstudie (ANGERER et al. 2009) teilweise stark geändert. So hat die Produktionsmenge einzelner Metalle, wie Gallium und Scandium, zugenommen, Technologien kommen mit geringeren spezifischen Metallgehalten aus (LED, Brennstoffzellen) und Substitutionstechnologien auf Material- und Technologieebene haben sich durchgesetzt. Auch die Datenlage zur wirtschaftlichen Entwicklung für einzelne Zukunftstechnologien, z. B. in Form von Marktanalysen, hat sich verbessert, ausgelöst u. a. durch das Exportverbot Chinas für Seltenerdmetalle von 2010 bis 2015, die Energiewende in Deutschland und der Wirtschaftskrise in Folge der Finanzkrise ab 2007.

Unter den verschiedenen realistischen Szenarien in den Technologiebetrachtungen wurde für die Zusammenfassung der Ergebnisse in Tab. 0.1 und Abb. 0.1 stets das plausibelste Szenario ausgewählt. Jedoch stellen die angegebenen Zahlen keine prognostizierten Werte dar, sondern veranschaulichen eine nach aktuellem Erkenntnisstand realistisch erscheinende Entwicklungsmöglichkeit. Zentrales Anliegen dieser Übersichtsstudie ist die Identifizierung relevanter Technologie- und Rohstofffelder, um weiterführende Arbeiten zu motivieren, welche sich einerseits intensiver mit den Herausforderungen der einzelnen Technologien und Rohstoffen beschäftigen und andererseits Strategien zur Rohstoffsicherung erarbeiten bzw. weiterentwickeln können. Konkrete Maßnahmen und alternative Entwicklungsmöglichkeiten werden in den einzelnen Technologiebetrachtungen und Szenarien angeführt. Generell kommen zur Sicherung der Rohstoffversorgung für die Wirtschaft folgende Maßnahmen in Betracht:

- Ausbau und Effizienzsteigerung von Erzabbau bzw. Metallgewinnung,
- Substitution auf Material- und Technologieebene,
- Ressourceneffizienz in Produktion und Anwendung,
- Recycling, gewährleistet durch recyclinggerechtes Design, Rückführungsstrategien und effiziente Recyclingtechnologien.

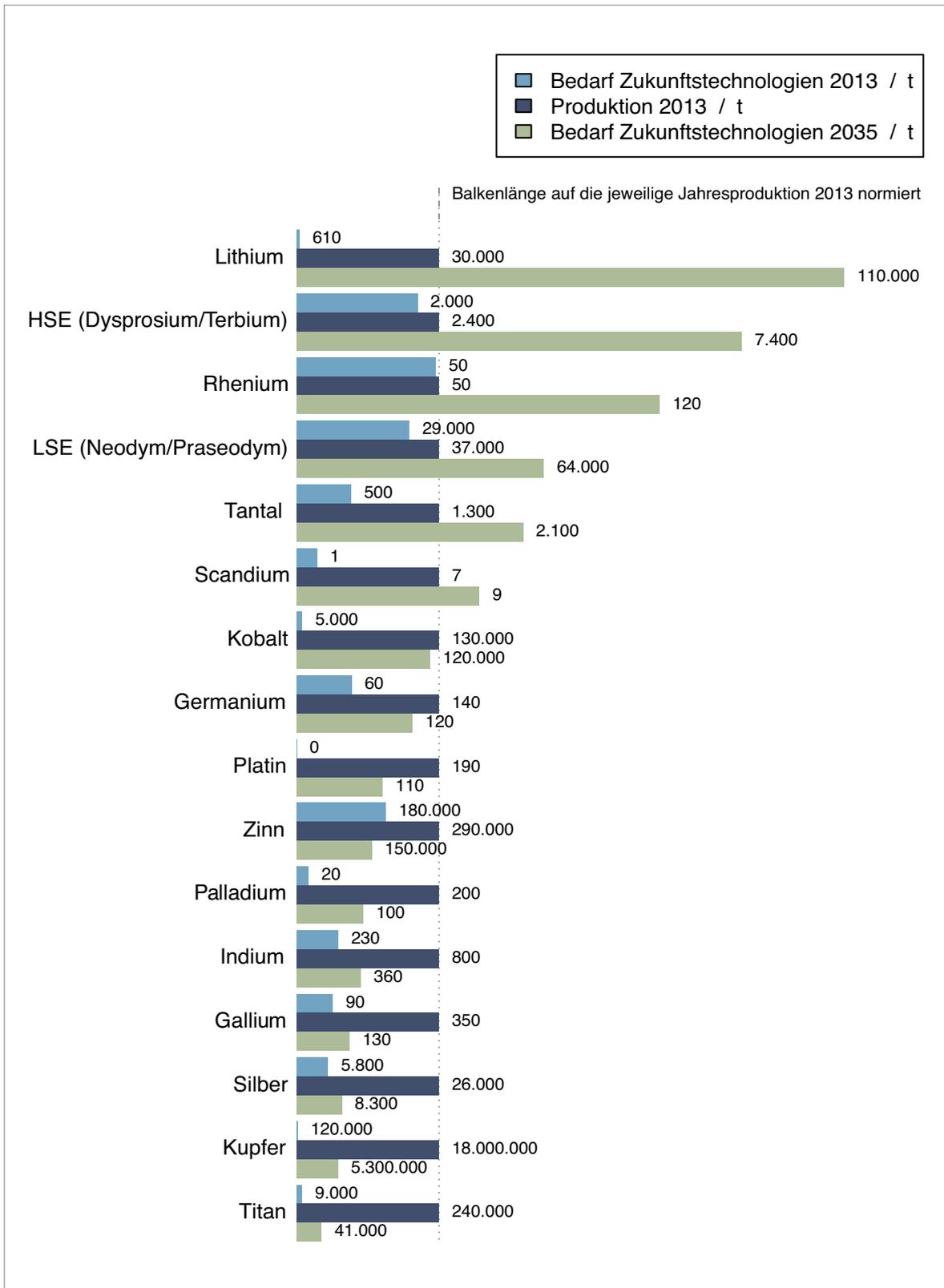


Abb. 0.1: Bedarf unterschiedlicher Rohstoffe für ausgewählte Zukunftstechnologien (Schätzungen für 2013 und 2035) im Vergleich zur Primärproduktion der jeweiligen Rohstoffe im Jahr 2013

Welche Möglichkeiten zur Rohstoffsicherung bestehen, sollte inhärenter Bestandteil der Grundüberlegungen bei der Entwicklung neuer Technologien sein. Aktuelle Rohstoffpreise sind abhängig von vielen Faktoren, unter anderem von vorübergehenden Ungleichgewichten zwischen Angebot und Nachfrage, aber auch von kurzfristigen Spekulationen und politischen Restriktionen. Sie sind kein Maß für die langfristige physische oder ökonomische Verfügbarkeit eines Rohstoffs und sollten daher nicht allein Basis langfristiger, zukunftsrelevanter Entscheidungen sein.

Tab. 0.1: Globaler Metallbedarf für die analysierten 42 Zukunftstechnologien im Jahr 2013 und 2035 im Verhältnis zur Weltproduktionsmenge des jeweiligen Metalls 2013. Der über die betrachteten Zukunftstechnologien hinaus bestehende Rohstoffbedarf ist nicht berücksichtigt

| Metall | Bedarf _{20xx} /Produktion ₂₀₁₃ | | Zukunftstechnologien |
|-------------------------------|--|------|---------------------------------------|
| | 2013 | 2035 | |
| Lithium | 0,0 | 3,9 | Lithium-Ionen-Akku, Airframe-Leichtb. |
| Schwere Seltene Erden (Dy/Tb) | 0,9 | 3,1 | Magnete, E-PKW, Windkraft |
| Rhenium | 1,0 | 2,5 | Superlegierungen |
| Leichte Seltene Erden (Nd/Pr) | 0,8 | 1,7 | Magnete, E-PKW, Windkraft |
| Tantal | 0,4 | 1,6 | Mikrokondensatoren, Medizintechnik |
| Scandium | 0,2 | 1,4 | SOFC-Brennstoffzellen |
| Kobalt | 0,0 | 0,9 | Lithium-Ionen-Akku, xTL |
| Germanium | 0,4 | 0,8 | Glasfaser, IR- Technologie |
| Platin | 0,0 | 0,6 | Brennstoffzellen, Katalyse |
| Zinn | 0,6 | 0,5 | Transparente Elektroden, Lote |
| Palladium | 0,1 | 0,5 | Katalyse, Meerwasserentsalzung |
| Indium | 0,3 | 0,5 | Displays, Dünnschicht-Photovoltaik |
| Gallium | 0,3 | 0,4 | Dünnschicht-Photovoltaik, IC, WLED |
| Silber | 0,2 | 0,3 | RFID |
| Kupfer | 0,0 | 0,3 | Elektromotoren, RFID |
| Titan | 0,0 | 0,2 | Meerwasserentsalzung, Implantate |

Anmerkung: die Ergebnisse in dieser Tabelle sind nicht mit der Vorgängerstudie ANGERER et al. (2009) zu vergleichen, da sie sich auf einen anderen Zeitraum (22 statt 24 Jahre), ein anderes Basisjahr (2013 statt 2006), ein anderes Technologieportfolio (42 statt 32) und neuere Erkenntnisse zur Innovationsdynamik beziehen.

Executive Summary

The German economy ensures its success on global markets through technology exports, but is dependent on raw material imports to do so. In addition to global economic growth, technological change, in particular, can have significant impacts on the demand for specific mineral raw materials. In 2009 already, the study commissioned by the German Federal Ministry of Economics “Raw Materials for Emerging Technologies” provided an overview of particularly promising technologies with high relevance for raw materials (ANGERER et al. 2009). An analysis was made of impulses on the demand for these technology-relevant raw materials with a time horizon of the next 24 years.

In this revision paper “Raw Materials for Emerging Technologies 2016”, 42 technologies were considered in total, of which 32 were updated and 10 newly selected. Based on these analyses, scenarios were constructed of the raw material demand for these technologies in the year 2035. For the selected technologies, 16 raw materials were found to have a particular relevance. In order to be able to better estimate the technology-driven increases in the demand for these raw materials, the indicator used was the demand for the respective commodity for selected technologies in 2035 related to the global primary production of this commodity in 2013. Figure 0.1 and Table 0.1 show the calculated indicators.

The demand in 2035 solely for the emerging technologies considered could be equal to or even exceed primary production in 2013 for these five metals: germanium, cobalt, scandium, tantalum, neodymium/praseodymium. The demand in 2035 for the analysed technologies could even be more than double primary production in 2013 for three further metals: lithium, dysprosium/terbium, rhenium. For these metals, in particular, there is an increase in demand driven by technological change that stands out significantly from the demand increase due to global economic growth.

Some of the results in Table 0.1 have changed dramatically compared to the previous study by ANGERER et al. (2009). The production volumes of specific metals like gallium and scandium have increased; technologies use lower specific metal contents (LED, fuel cells), and substitutes have become widespread at the level of materials and technologies. The data on economic trends have also improved for certain emerging technologies, e.g. in the form of market analyses, triggered among other things by China’s export ban of rare earth metals from 2010 to 2015, the transformation of the energy system in Germany (Energiewende) and the economic downturn from 2007 following the financial crisis.

The most plausible scenario of the various realistic technology scenarios considered was always chosen for the summary of the results in Table 0.1 and Figure 0.1. Nevertheless, the figures given here do not represent predictions, but are intended to illustrate a possible development that seems realistic according to our current state of knowledge. The main objective of this review is to identify the most relevant fields of technology and raw materials in order to motivate further studies that deal more intensively with the challenges posed by specific technologies and commodities on the one hand, and, on the other hand, studies able to develop or further evolve specific measures to secure the supply of raw materials. Concrete measures and alternative possible developments are listed in the individual technology analyses and scenarios. In general, the following measures are considered to secure the supply of raw materials to the economy:

- Further developing and increasing the efficiency of mining ores and metals
- Substitutions at the level of materials and technologies
- Resource efficiency in production and applications
- Recycling, ensured by a suitable design, recirculation strategies and efficient recycling technologies.

Which options exist to ensure the supply of raw materials should be an inherent component of basic planning when developing new technologies. The current commodity prices are dependent on many factors including temporary discrepancies between supply and demand, but are also affected by short-term speculation and political restrictions. They are not a measure of the long-term physical or economic availability of a commodity and therefore should not form the sole basis for long-term future relevant decisions.

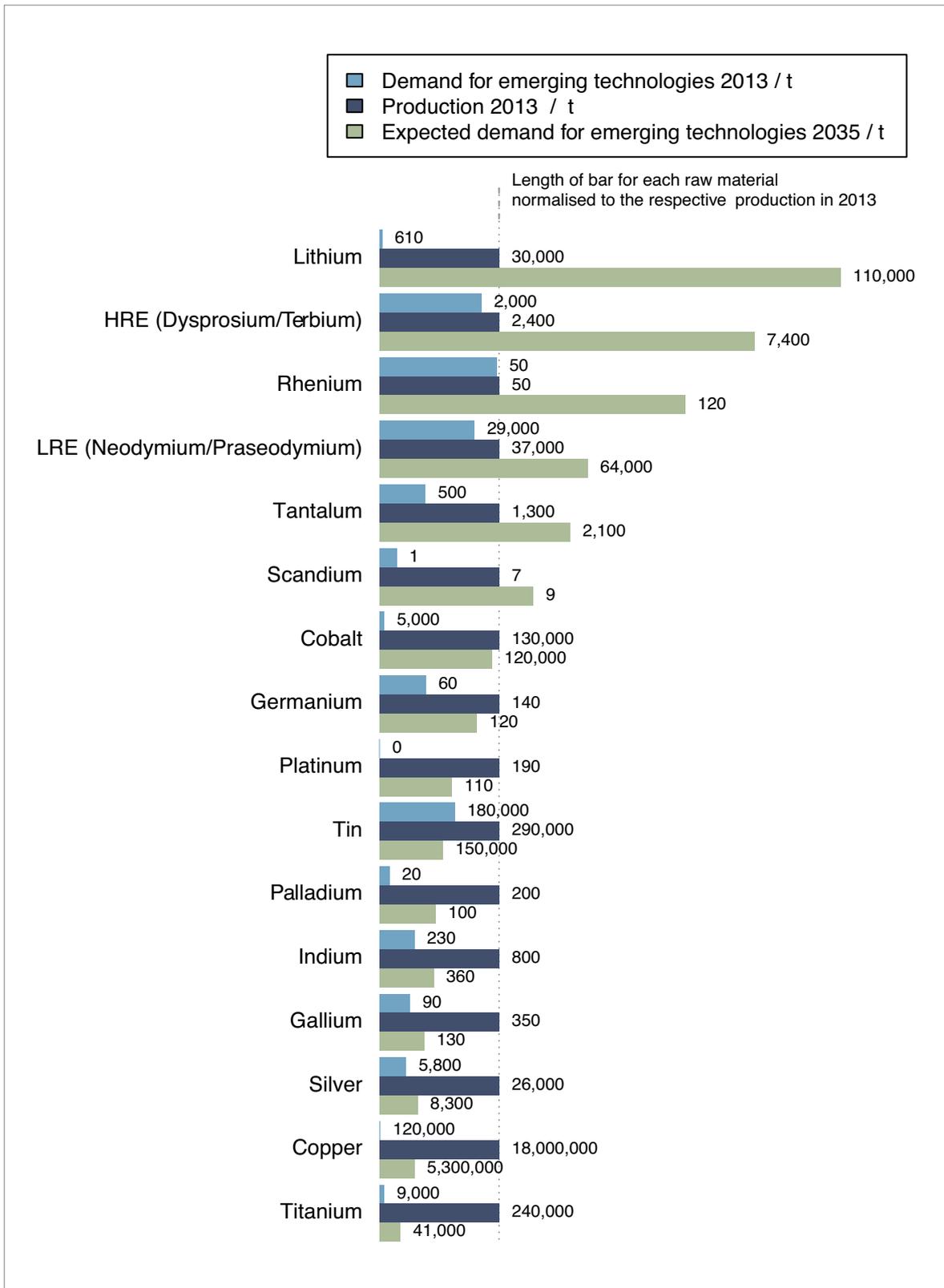


Fig. 0.1: Demand of different raw materials for selected emerging technologies (estimates for 2013 and 2035) compared to primary production of the respective commodity in 2013

Table 0.1: Global demand for metals for the 42 technologies analysed in 2013 and 2035 compared to the global production volume of the respective metal in 2013. This table considers the raw material demand for the emerging technologies; any demand beyond these technologies is not taken into account

| Metal | Demand _{20xx} /Production ₂₀₁₃ | | Emerging technologies |
|--------------|--|------|--|
| | 2013 | 2035 | |
| Lithium | 0.0 | 3.9 | Lithium-ion batteries, lightweight airframes |
| HREE (Dy/Tb) | 0.9 | 3.1 | Magnets, e-cars, wind power |
| Rhenium | 1.0 | 2.5 | Super alloys |
| LREE (Nd/Pr) | 0.8 | 1.7 | Magnets, e-cars, wind power |
| Tantalum | 0.4 | 1.6 | Micro-capacitors, medical technology |
| Scandium | 0.2 | 1.4 | SOFC fuel cells |
| Cobalt | 0.0 | 0.9 | Lithium-ion batteries, XTL. |
| Germanium | 0.4 | 0.8 | Fibre optic, IR technology |
| Platinum | 0.0 | 0.6 | Fuel cells, catalysts |
| Tin | 0.6 | 0.5 | Transparent electrodes, lead-free solders |
| Palladium | 0.1 | 0.5 | Catalysts, seawater desalination |
| Indium | 0.3 | 0.5 | Displays, thin layer photovoltaics |
| Gallium | 0.3 | 0.4 | Thin layer photovoltaics, IC, WLED |
| Silver | 0.2 | 0.3 | RFID |
| Copper | 0.0 | 0.3 | Electric motors, RFID |
| Titanium | 0.0 | 0.2 | Seawater desalination, implants |

Note: the results in this table are not comparable with the previous study ANGERER et al. (2009), because they are based on a different period of time (22 instead of 24 years), a different reference year (2013 instead of 2006), a different technology portfolio (42 instead of 32) and more recent findings concerning innovation dynamics.

1 Hintergrund und Ziele

Die Industriestaaten gewinnen als Hochlohnländer im globalen Markt durch technische Innovationen Wettbewerbsvorteile. Der dadurch ausgelöste Forschungs- und Entwicklungswettkampf erhöht die Innovationsgeschwindigkeit laufend, wie sich beispielsweise an steigenden Patenzahlen ablesen lässt (NEUHÄUSLER et al. 2014). Zugleich ist die deutsche Wirtschaft nicht nur bei Energierohstoffen, sondern auch bei Metallen, beinahe vollständig von Importen abhängig (BGR 2015a). Somit ist die Sicherung einer störungsfreien Rohstoffversorgung eine wichtige Aufgabe bei der Gewährleistung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft.

In den letzten zehn Jahren sind die Materialkosten nicht gestiegen, allerdings im Vergleich zu den zehn vorangegangenen Jahren auf konstant hohem Niveau geblieben, wie Abb. 1.1 zeigt.

Materialkosten stellen den mit Abstand größten Kostenblock in der deutschen Produktion dar. Tab. 1.1 gibt die vom Statistischen Bundesamt ermittelten Anteile am Bruttoproduktionswert des Verarbeitenden Gewerbes für das Jahr 2013 wie-

der. Bei den Materialkosten handelt es sich aber nur zu einem Teil um Rohstoffkosten, da hier auch fremdbezogene Vorprodukte, Hilfs- und Betriebsstoffe einschl. Fremdbauteile sowie Wasser u. a. erfasst werden.

Tab. 1.1: Kostenstruktur im Verarbeitenden Gewerbe Deutschlands 2013 (ohne Bergbau) (Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2015b)

| Kostenart | Anteil in % |
|---|--------------|
| Materialkosten | 43,4 |
| Energiekosten | 2,1 |
| Personalkosten, Lohnarbeiten und handwerkliche Dienstleistungen | 21,9 |
| Übrige Kosten (Einsatz von Handelsware, Steuern, Abschreibungen etc.) | 32,6 |
| Bruttoproduktionswert ohne Umsatzsteuer | 100,0 |

Gerade das globale, außergewöhnlich starke Wachstum neuer Technologien kann signifikante Auswirkungen auf den globalen Förderbedarf

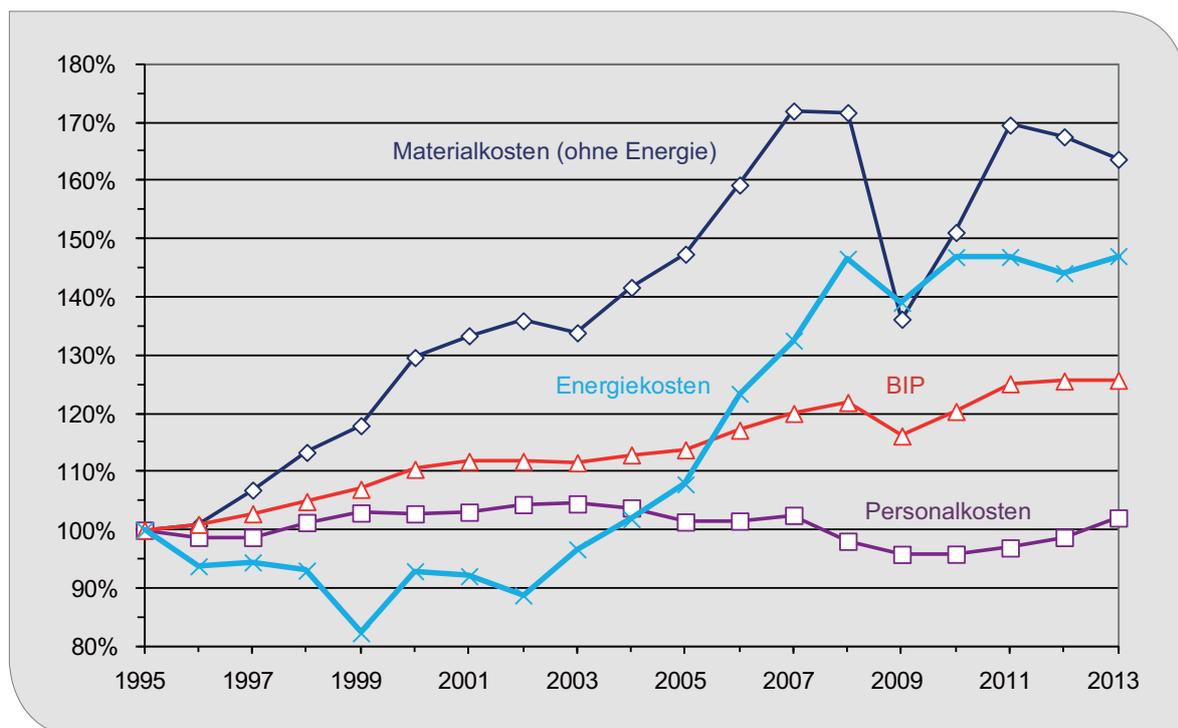


Abb. 1.1: Preisbereinigte Kostenentwicklung im Verarbeitenden Gewerbe Deutschlands (Quelle: STATISTISCHES BUNDESAMT 2015a, 2015b, 2015c)

an bestimmten Rohstoffen verursachen. Dieser Einfluss ist für Spezialmetalle, von denen weltweit weniger als einige Tausend Tonnen pro Jahr gefördert werden, besonders groß und kann Versorgungsengpässe hervorrufen. Daher wurden bereits in der Vorgängerstudie „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“ aus dem Jahr 2009 Metalle identifiziert, für die Versorgungsrisiken durch das starke wirtschaftliche Wachstum neuer Technologien entstehen könnten (ANGERER et al. 2009a). Dazu wurde der mögliche Bedarf einzelner Metalle für ausgewählte Zukunftstechnologien im Jahr 2030 ins Verhältnis zur Primärproduktion dieser Metalle im Jahr 2006 gesetzt. Ziel der Anschlussstudie „Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016“ ist eine Aktualisierung und Erweiterung dieser Ergebnisse. Der Zeithorizont der Zukunftsszenarien reicht bis zum Jahr 2035, das Basisjahr ist 2013.

Nutzen der Ergebnisse

Zukunftsprojektionen zeigen *mögliche* Entwicklungen in der Zukunft auf. Sie stützen sich auf bestimmte und explizit zu nennende Annahmen und können nur dann eintreten, wenn die tatsächliche Entwicklung ausschließlich diesen Annahmen folgt. Die Szenariotechnik gestattet es, von unterschiedlichen Annahmen der Zukunftsentwicklung auszugehen, um so die tatsächlich eintretende Entwicklung in einer Bandbreite von Projektionen einzufangen. Dennoch sind auch Zukunftsverläufe jenseits dieser Zukunftsprojektionen denkbar. Zukunftsprojektionen dürfen deshalb nicht als Vorhersagen der tatsächlichen künftigen Entwicklung bis zum Jahr 2035 verstanden werden.

Mit szenariobasierten Projektionen lässt sich jedoch abschätzen, welche Faktoren (z.B. wirtschaftliche Entwicklung von Technologien und ihren Anwendungen, technologischer Fortschritt, politische und infrastrukturelle Rahmenbedingungen) die zukünftige Entwicklung des Rohstoffbedarfs in welchem Ausmaß beeinflussen. Dieser Ansatz zeigt Marktteilnehmern potenzielle Chancen und Risiken auf und unterstützt sie dabei, zukunftsfähige Entscheidungen zu treffen.

Marktteilnehmer sind zum einen die Rohstofffirmen, welche Informationen über die Nachfragemärkte für ihre strategische Kapazitätsplanung benötigen. Da insbesondere der Bau von Bergwer-

ken Zeiträume von zehn und mehr Jahren benötigen kann, wurde als Zeithorizont der Projektionen das Jahr 2035 gewählt. Zum anderen zählen die rohstoffverarbeitenden Industrien zu den Marktteilnehmern. Für sie sind Informationen über Nachfragekonkurrenzen zu anderen Sektoren und potenzielle Rohstoffverfügbarkeitsengpässe bedeutend. Gelingt es den Marktteilnehmern potenzielle Nachfrageschübe vorausschauend zu erkennen, kann dies für den Ausgleich von Angebot und Nachfrage genutzt werden und zur Beruhigung der Rohstoffmärkte beitragen. Neben der Erweiterung der Förderkapazität zählen auch Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu den Maßnahmen gegen Versorgungsengpässe, insbesondere im Bereich

- Substitution (auf Material- und Technologieebene),
- Ressourceneffizienz (in Produktion und Anwendung),
- Recycling (bzgl. recyclinggerechtem Design, Sammlungsinfrastruktur, Recyclingtechnologien).

Wenn verschiedene Szenarien bei der Abschätzung des künftigen Rohstoffbedarfs einer Technologie eine Wertespanne liefern, wird diese in den einzelnen Technologiesynopsen diskutiert. Bei der zusammenfassenden Darstellung aller betrachteten Rohstoffe wird jedoch der obere Wert dieser Spanne verwendet. Die zusammenfassende Auswertung stellt also die obere realistische Abschätzung dar, ohne jedoch zu beanspruchen, dass auch extremere Zukunftsverläufe möglich sind. Welche alternativen realistischen Entwicklungsmöglichkeiten es gibt, wird in den einzelnen Kapiteln zu den verschiedenen Technologien („Technologiesynopsen“) beschrieben.

Aufgrund der Vielzahl von rohstoffrelevanten Technologien musste für diese Studie zunächst eine Auswahl getroffen werden, die im Kapitel 3 erläutert wird. Die Studie liefert daher – trotz der breiten und branchenübergreifenden Technologieauswahl – kein umfassendes Bild der erwarteten Gesamtrohstoffnachfrage im Jahr 2035, sondern einen Einblick in besonders rohstoffrelevante, wachstumsstarke Technologien und deren mögliche Rohstoffbedarfe.

2 Methodik und Vorgehensweise

Recherchemethoden

Für die Beschaffung von Informationen wurden vielfältige Möglichkeiten genutzt:

- Recherchen in Fachdatenbanken und die Auswertung von Fachliteratur
- Internetrecherchen (aufgrund hoher Aktualität und schneller Zugänglichkeit)
- Auswertung von Zukunftsmagazinen (z. B. Technology Review, Pictures of the Future, Fraunhofer-Magazin Quersumme)
- Auswertung von Marktstudien renommierter Analysten (z. B. Frost & Sullivan, Roskill, Navigant)
- Auswertung von Zukunftsstudien
- Interviews und Anfragen zur Einbindung des spezifischen Know-how von Fachleuten in Industrie und Wissenschaft

Begriffsabgrenzung „Zukunftstechnologien“

Als Zukunftstechnologien werden in dieser Studie Technologien bezeichnet, für die zukünftig ein überdurchschnittlich starkes Nachfragewachstum vermutet wird. Zukunftstechnologien sind industriell verwertbare technische Fähigkeiten, die revolutionäre Innovationsschübe weit über die Grenzen einzelner Wirtschaftssektoren hinaus auslösen und langfristig tiefgreifend die Wirtschaftsstrukturen, das Sozialleben und die Umwelt verändern. Es kann sich dabei um Einzeltechnologien handeln, wie beispielsweise Brennstoffzellen, organische Leuchtdioden oder RFID-Labels. Es können aber auch systemische Innovationen sein, die bekannte Einzeltechniken zu neuen Anwendungen verbinden. Beispiele sind das automatische Pilotieren von Straßenfahrzeugen oder die thermochemische Produktion von synthetischen Kraftstoffen aus Biomasse.

Begriffsabgrenzung „Rohstoffe“

Wir fokussieren in dieser Studie auf mineralische Rohstoffe für die Gewinnung von Metallen und behandeln fossile und nukleare Brennstoffe, Steine und Erden sowie Industrieminerale nur am Rande. In den folgenden Kapiteln werden die

Begriffe Metalle und Rohstoffe meist synonym verwendet, obwohl es sich bei Metallen in der Regel bereits um eine aufgearbeitete Form der ursprünglich abgebauten Minerale bzw. Erze handelt.

Auswahl von Technologien und Rohstoffen

Rohstoffe für Zukunftstechnologien haben eine besonders große Bedeutung für die Volkswirtschaft. Konzentrieren sich die Abbaustätten der Rohstoffe auf wenige Länder in politisch instabilen Regionen, so spricht man auch von kritischen Rohstoffen (EUROPEAN COMMISSION 2014a). Weil es in erster Linie solche Rohstoffe sind, welche die Entwicklung und industrielle Nutzung von Zukunftstechnologien hemmen könnten, stehen sie im Fokus der Aufmerksamkeit. Weitere Kriterien für die Auswahl von Rohstoffen waren ihre vermutete funktionelle und mengenmäßige Bedeutung für die Entwicklung und spätere Nutzung von Zukunftstechnologien.

Die Technologieauswahl bevorzugt Innovationen, von denen merkliche Impulse auf die Rohstoffnachfrage vermutet wurden. Zur Identifizierung von Zukunftstechnologien, die einen relevanten Einfluss auf den Rohstoffbedarf haben, wurden zwei Ansätze miteinander verbunden: Ausgehend von einem Startset an Rohstoffen konnten einerseits Zukunftstechnologien mit signifikantem Rohstoffbedarf ermittelt werden (bspw. die RFID-Technologie aus der Rohstoffanalyse von Silber). Andererseits hat die Analyse von Zukunftstechnologien auch die Bedeutung spezifischer Rohstoffe erkennen lassen, die dann in das Rohstoffportfolio aufgenommen wurden.

Die Foresight-Methode

Als Methode zur Voraussicht zukünftiger Entwicklungen („Foresight-Methode“) wurde ein Bottom-up Ansatz gewählt, dessen Grundlage in der Analyse einzelner Technologien bezüglich folgender Eigenschaften besteht:

- Funktion und Anwendung,
- Spezifischer Nutzen,
- Technische, infrastrukturelle Voraussetzungen,
- Einsatzbereiche bzw. Branchen, in denen die Technologie genutzt wird,

- Entwicklungsstand,
- Fortschritt zum Stand der Technik, Konkurrenztechnologien,
- Qualitativer und quantitativer Rohstoffbedarf, spezifischer Nutzen der einzelnen Rohstoffe,
- Marktpotenzial der Technologie,
- Potenzial von Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution (auf Material- und Technologieebene)

Zeithorizont des Foresights ist das Jahr 2035, Basisjahr ist 2013.

Die verwendete Schätzmethode für den künftigen Rohstoffbedarf findet sich in BMWi (2007). Die Einflüsse der technischen und der wirtschaftlichen Entwicklung werden dabei getrennt betrachtet und anschließend als Faktoren zusammengeführt.

$$(1) \quad B = b \cdot A$$

B Rohstoffbedarf einer bestimmten Anwendung in t/a

b spezifischer Rohstoffbedarf der Anwendung ($t/\text{Einheit}$)

A Aktivitätsrate (Produktionsmenge) der Anwendung (Einheiten/ a)

Die Veränderung der Produktionsmenge kann durch die mittlere jährliche Wachstumsrate beschrieben werden:

$$(2) \quad A_{2035} = (1 + r)^{22} \cdot A_{2013}$$

r mittlere jährliche Wachstumsrate der Aktivität (Produktion) zwischen dem Basisjahr 2013 und dem Zeithorizont 2035

Daraus ergibt sich die relative Veränderung des Rohstoffbedarfs B in den 22 Jahren zwischen 2013 und 2035 aus

$$(3) \quad \frac{B_{2035}}{B_{2013}} = \frac{b_{2035}}{b_{2013}} \cdot (1 + r)^{22}$$

wobei der Faktor $\frac{b_{2035}}{b_{2013}}$ die Änderung des Rohstoffbedarfs pro Anwendung durch den technologischen Wandel und der Faktor $(1 + r)^{22}$ den Einfluss der wirtschaftlichen Entwicklung zwischen dem Basisjahr 2013 und dem Zieljahr der Projektion 2035 beschreibt.

Die Anzahl der 2013 produzierten Anwendungseinheiten (A_{2013}) und der spezifische Materialbedarf pro Einheit (b_{2013}) sind Fakten, die theoretisch genau bestimmt werden können. In der Praxis gestaltet sich die Erhebung globaler Produktionszahlen aufgrund der vielen Hersteller und Absatzmärkte jedoch schwierig. Da die Vernetzung des Fachwissens der Bergbausektoren mit dem des Verarbeitenden Gewerbes keine Tradition hat, konnten in einigen Fällen keine Daten ausfindig gemacht werden. In anderen Fällen existieren voneinander abweichende Schätzungen. Auch die Ermittlung des Materialbedarfs pro Anwendungseinheit gestaltet sich in vielen Fällen problematisch. Der spezifische Materialbedarf unterscheidet sich nach Hersteller und Ausführungsmodell und wird zum Teil als Betriebsgeheimnis gehütet. Beim spezifischen Materialbedarf sind neben dem in der Produkteinheit enthaltenen Material auch Produktionsabfälle und Produktionsausschuss zu berücksichtigen.

Die entsprechenden Daten für 2035 können dagegen nicht bestimmt werden. In der vorliegenden Studie wird allerdings versucht, mittels Szenarien abzuschätzen, welche zukünftigen Entwicklungen basierend auf momentan verfügbarem Wissen möglich bzw. wahrscheinlich sind.

Die Entwicklung des spezifischen Materialbedarfs bis 2035 (b_{2035}) ist für verschiedene Technologien stark unterschiedlich und wird jeweils basierend auf Recherche und Expertenbefragungen ermittelt. Einige allgemeine Grundüberlegungen werden im Folgenden erläutert. Generell führen steigende Ansprüche an Leistung und Funktionalität zu höheren spezifischen Materialbedarfen. Diesem Trend entgegen steht eine Reduktion des spezifischen Materialbedarfs durch Effizienzsteigerung und Substitution. Für Technologien, welche sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden, sind diesbezüglich höhere Einsparpotenziale zu erwarten. Außerdem werden die Einsparungen umso größer sein, je höher das Problembewusstsein und die Forschungsbemühungen in den jeweiligen Branchen sind. Je spezifischer die Funktion des Materials für die jeweilige Anwendung ist, desto unwahrscheinlicher erscheint eine Substitution. Dennoch kann eine unvorhersehbare Innovation (beispielsweise die Substitution durch ein neues, besser geeignetes Material) den spezifischen Materialbedarf drastisch ändern.

Auch die Abschätzung der 2035 produzierten Anwendungseinheiten (A_{2035}) erfolgt für alle Technologien individuell, da sich die Technologien in den für die globale Marktentwicklung relevanten Kriterien stark unterscheiden. Wichtigstes Kriterium für die Verbreitung einer Technologie ist ihr Nutzen. Dabei gibt es Technologien, die einen völlig neuen, zusätzlichen Nutzen erbringen und solche, die bestehende Technologien ersetzen können, weil sie ihnen gegenüber Nutzenvorteile haben. Die Nutzenvorteile solcher Verdrängungstechnologien können so groß sein, dass sie einen bestehenden Markt vollständig erobern (z. B. Flachbildfernseher/Röhrenfernseher). Es können allerdings auch mehrere Technologien dauerhaft in Konkurrenz stehen, da alle gewisse Vorteile bieten, die in verschiedenen Anwendungsfällen unterschiedlich stark zum Tragen kommen (z. B. verschiedene Generatortechnologien für Windkraftanlagen). Neben der Verbreitung der Anwen-

dung im Jahr 2035 müssen in diesen Fällen auch Szenarien für den Marktanteil der verschiedenen Technologien erstellt werden. Darüber hinaus ist zu bedenken, dass auch heutige Zukunftstechnologien in der nahen Zukunft durch unvorhersehbare Innovationen wieder verdrängt werden können.

Wie ein Technologiemarkt global wächst, hängt auch davon ab, inwiefern die Verbreitung ausschließlich oder vorrangig in bestimmten Regionen, Kulturen oder soziökonomischen Sphären stattfindet. Hierbei sind die Offenheit der Nutzer gegenüber Neuerungen sowie die notwendigen infrastrukturellen Voraussetzungen für die tatsächliche Ausbreitung von Zukunftstechnologien entscheidend. Darüber hinaus hängt die Entwicklung einiger betrachteter Technologien stark von politischer Förderung ab (z. B. Windkraftanlagen, Traktormotoren für elektrisch angetriebene PKW).

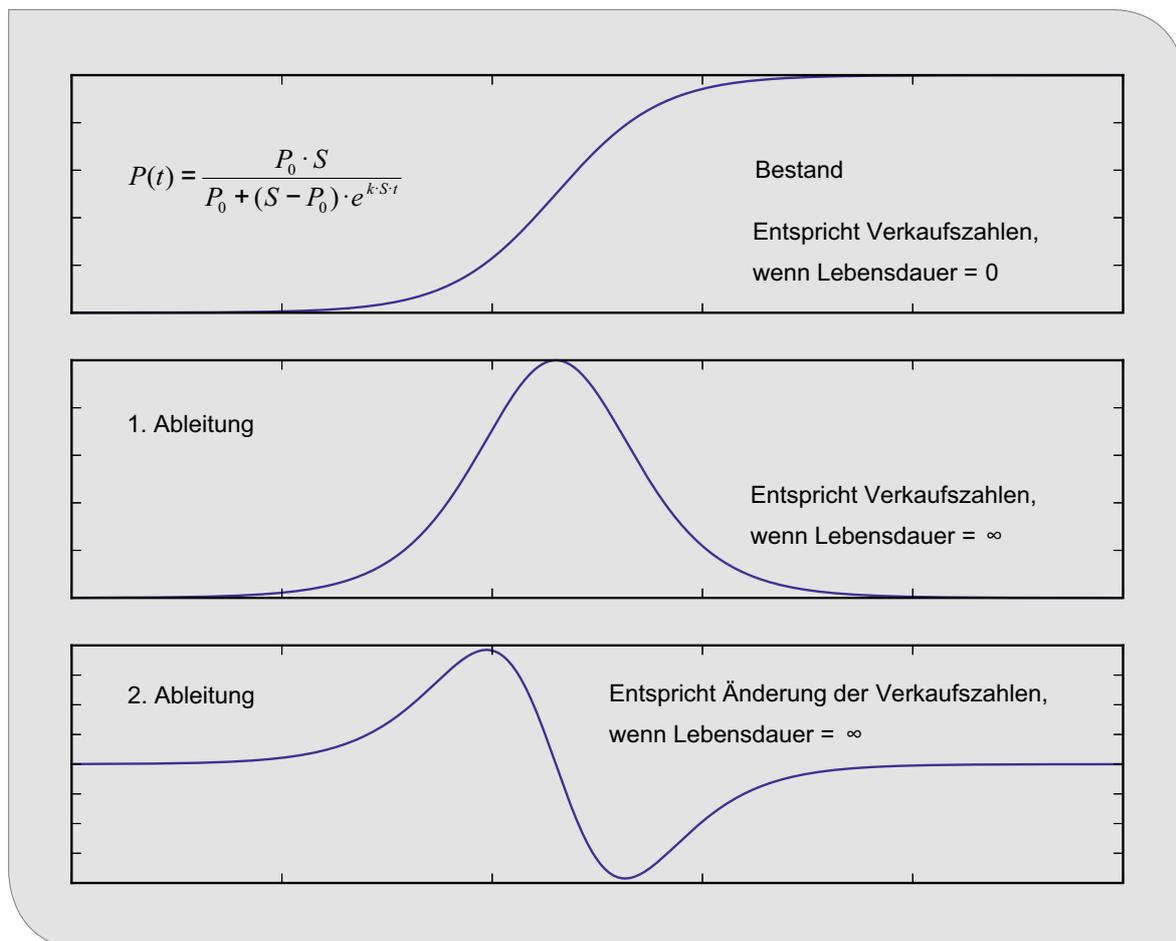


Abb. 2.1: Diffusion einer Technologie gemäß Sättigungsmodell, t : Zeit, P : Produkte, P_0 : Startwert, S : Sättigungswert, k : Wachstumskonstante (Quelle: eigene Darstellung)

Für die Diffusion neuer Technologien existieren ökonomische Modelle, in denen zunächst exponentielles Wachstum stattfindet, welches bei Näherung an einen Sättigungswert abflacht, so dass S-Kurven resultieren (s. Abb. 2.1). Diese Kurven beschreiben die Entwicklung des Gesamtbestands. Die Entwicklung der jährlichen Verkaufszahlen gleicht dieser Kurve nur bei sehr kurzen Lebensdauern (nahe 0, z.B. bei Energierohstoffen). Bei sehr langen Lebensdauern (nahe unendlich) stellen die jährlichen Verkaufszahlen die erste Ableitung der Bestandskurve dar (s. Abb. 2.1). Abb. 2.2 verdeutlicht die theoretischen Verläufe für Lebensdauern zwischen 0 und unendlich. Die häufig in Marktstudien angegebenen jährlichen Wachstumsraten sind die Änderung der Verkaufszahlen und somit die erste Ableitung der Verkaufszahlen. Außerdem entsprechen sie der zweiten Ableitung des Bestandes, wenn die Lebensdauer des Produkts unendlich ist. Abb. 2.1 macht deut-

lich, dass diese bei fortschreitender Reife kleiner und sogar negativ werden können, während der Bestand weiter wächst. Ihr Durchschnitt wird oft als CAGR (Compound Annual Growth Rate) angegeben und stellt in Gleichungen (1)–(3) die mittlere Wachstumsrate r dar.

Wie hoch die Sättigung ist und wann sie erreicht wird, ist unbekannt. Daher sind auch komplexe Modellrechnungen letztlich nur so gut wie die angenommenen Koeffizienten. Aufgrund der hohen Unsicherheiten beschränken wir uns folglich auf einfache Modelle.

Weltweit ist zwischen Regionen mit unterschiedlichen Entwicklungsstufen, Infrastrukturen und Kulturen zu unterscheiden. Das weltweite Wachstum des Bedarfs an einer Technologie ist also die Überlagerung des zeitlich unterschiedlich verlaufenden Wachstums in verschiedenen Regionen

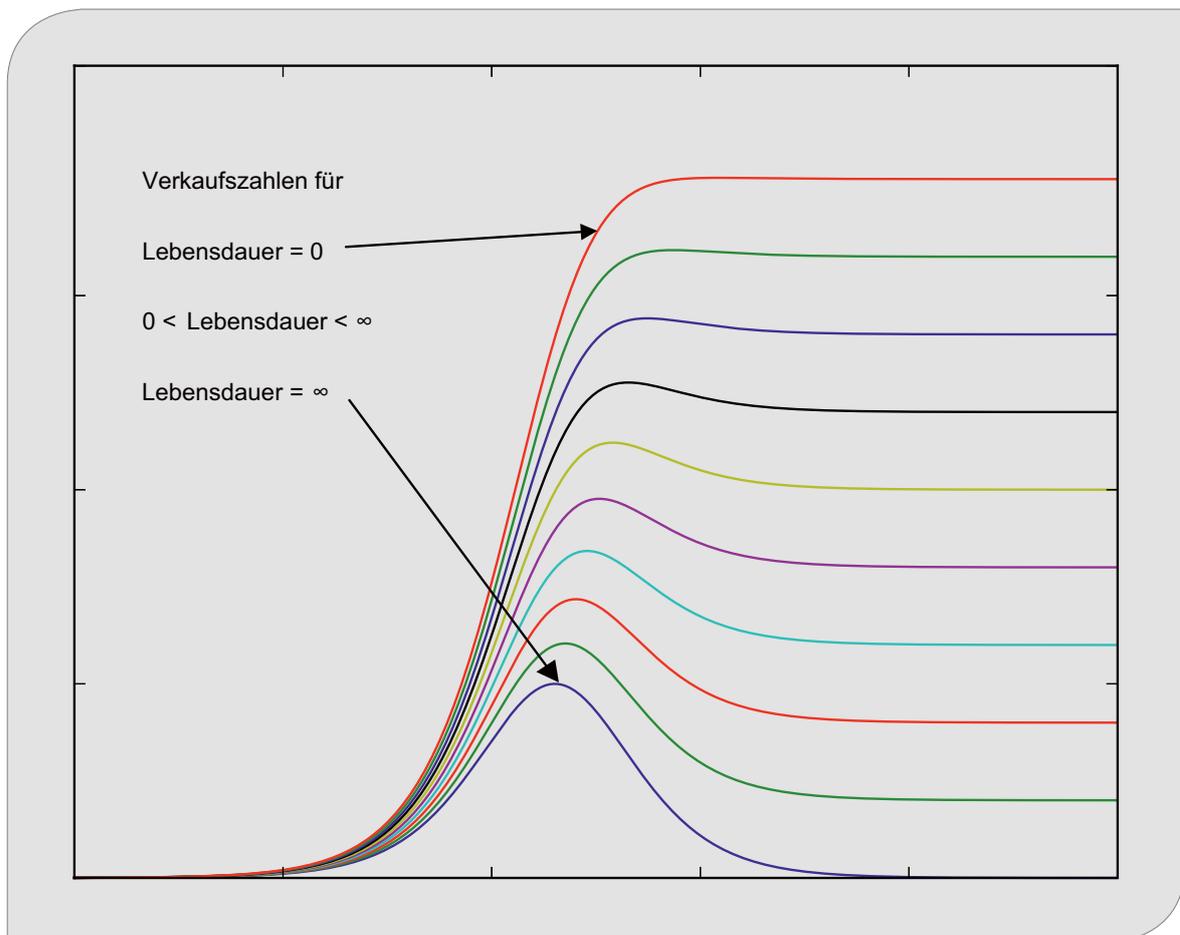


Abb. 2.2: Zeitliche Entwicklung der Verkaufszahlen für unterschiedliche Lebensdauern
(Quelle: eigene Darstellung)

und wird schon allein deshalb nicht einer theoretischen Modellkurve wie in Abb. 2.1 und Abb. 2.2 entsprechen.

Die frühe Wachstumsphase neuer Technologien ist in der Regel durch exponentielles Wachstum mit hohen Exponenten für Bestand und Verkaufszahlen gekennzeichnet (vgl. Abb. 2.1). Auch das exponentielle Wachstum der Weltwirtschaft (s.u.) beeinflusst das Wachstum der Zukunftstechnologien. Dies gilt für verschiedene Technologien in unterschiedlichem Ausmaß und hängt z. B. davon ab, ob es sich um eine Breitentechnologie handelt, die in vielen anderen Technologien enthalten ist (z. B. Hochleistungs-Permanentmagnete), oder um eine Spezialtechnologie mit einer einzelnen, konkreten Anwendung (z. B. elektrisch angetriebene PKW). Ungewöhnliche Impulse auf die Rohstoffnachfrage werden vor allem von Technologien ausgehen, die über einen gewissen Zeitraum mit Wachstumsexponenten weit über dem der Weltwirtschaft wachsen. Grundlage für eine entsprechende Analyse sind Annahmen zum Weltwirtschaftswachstum, welche im Folgenden beschrieben werden.

Weltwirtschaftswachstum

Unsere Annahmen zum Weltwirtschaftswachstum orientieren sich an den Annahmen des Berichts „The World in 2050“ von Price Waterhouse Coopers (HAWKSWORTH et al. 2015). Demnach wird das Weltwirtschaftswachstum vor allem von vier Faktoren angetrieben, welche in unterschiedlichem Ausmaß auch das Wachstum von Zukunftstechnologien beeinflussen:

- Zunahme der Bevölkerung im arbeitsfähigen Alter
- Erhöhung des Bildungsstands dieser Bevölkerung
- Zunahme der Kapitalbestände abzgl. Wertminderung
- Zunahme der Produktivität durch technologischen Fortschritt in ärmeren Ländern (in HAWKSWORTH et al. 2015 werden 1–2 % „Lückenschließung“ jährlich erwartet)

Mittelfristig wird der globale Wirtschaftswachstumstrend abflachen (s. Abb. 2.3). Grund dafür ist ein langsames Wirtschaftswachstum einiger Schwellenländern, insbesondere Chinas,

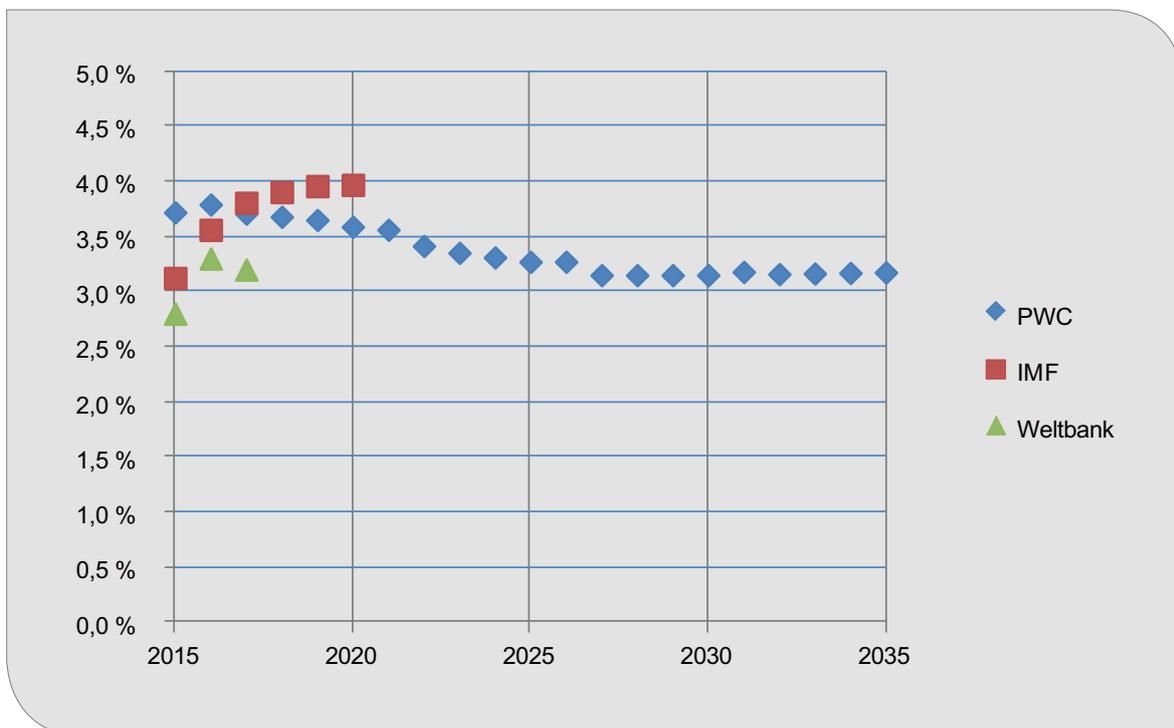


Abb. 2.3: Schätzungen bzw. Prognosen zur jährlichen prozentualen Wachstumsrate der Weltwirtschaft von PWC (HAWKSWORTH et al. 2015), International Monetary Fund (IMF o. J.) und Weltbank (WORLD BANK GROUP 2015)

welches die Weltwirtschaft stark prägt. Darüber hinaus verringert sich die Zunahme der Bevölkerung im erwerbstätigen Alter. Insgesamt wird in HAWKSWORTH et al. (2015) ein exponentielles Wachstum mit ca. 3,4 % durchschnittlicher jährlicher Wachstumsrate (Compound Annual Growth Rate CAGR) bis 2035 beschrieben (s. Abb. 2.3). Die Autoren betonen jedoch, dass diese Zahlen unsicher sind, während ein genereller Trend fest steht: Wenn keine unvorhersehbaren Katastrophen eintreten, wird sich die ökonomische Macht von den G7-Staaten (USA, Japan, Deutschland, Großbritannien, Frankreich, Italien, Kanada) zu den E7-Staaten (China, Indien, Brasilien, Russland, Indonesien, Mexiko, Türkei) verschieben. Die E7-Staaten haben bereits seit 2014 etwas mehr Kaufkraft als die G7-Staaten. 2035 werden ca. 60 % der globalen Kaufkraft von den E7-Staaten ausgehen (HAWKSWORTH et al. 2015). Allerdings bleiben die Unterschiede im Pro-Kopf-Einkommen zwischen G7 und E7 bis 2035 im Wesentlichen bestehen.

Starkes Wachstum wird u.a. für Indonesien, Mexiko, die Türkei, Kolumbien, Polen, Malaysia, Nigeria und Vietnam erwartet. Wachstumsprobleme sind in Russland und Brasilien sowie Ländern, welche stark von ihren Rohstoffvorkommen abhängen (Nigeria, Saudi-Arabien) möglich. Bis 2050 gehen HAWKSWORTH et al. (2015) von folgenden durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten (CAGR) aus:

- E7: 3,8 % (China 3–4 %; neue, aufstrebende Länder (z. B. Vietnam) > 5 %)
- G7: 2,1 %

Den größten Anteil an der weltweiten Kaufkraft im Jahr 2035 werden China (ca. 20 %), die USA (ca. 14 %), die EU (ca. 13 %) und Indien (ca. 10 %) ausmachen. Ein entscheidender Impuls für die global wachsende Nachfrage nach Rohstoffen bis 2035 ist das voraussichtlich starke Anwachsen der Mittelschichten in Entwicklungs- und Schwellenländern (KHARAS 2010).

Tab. 2.1: Entwicklung der globalen Rohstoffproduktion ausgewählter Metalle von 1993 bis 2013 (Quelle: BGR 2015b)

| Metall | CAGR %/a | Steigerungsfaktor von 1993–2013 |
|-------------------|-------------|------------------------------------|
| Aluminium (R) | 4,5 | 2,4 |
| Eisen (B) | 5,7 | 3,0 |
| Indium (R) | 8,9 | 5,5 |
| Kobalt (B) | 8,6 | 5,2 |
| Kupfer (B) | 3,4 | 2,0 |
| Molybdän (B) | 5,0 | 2,7 |
| Lithium (B) | 4,8 | 2,6 |
| Nickel (B) | 5,5 | 2,9 |
| Palladium (B) | 3,3 | 1,9 |
| Platin (B) | 1,4 | 1,3 |
| Rhenium (B) | 3,5 | 2,0 |
| Quecksilber (B) | -2,7 | 0,6 |
| Seltene Erden (B) | 2,8 | 1,7 |
| Silber (B) | 2,8 | 1,7 |
| Tantal (B) | 6,5 | 3,5 |
| Titan (B) | 0,7 | 1,1 |
| Zinn (B) | 2,2 | 1,5 |

B: Bergwerksförderung

R: Raffinadeproduktion

Änderung des globalen Rohstoffbedarfs mit dem Weltwirtschaftswachstum

In den vergangenen 20 Jahren (1993–2013) ist der globale Rohstoffbedarf uneinheitlich gewachsen. Wenn man die jährliche Produktion mit dem Bedarf gleichsetzt, sind einige Rohstoffe, wie beispielsweise Indium, mit 8,9 % pro Jahr stark gewachsen, während das Wachstum von Kupfer (3,4 %/a) oder Zinn (2,2 %/a) moderater ausfiel. Quecksilber hat sogar einen negativen CAGR (vergleiche Tab. 2.1), so dass die Produktion 2013 auf 60 % des Wertes von 1993 abfiel. Das Weltwirtschaftswachstum ist in den Jahren 1993–2013 um durchschnittlich 2,8 %/a gewachsen und hat sich damit um den Faktor 1,75 erhöht (IWF o. J.).

3 Auswahl der Zukunftstechnologien

Auswahl von Technologien für eine detaillierte Analyse

Grundlage für die Auswahl der Technologien, die detailliert analysiert werden sollen, ist eine Liste potenzieller Zukunftstechnologien. Diese Liste wurde für die Vorgängerstudie erstellt und seitdem kontinuierlich fortgeschrieben. Zusätzlich erfolgte zu Beginn der Aktualisierungsstudie eine gezielte Recherche nach Zukunftstechnologien. Als Ergebnis umfasst die Liste derzeit ca. 170 Einträge (siehe Tabelle im Anhang des vorliegenden Berichtes).

Ausschlaggebend für die Auswahl war eine erste Einschätzung des Rohstoffbedarfs und des potenziellen Markts der Technologien. Zukunftstechnologien, die keine im Sinne dieser Studie relevanten Rohstoffe benötigen, wurden nicht ausgewählt, selbst wenn ihr zukünftiges Marktpotenzial groß ist. Eine Ausnahme stellen Technologien dar, die zwar keine metallischen Rohstoffe benötigen, aber den Bedarf an diesen Rohstoffen in Konkurrenztechnologien durch die Eroberung des Markts drastisch reduzieren könnten.

Ausgewählte Zukunftstechnologien

In Kapitel 4 dieser Studie werden 32 Synopsen der Technologien, welche bereits in der Vorgängerstudie betrachtet wurden, aktualisiert. Hinzu kommen Analysen zu zehn neu ausgewählten Technologien. Die Tabelle A.1 im Anhang gibt eine Übersicht aller betrachteten Technologien.

Für die vorliegende Aktualisierung wurden in Abstimmung mit dem Auftraggeber folgende zehn Technologiesynopsen neu erarbeitet:

Fahrzeugbau, Luft- und Raumfahrt, Verkehrstechnik

- Automatisches Pilotieren von Straßenfahrzeugen
- Unbemannte Luftfahrzeuge für kommerzielle Anwendungen

Energie-, Elektro- und Antriebstechnik

- Windkraftanlagen

- Induktive Übertragung elektrischer Energie
- Micro-Energy Harvesting aus der Umgebungsenergie
- Thermische Speicher

Chemie-, Prozess-, Fertigungs- und Umwelttechnik, Maschinenbau

- Additive Fertigung („3D-Drucker“)
- Industrie 4.0 – Vernetzte Produktionstechnik

Werkstofftechnik

- CNT (Carbon Nanotubes)
- Carbonfaserverstärkter Kunststoffleichtbau

Die detaillierten Ergebnisse der überarbeiteten und neuen Technologiesynopsen sind in Tabelle 6.1 der Schlussfolgerungen dargestellt.

4 Technologiesynopsen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der vertiefenden Analyse der rohstoffabhängigen Zukunftstechnologien dokumentiert (vgl. Tab 6.1). Bei den meisten Technologien ist es gelungen, quantitative Bedarfsprojektionen für das Jahr 2035 zu erarbeiten. Bei einigen bleiben aufgrund der stark verästelten Verwendungsstrukturen, unzureichender Datenlage und anderen Schwierigkeiten die Bedarfsprojektionen qualitativ.

Fahrzeugbau, Luft- und Raumfahrt, Verkehrstechnik

4.1 Stahlleichtbau mit Tailored Blanks

4.1.1 Technologiebeschreibung

Die Gewichtsreduzierung von Fahrzeugen ist eine permanente Herausforderung, die durch gestiegene Kraftstoffpreise, Anstrengungen im Klimaschutz und Erhöhung der Reichweite bei Elektrofahrzeugen noch an Bedeutung gewonnen hat. Hinzu kommt, dass durch die Sicherheits- und Umwelttechnik im Fahrzeug das Fahrzeuggewicht zugenommen hat. Beim PKW sind das beispielsweise der Seitenaufprallschutz, ABS, ESP und die Abgaskatalysatoren. Auch Komforteinrichtungen, wie die gestiegene Motorisierung, Klimaanlage und Motoren für Fensterheber und Sitzverstellung, machen die Fahrzeuge schwerer. Besonders für künftige batteriegetriebene Elektro- und wasserstoffgetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge ist Leichtbau ein essenzieller Erfolgsfaktor, um an die Reichweiten konventioneller Antriebe heranzukommen.

Bezogen auf eine Fahrstrecke von 100 km erhöht sich der Kraftstoffverbrauch eines Personenkraftwagens pro 100 kg Zusatzgewicht um 0,3–0,8 Liter (JOICHEM et al. 2004). Die Angaben in der Literatur schwanken, weil der Mehrverbrauch stark von der Energieeffizienz des Motors (Diesel, Otto), der Verkehrssituation (Stadtverkehr, Autobahn), der Fahrweise und anderen Einflüssen abhängig ist.

Von Seiten der Automobilindustrie und ihren Zulieferern wurden und werden erhebliche Anstrengun-

gen zur Gewichtsreduktion unternommen. Allgemein bekannt sind die Ansätze der Audi AG, im Fahrzeugbau Stahl durch Aluminium zu ersetzen oder der Einsatz von CFK bei BMW. Das Karosseriekonzept einer Rahmenstruktur aus Aluminium und hochfesten Stahl wird als Audi Space Frame (ASF®) vermarktet (AUDI 2013). Beim derzeitigen A8 Modell beträgt das Gewicht der Karosserie 231 kg und damit 40 % (92 kg) weniger gegenüber konventioneller Stahlbauweise (AUDI 2013).

Aluminium weist nur ein Drittel der Dichte von Stahl auf, allerdings ist die Festigkeit wesentlich niedriger. Dadurch müssen beanspruchte Teile größer dimensioniert werden, was einen Teil des Potenzials der Gewichtseinsparung aufzehrt. In der Praxis geht man davon aus, dass für die Substitution von 1 kg Stahl im Fahrzeug, 0,6 kg Aluminium eingesetzt werden müssen (JOICHEM et al. 2004). Ein Nachteil von Aluminium ist der extrem hohe Elektrizitätseinsatz für seine Herstellung aus dem primären Rohstoff Bauxit. Für 1 kg Aluminium sind 12 kWh Strom erforderlich. Energetisch ungünstiger ist das Umschmelzen von Aluminiumschrott. Allerdings wird Sekundäraluminium wegen der in den Schrotten vorhandenen Verunreinigungen hauptsächlich für Gusslegierungen verwendet. Knetlegierungen für gewalzte Bleche und Profile benötigen definierte Legierungsbestandteile, die mit Primäraluminium eingestellt werden müssen.

Ein anderer Leichtbauansatz wurde mit den sogenannten Tailored Blanks von der Stahlindustrie entwickelt, wobei die damalige Thyssen Stahl AG die Pionierarbeit geleistet hat. Die aus dem Zusammenschluss mit der Krupp AG hervorgegangene ThyssenKrupp Stahl AG war globaler Technologieführer und Weltmarktführer bei Tailored Blanks, doch 2011 beschloss der deutsche Konzern den Verkauf des Geschäftsbereichs an die chinesische Wuhan Iron and Steel Corporation. Seit 2013 führt der chinesische Stahlriese die Produktion unter dem Namen Wisco Tailored Blanks weiter. Die Technologie begann 1985 mit dem Verschweißen von großformatigen Stahlblechen, die breiter als mit den damaligen Walzgerüsten herstellbar waren. Mit der Qualifizierung im Laserstrahlschweißen erkannte man die Möglichkeit, Bleche unterschiedlicher Dicke, Festigkeit und Oberflächenbeschichtung zu einem Vorprodukt zu fügen, das anschließend beim Kunden zum Karosseriebauteil tiefgezogen wird (MERTENS & KOCH 2003).

Mit dieser Technologie werden Bleche in Dicken von 0,6–3 mm den unterschiedlichen lokalen mechanischen Anforderungen am fertigen Bauteil angepasst. Hochfester Stahl wird dort eingefügt, wo die lokale Belastung dies erfordert, die Blechdicke wird dort verstärkt, wo hohe Steifigkeit nötig ist. Durch die Anpassung des Werkstoffs und der Werkstoffgüte an die im Bauteil lokal auftretenden Belastungen können die Blechdicken reduziert werden, Verstärkungsteile und Flansche für Überlappungsverbindungen entfallen. Eingesetzt wird die Technologie für die Fertigung von Türen, Heckklappen, Seitenteilen, A- und B-Säulen, Dach, Radkästen, Bodenblech, Längsträgern, Motorträgern, Stoßfängern und Federbeintöpfen. Heute liefern alle großen Stahlhersteller Tailored

Blanks, darunter auch die Salzgitter AG, deren Internetauftritt Abb. 4.1 entnommen ist. Sie zeigt die Rohbaukarosserie eines PKW und hebt die besonders beanspruchten Komponenten hervor.

Die Technologie der laserstrahlgeschweißten, maßgeschneiderten Blechplatinen erlaubt Gewichtseinsparungen an der Rohkarosserie von 25 %. Bei einem Fahrzeug der VW Golf Klasse mit einem Karosseriegewicht von 360 kg sind dies 90 kg.

Die Technologieentwicklung ist noch im Fluss. In der Zwischenzeit können auch nicht gerade verlaufende Blechfugen verschweißt werden. Der Laserstrahl folgt dabei dem Kurvenverlauf beliebiger Fugenkonturen. Auch mit der Verbindung

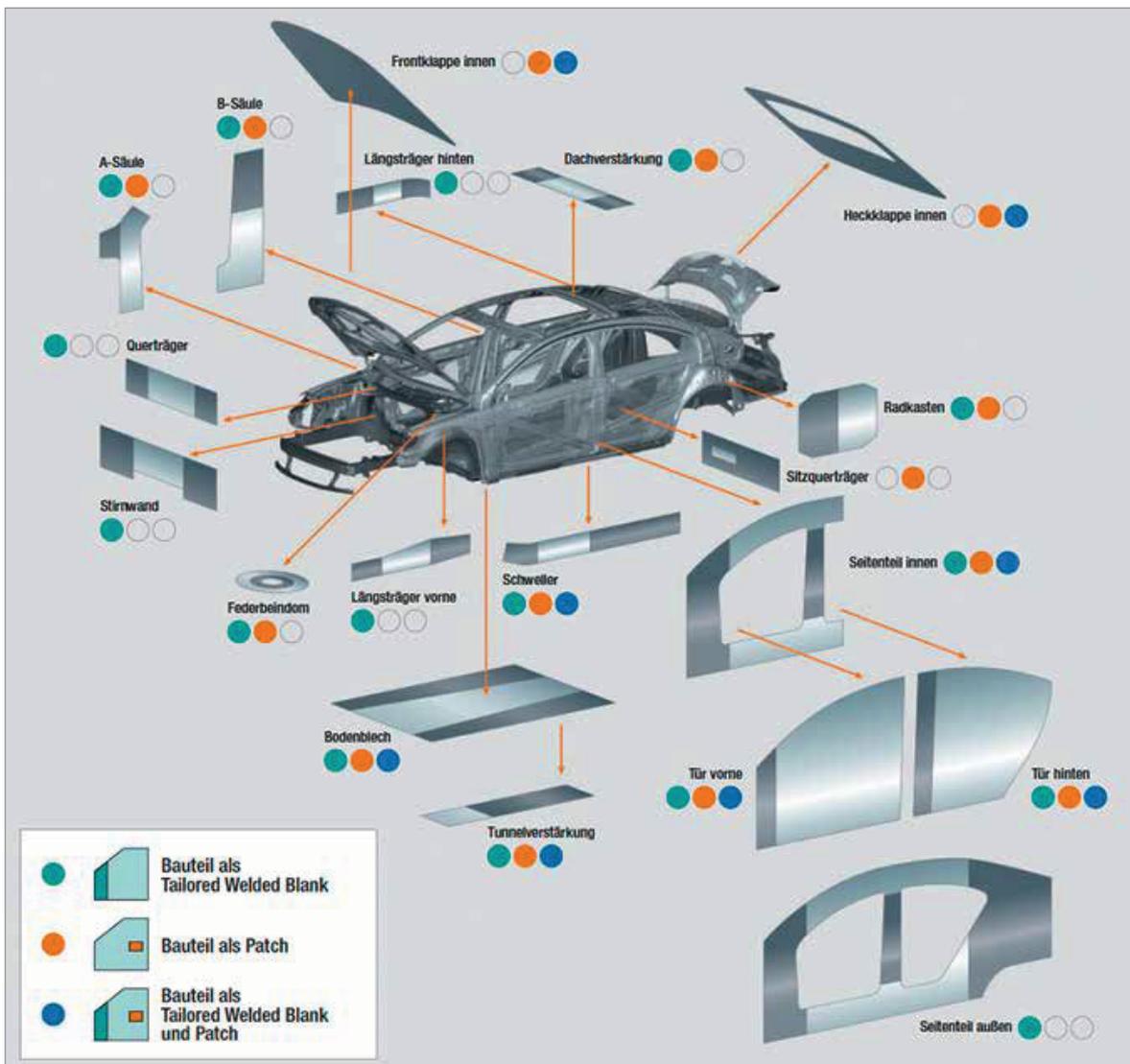


Abb. 4.1: Mögliche Anwendungsbereiche von Tailored Blanks
(Quelle: Salzgitter Europlatinen GmbH)

von Stahl- und Aluminiumblechen zu hybriden Tailored Blanks wird experimentiert. Als Anwendung dafür bietet sich unter anderem das PKW-Dach an, indem die tragenden Seitenteile an den beidseitigen Regennuten in Stahl, das eigentliche Dach dazwischen in Aluminium ausgeführt werden. Angaben, welche Gewichtsreduktionen durch diese Leichtbautechnik möglich werden, sind noch nicht verfügbar. Herausforderungen bei unterschiedlichen Materialien sind die Verminderung der elektrochemischen Korrosion und die Beherrschung unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten.

Dabei stehen Verarbeitungskonzepte untereinander im Wettbewerb. So werden zunehmend Presshärteteile (warmumgeformte Teile) eingesetzt, beispielsweise setzt Volkswagen für die B-Säule des Golf eine solche warmumgeformte Platine aus einem vierstufig gewalzten Tailor Rolled Blank ein, um die Festigkeiten den lokalen Beanspruchungen anzupassen (HILLMANN 2012). Derzeit scheint die Zukunft in einer Mischung unterschiedlicher Verarbeitungsverfahren in einem Automobil zu liegen (BARTOS 2014).

4.1.2 Rohstoffinhalt

Schweißbaren hochfesten Stählen zur Aufnahme lokaler Belastungsspitzen kommt in Tailored Blanks eine Schlüsselrolle zu. Sie sind Voraussetzung für die Gewichtseinsparung, weil sie es ermöglichen, die Blechdicken an der Belastungsstelle aber auch an den übrigen weniger beanspruchten Stellen herabzusetzen. Die eingesetzten hochfesten Stähle weisen Zugfestigkeiten um 1.000 N/mm^2 und mehr auf. Die Festigkeit von Stahl lässt sich durch die Erhöhung des Kohlenstoffgehalts steigern. Bei Kohlenstoffanteilen von über 0,22 % nehmen jedoch die Schweißbarkeit und Zähigkeit rapide ab (DUBBEL 1983), beides Eigenschaften die für geschweißte und tiefgezogene Tailored Blanks unverzichtbar sind. Die Steigerung der Festigkeit von schweißbaren Stählen erfolgt deshalb durch Ausbildung eines feinkörnigen Gefüges. Dies geschieht zum einen durch die Zugabe kleinster Mengen des Korn verfeinernder Legierungselemente, darunter Aluminium, Niob und Vanadium mit Anteilen unterhalb von 0,1 Gewichtsprozent. Zum anderen wird das Gefüge durch Wärmebehandlung und Walzen beeinflusst. Für die Ausbildung von Gefüge und Eigenschaften bei Karosse-

rieblechen spielt die Haubenglühstufe nach dem Kaltwalzen eine große Rolle.

Für die optimierten hochfesten Spezialstähle im Fahrzeugbau haben sich Bezeichnungen wie TRIP-Stahl (Transformation Induced Plasticity), DP-Stahl (Dualphasenstahl), CP-Stahl (Complexphasenstahl) und andere herausgebildet. Ihnen ist gemeinsam, dass durch spezielle Wärmebehandlung und mechanische Umformung in einem ferritischen (DP) oder ferritisch-austenitischen (TRIP) Grundgefüge martensitische Inseln ausgebildet werden, welche die Zugfestigkeit steigern und zugleich die Streckgrenze für eine gute Umformbarkeit beim Tiefziehen niedrig halten. Wichtige Legierungselemente von Dualphasenstahl sind Mangan (0,8–2 %), Silizium (0,1–0,5 %) und Aluminium (bis 0,2 %). Austenitische Stähle, darunter TRIP-Stahl, enthalten zusätzlich Austenitbildner wie Nickel, Kobalt und Mangan.

Die Werkstoffentwicklung ist nach wie vor stark im Fluss. Eine neuere Entwicklung sind hochfeste Mangan-Bor-Stähle (VOLLMERS 2008, BARTOS 2014).

4.1.3 Foresight industrielle Nutzung

Der Golf III von Volkswagen war 1991 weltweit das erste Fahrzeug, bei dem Tailored Blanks in der Serienfertigung eingesetzt wurden. Heutzutage bestehen die Rohkarossen moderner Autos zu ca. 40 % aus Tailored Blanks (FRAUNHOFER IWS 2015). Die Beherrschung des Laserstrahlschweißens beliebiger Nahtformen erschließt der Technologie weitere Anwendungen und zusätzliche Potenziale zur Gewichtsreduktion. Es ist davon auszugehen, dass bis 2035, dem Zeithorizont dieser Untersuchung, die vorhandenen Potenziale voll ausgeschöpft werden.

Mit der noch nicht marktreifen Entwicklung von hybriden Blanks aus Stahl und Aluminium wachsen die beiden Leichtbauansätze Aluminiumkarosserie und Stahlleichtbaukarosserie zusammen. Die Übernahme von hybriden Blanks in die Serienfertigung von Autos wird Aluminium ein neues mengenmäßig bedeutsames Verwendungssegment erschließen, zu Lasten von Stahl.

Haupteinsatzgebiet von Tailored Blanks ist die Automobilindustrie. Einsatzpotenziale bestehen

aber auch in anderen Sektoren, beispielsweise der Hausgeräteindustrie, im Maschinenbau und im Anlagenbau.

4.1.4 Foresight Rohstoffbedarf

Im Jahre 2013 wurden weltweit 65,5 Millionen PKWs produziert (OICA 2014). Das am Fraunhofer ISI erstellte Global Mobility Model GLOMO (KÜHN et al. 2014) prognostiziert die Entwicklung des globalen Automobilmarkts unter Berücksichtigung verschiedener Segmente (Kleinwagen, Kompaktwagen, Mittelklasse, Oberklasse) und Antriebstechnologien (HEV, PHEV, BEV, FCEV). Einfließende Faktoren sind u.a. das weltweite Bevölkerungs- und Wohlstandswachstum sowie Treibstoff- und Anschaffungskosten. Die folgenden Szenarien sind an jene in KÜHN et al. (2014) angelehnt.

- Das Szenario „Prävalenz konventioneller PKW“ geht von niedriger Akzeptanz und geringer politischer Förderung für E-PKW sowie einer ungelösten Reichweiten- (BEV) und Wasserstoffinfrastruktur- (FCEV) Problematik aus.
- Im Szenario „Marktdurchdringung E-PKW“ kann die Akzeptanz von E-PKW durch Infor-

mationskampagnen, politische Förderung und technische Verbesserungen bzgl. Batteriereichweite und Wasserstoffinfrastruktur deutlich gesteigert werden.

- Das Szenario „Mobilitätskonzepte“ geht neben den Annahmen aus dem Szenario „Marktdurchdringung E-PKW“ davon aus, dass flexible, verknüpfte Mobilitätskonzepte aus öffentlichem Nahverkehr und Sharing-Angeboten die Zahl der insgesamt verkauften PKW 2035 um ca. 20 Mio. PKW reduziert.

Tab. 4.1 zeigt die sich aus den drei verschiedenen Szenarien ergebenden Verkaufszahlen für PKW 2035.

Bei einem mittleren Ausgangsgewicht der Fahrzeugkarosserie von 360 kg, dem zuvor genannten heutigen Einsatz von Tailored Blanks (40 %) und einer konsequenten und vollständigen Nutzung der Tailored Blanks Technologie in 2035 wird der Bedarf an Karosserieblechen für Fahrzeuge von 22,1 Mio. t in 2013 auf 34,3 bis 39,7 Mio. t in 2035 steigen (vergleiche Tab. 4.2).

Die Leichtbautechnologie der Tailored Blanks besitzt also das Potenzial, trotz einer Zunahme der Fahrzeugproduktion von 94 % (in den Szenarien Prävalenz konventioneller PKW und Marktdurch-

Tab. 4.1: Weltweite E-PKW-Verkäufe 2035 nach verschiedenen Szenarien

| Antriebsart | Zahl der in 2035 verkauften E-PKW in Mio. Fahrzeuge | | |
|--------------|---|--------------------------|--------------------|
| | Szenario | | |
| | Prävalenz konventioneller PKW | Marktdurchdringung E-PKW | Mobilitätskonzepte |
| ICE | 131,6 | 87,1 | 75,2 |
| HEV | 15,6 | 15,6 | 13,5 |
| PHEV | 0,0 | 24,3 | 21,0 |
| BEV | 0,0 | 14,0 | 12,1 |
| FCEV | 0,0 | 6,2 | 5,3 |
| Summe | 147,2 | 147,2 | 127,2 |

Tab. 4.2: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Bedarf an Stahl für Karosseriebleche von Fahrzeugen in t

| Rohstoff | Produktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 | |
|----------|-----------------|-------------|------------------------|--------------------|
| | | | Konventionelle & E-PKW | Mobilitätskonzepte |
| Rohstahl | 1.655.549.570 | 22.100.000 | 39.750.000 | 34.300.000 |

dringung E-PKW um 125 %) den Stahlbedarf für Karosseriebleche nur um 55 % (80 %) steigen zu lassen. Dies ist ein Beispiel für das Potenzial, mit Leichtbaustrategien die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Rohstoffbedarf herbeizuführen.

4.1.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Tailored Blanks sind, wie andere Stahlprodukte auch, vollständig recycelbar (ARCELOR MITTAL 2013). Der Recyclingaufwand steigt bei hybriden Blanks aus mehreren Metallen, wie beispielsweise Aluminium und Stahl an, weil hier die Blanks manuell voneinander getrennt werden müssen.

4.2 Elektrische Traktionsmotoren für Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge

4.2.1 Technologiebeschreibung

Elektrische Traktionsmotoren (auch Fahrmotoren) sind in Schienenfahrzeugen bereits etabliert und stellen im Bereich der Kraftfahrzeuge eine Alternative zu konventionell mit Diesel oder Benzin betriebenen Verbrennungsmotoren dar. Das gestiegene Interesse an dieser Technologie ist zum einen im Streben nach Unabhängigkeit vom Rohstoff Öl begründet. Zum anderen ermöglichen elektrisch angetriebene Kraftfahrzeuge unter Berücksichtigung aller Produktionsschritte der Treibstoffherzeugung und des Fahrzeugbaus eine Reduktion der verursachten Treibhausgasemissionen, sofern der zum Antrieb verwendete Strom nicht ausschließlich aus Kohle erzeugt wird (BAUER et al. 2015). Die CO₂-Emissions-Einsparungen sind umso größer, je mehr erneuerbare Energien zur Stromerzeugung zum Einsatz kommen. Unter Einbezug weiterer Umweltschutzkategorien (z. B. Schadstoffbelastung, Versauerungspotenzial) können allerdings weniger eindeutige Aussagen im Vergleich verschiedener Antriebstechnologien getroffen werden (BAUER et al. 2015). Da die Technologie im Vergleich zu Verbrennungsmotoren relativ neu ist, hat sie jedoch noch größere Entwicklungspotenziale. Abgesehen von diesen globalen Betrachtungen versprechen elektrische Traktionsmotoren im Kraftverkehr eine lokale Entlastung urbaner

Ballungszentren, da sie weniger Lärm und weniger direkte Abgasemissionen verursachen.

Diese Technologiesynopse beschäftigt sich mit Traktionsmotoren für Hybrid-, Elektro- oder Brennstoffzellen-PKW (zusammen „E-PKW“). Nutzfahrzeuge werden nicht berücksichtigt. E-Bikes werden in Kapitel 4.38 näher betrachtet.

Antriebsarten von E-PKW

Abb. 4.2 veranschaulicht die verschiedenen Antriebskonzepte. In Hybridfahrzeugen (HEV) ergänzen elektrische Antriebskomponenten den konventionellen Verbrennungsmotor, wobei man Mikro-, Mild- oder Vollhybridfahrzeuge unterscheidet. Ein Micro-Hybrid ist statt mit dem konventionellen Starter und Generator mit einem Integrierten-Startergenerator (ISG) ausgestattet. Dadurch kann Bremsenergie zurückgewonnen werden (Rekuperation), indem sie durch den ISG in elektrische Energie umgewandelt und in die Starterbatterie eingespeist wird. Zusätzlich wird über die so genannte Start-Stop-Automatik Kraftstoff gespart, da diese den Verbrennungsmotor im Stand unter bestimmten Bedingungen automatisch ab- und wieder anschaltet. Der Antrieb eines Mikro-Hybrids erfolgt allerdings ausschließlich über den Verbrennungsmotor. Beim Mild-Hybrid hat der ISG zusätzlich dazu die Aufgabe, den Verbrennungsmotor beim Antrieb zu unterstützen. Dadurch arbeitet der Verbrennungsmotor effizienter und kann kleiner ausgelegt werden. Beim Vollhybrid kann das Fahrzeug darüber hinaus auch rein elektrisch gestartet und angetrieben werden. Der Plug-In-Hybrid (PHEV) ist schließlich noch dahingehend erweitert, dass elektrische Energie zum Antrieb aus dem Stromnetz aufgeladen werden kann.

Rein batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) beziehen die benötigte elektrische Energie ausschließlich aus dem Netz. Das obligatorische Aufladen der Batterien am Stromnetz ist momentan mit geringen Reichweiten, langen Ladezeiten und hohen Anschaffungskosten verbunden (CHAU & LI 2014). Zur Ausdehnung der Reichweite kann das batterieelektrische Fahrzeug mit einem Range-Extender ausgestattet werden (REEV). Der Range-Extender ist ein kleiner Verbrennungsmotor, welcher bei niedrigem Ladezustand der Batterien zu deren Aufladung eingesetzt werden kann.

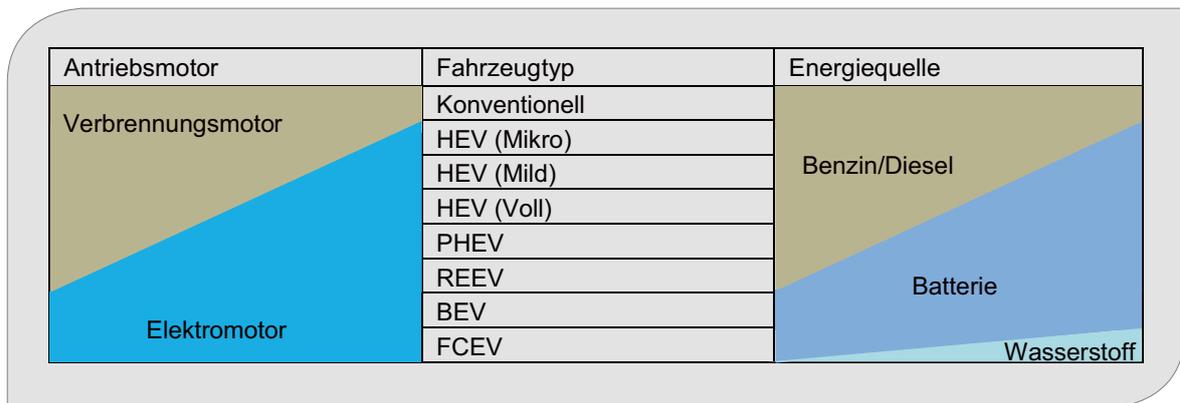


Abb. 4.2: Verschiedene Antriebskonzepte von Kraftfahrzeugen
(Quelle: eigene Darstellung basierend auf CHAU & LI 2014)

Bei Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) erzeugt eine Brennstoffzelle die benötigte elektrische Energie aus Wasserstoff oder Methanol und gibt sie an eine Traktionsbatterie oder direkt an den Elektromotor ab. Daraus ergeben sich momentan ebenfalls hohe Anschaffungskosten. Hinzu kommt eine fehlende Treibstoff-Infrastruktur.

Anforderungen an Traktionsmotoren für E-PKW

Generell ist der Wirkungsgrad bzw. die Effizienz das wichtigste Qualitätsmerkmal eines Motors. In Kraftfahrzeugen sollte eine hohe Effizienz des Motors über eine große Bandbreite von Geschwindigkeiten und Drehmomenten gewährleistet sein. Für die Gesamteffizienz des Fahrzeugs ist außerdem wichtig, dass der Traktionsmotor möglichst wenig Platz einnimmt und möglichst wenig zur Gesamtmasse beiträgt. Ein wesentliches Kriterium ist daher eine hohe Leistungs- und Drehmomentsdichte des Motors. Zudem zählen ein geringer Wartungsaufwand, eine hohe Verlässlichkeit und geringe Lärmbelastung zu den Grundanforderungen. Auch die Konkurrenzfähigkeit der Kosten und die Verfügbarkeit der Werkstoffe müssen bei der Motorwahl berücksichtigt werden (CHAU & LI 2014, BRADSHAW et al. 2013).

Arten von Traktionsmotoren für E-PKW

In der Vergangenheit wurden Gleichstrommotoren in Elektrofahrzeugen eingesetzt, da es sich um eine einfache und ausgereifte Technologie

handelt. Ihr größter Nachteil ist jedoch der wartungs- und abnutzungsintensive Gleichrichter, der außerdem Kohlenstaub verursacht (BRADSHAW et al. 2013). In Zukunft werden Gleichstrommotoren daher höchstens in stark auf Einfachheit abzielenden Kraftfahrzeugkonzepten Verwendung finden (CHAU & LI 2014). Dominierend werden Drehstrommaschinen sein. Hierbei kommen Synchron- und Asynchronmotoren sowie geschaltete Reluktanzmotoren in Elektrofahrzeugen zum Einsatz. Durch Spezifikationen und Hybride dieser drei Grundtypen ergeben sich eine Reihe verschiedener Motor-konzepte (s. Tab. 4.3).

Synchron- und Asynchronmotoren arbeiten nach dem Prinzip der Lorenzkraft. Kupferspulen am Stator erzeugen ein rotierendes Magnetfeld, so dass der Rotor, an welchem ebenfalls ein Magnetfeld anliegt oder induziert wird, in Bewegung versetzt wird. Rotiert er synchron mit dem Magnetfeld des Stators, handelt es sich um einen Synchronmotor. Dreht sich der Rotor langsamer, spricht man von einem Asynchronmotor.

Asynchronmotoren werden auch als Induktionsmotoren bezeichnet. Ihr Rotor („Kurzschlussläufer“ oder „Käfigläufer“) besteht meistens aus einem in Eisenblech eingebetteten, kurzgeschlossenen Käfig aus Aluminium oder Kupfer (s. Kapitel 4.16). Hauptvorteil der Asynchronmotoren sind ihre geringen Kosten. Darüber hinaus sind sie wartungsarm, effizient und technologisch ausgereift. Hauptnachteil ist, dass Masse und Volumen im Vergleich zu anderen Motortypen bei gleicher Leistung groß ausfallen (CHAU & LI 2014, BRADSHAW et al. 2013).

Das Magnetfeld am Rotor eines Synchronmotors kann durch Permanentmagneten erzeugt oder durch Kupferspulen elektrisch induziert werden. Auch eine Kombination aus beidem ist denkbar (BURKHARDT et al. 2014). Die Permanentmagnete können an der Oberfläche montiert (SPM) oder integriert (IPM) eingebaut werden. Elektrisch erregte Synchronmotoren sind mit geringeren Kosten verbunden, haben gegenüber permanentmagnetisch erregten Synchronmotoren aber auch einen geringeren Wirkungsgrad und sind bei gleicher Leistung größer und schwerer. Permanentmagnetisch erregte Synchronmotoren zeichnen sich durch die größte Leistungsdichte aus und sind zudem wartungsarm und sehr effizient. Die eingesetzten Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB-Magnete, vgl. Kapitel 4.38) verursachen allerdings hohe Kosten und enthalten die Seltenerdelemente Neodym und Dysprosium, deren Verfügbarkeit als kritisch eingeschätzt wird.

Reluktanzmotoren basieren auf der durch magnetischen Widerstand (Reluktanz) verursachten Ausrichtung eines ferromagnetischen Rotors im Magnetfeld des Stators. Als Traktionsmotoren in elektrischen Kraftfahrzeugen kommen Geschaltete Reluktanzmotoren (Switched Reluctance SR) zum Einsatz, bei denen am Stator durch Ein- und Ausschalten von Kupferspulen ein rotierendes Magnetfeld entsteht. Geschaltete Reluktanzmotoren sind wartungsarm, effizient und mit niedrigen Kosten verbunden, haben jedoch eine geringere Leistungsdichte als permanentmagnetisch erregte Synchronmotoren. Ein wesentlicher Nachteil ist ihre hohe Lautstärke (CHAU & LI 2014). Entscheidend für ihre zukünftige Marktdurchdringung wird

daher sein, inwieweit diese Lautstärke in der Weiterentwicklung der relativ neuen Technologie noch reduziert werden kann.

Aufgrund der Vorteile bei Effizienz und Leistungsdichte schienen sich permanentmagnetisch erregte Synchronmotoren zunächst als dominierende Lösung durchzusetzen. Preisanstieg und Verfügbarkeitsengpässe bei Seltenen Erden im Jahr 2011 haben allerdings zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen zu NdFeB-magnetfreien Technologien motiviert. So wurde beispielsweise im EU-Projekt Motorbrain der Prototyp eines permanentmagnetisch erregten Synchronmotors entwickelt, in welchem NdFeB-Magnete durch Ferrite substituiert wurden. Die geringere magnetische Leistung wurde durch einen High-Speed-Rotor kompensiert (MOTORBRAIN 2014).

Bei neu entwickelten Asynchronmotoren ergeben sich durch höhere Drehzahlen (21.000 Umdrehungen/Minute) Verbesserungen in der Leistungsdichte. Ein Planetengetriebe passt die Umdrehungen der Fahrzeugachse an (AUTO.DE 2012, GORONCY 2013). Reluktanzmotoren werden beispielsweise von FlandersDrive und Inverto entwickelt (FLANDERSDRIVE 2013, MARKT UND MITTELSTAND 2013, WETTACH 2013). Beim BMW i3 kommt ein Hybridmotor aus permanentmagnetisch erregtem Synchronmotor und Geschaltetem Reluktanzmotor zum Einsatz. Continental implementiert derzeit nach eigenen Angaben Asynchronmotoren sowie elektrisch oder permanentmagnetisch erregte Synchronmotoren (CONTINENTAL AG 2015). Tab. 4.3 gibt eine Übersicht zu Traktionsmotoren in E-PKW.

Tab. 4.3: Verschiedene Motortypen und Beispiele für Fahrzeugmodelle, in denen sie eingesetzt werden, basierend auf ERDMANN et al. (2015) und CHAU & Li (2014)

| Motortyp | Fahrzeugmodell |
|--|---|
| Gleichstrommotor | Citroën Berlingo Electrique, Fiat Panda Elettra, Reva G-Wiz DC |
| Asynchronmotor/ Induktionsmotor | BMW Mini E, Fiat Seicento Electra, Ford E-KA, GM Chevy Volt, GM EV1, Imperia GP, Reva G-Wiz I, Tesla Roader |
| Synchronmotor, elektrisch erregt | Renault Fluence Z.E., Renault Kangoo Z.E. |
| Synchronmotor, permanentmagnetisch erregt | BYD e6, Citroën C-Zero, Ford Escape Hybrid, Ford Fusion Hybrid, Honda Accord Plug-in, Honda Civic Hybrid, Mitsubishi i-MiEV, Nissan Leaf, Peugeot iOn, Smart Fortwo, Toyota Prius |
| Geschalteter Reluktanzmotor | Chloride Lucas, Holden ECOmodore |
| Hybrid | BMW i3 |

4.2.2 Rohstoffinhalt

Der spezifische Materialbedarf des Traktionsmotors eines Kraftfahrzeugs hängt stark von der Motorgröße ab, die wiederum vom Segment (Klein- bis Oberklassewagen) und der Antriebstechnologie (HEV, PHEV, BEV, FCEV, REEV) beeinflusst wird. Außerdem unterscheidet sich der Rohstoffbedarf der verschiedenen Motortypen.

In konventionell mit Verbrennungsmotor angetriebenen Kraftfahrzeugen werden kleinere Mengen Kupfer für Anlasser und Generator benötigt. Demgegenüber erzeugen elektrische Traktionsmotoren einen deutlichen Mehrbedarf an Kupfer. Kupferspulen werden zur Erzeugung von Magnetfeldern am Stator eines Elektromotors, bei elektrisch erregten Synchronmotoren auch am Rotor eingesetzt. Der Kurzschlussläufer am Rotor der Asynchronmotoren besteht aus Kupfer oder Aluminium (s. Kapitel 4.16).

In permanentmagnetisch erregten Synchronmotoren und Hybridmotoren werden Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB-Magnete) verwendet, welche das Seltenerdelement Neodym (Nd) enthalten. Zur Optimierung der Magneteigenschaften (s. Kapitel 4.38) wird ein Teil des Neodyms durch das Seltenerdelement Dysprosium (Dy) substituiert.

Aktuelle Angaben zur Magnetmasse pro Traktionsmotor schwanken zwischen 1–3 kg. Tab. 4.4 gibt eine Übersicht der eingesetzten Magnetmassen nach Fahrzeugsegment und Antriebstechnologie basierend auf GLÖSER-CHAHOUD & TERCERO ESPINOZA (2015). Zugrunde liegt der nicht-lineare Zusammenhang zwischen Motorleistung und Magnetmasse.

Angaben zum Dysprosiumanteil sind zum Teil sehr unterschiedlich, liegen jedoch meist zwischen 6,6 % und 12 % Dysprosium. Wir gehen von dem in GLÖSER-CHAHOUD & TERCERO ESPINOZA (2015) berechneten Mittelwert von 8,3 % Dy aus, woraus sich (bei insgesamt 32 % Seltenerdelementen, s. Kapitel 4.38) 23,7 % Nd ergeben. Möglich ist eine teilweise Substitution von Nd und Dy durch Praseodym (Pr) und Terbium (Tb), was in Kapitel 4.38 näher diskutiert wird.

Für den spezifischen Dysprosiumbedarf 2035 betrachten wir aufgrund zahlreicher Forschungsanstrengungen zur Reduktion des Dysprosiumanteils in NdFeB-Magneten (Details s. Kapitel 4.38) die in Tab. 4.5 dargestellten unterschiedlichen Szenarien. Da sich Dysprosium und Neodym in den Magnetmaterialien gegenseitig substituieren, bedeutet eine Reduktion des Dysprosiums bei allen materialwissenschaftlichen Ansätzen eine Erhöhung des Neodymanteils.

Tab. 4.4: Magnetmasse pro Motor bei verschiedenen Antriebstechnologien und Fahrzeugsegmenten aus GLÖSER-CHAHOUD & TERCERO ESPINOZA (2015)

| Szenario | HEV | PHEV | BEV/FCEV |
|---------------|-----|------|----------|
| Kleinwagen | 1,2 | 1,7 | 1,7 |
| Kompaktklasse | 1,5 | 2,3 | 2,5 |
| Mittelklasse | 1,6 | 2,5 | 2,8 |
| Oberklasse | 2,0 | 2,8 | 3,0 |

Tab. 4.5: Szenarien für die Entwicklung des Dy-Anteils in NdFeB-Magneten für Motoren von E-PKW

| Szenario | Reduktion des Dy-Anteils durch F&E-Fortschritte | Dy-Anteil in NdFeB-Magneten in E-PKW-Motoren 2035 | |
|---------------------|---|---|--------|
| | | Dysprosium | Neodym |
| Geringer Dy-Anteil | [Anteil Dy 2014]–50 % | 4,2 % | 27,8 % |
| Moderater Dy-Anteil | [Anteil Dy 2014]–25 % | 6,2 % | 25,8 % |
| Hoher Dy-Anteil | [Anteil Dy 2014]–0 % | 8,3 % | 23,7 % |

In dieser Synopse wird ausschließlich der Rohstoffbedarf für Traktionsmotoren betrachtet. Zum Bedarf an NdFeB-Magnetmaterial für weitere Automobilanwendungen s. Kapitel 4.38.

4.2.3 Foresight industrielle Nutzung

Marktentwicklung E-PKW

Für die Entwicklung des PKW-Marktes wurden die drei Szenarien des am Fraunhofer ISI erstellten Global Mobility Model GLOMO (KÜHN et al. 2014, SCHADE et al. 2012) übernommen, welche bereits in Kapitel 4.1 beschrieben wurden.

Marktentwicklung verschiedener Technologien der Traktionsmotoren

Für den Bedarf an Seltenerdelementen für Traktionsmotoren von E-PKW ist der Marktanteil der permanentmagnetisch erregten Synchronmotoren und der Hybridmotoren aus Geschalteten Reluktanzmotoren und permanentmagnetisch erregten Synchronmotoren entscheidend. Basierend auf den in der Technologiebeschreibung aufgeführten Vor- und Nachteilen der verschiedenen Traktionsmotor-Technologien werden hier drei Szenarien mit unterschiedlichen Annahmen zur Versorgung mit Seltenerdelementen entworfen:

- Im Szenario „Motoralternativen“ führen hohe Preise und Versorgungsunsicherheiten und ein damit einhergehendes starkes Problembewusstsein der Automobilbranche zu verstärkten Forschungs- und Entwicklungsbemühungen bei den seltenerdelement-freien Motortechnologien. Die resultierenden technischen Verbesserungen verursachen in Kombination mit dem deutlichen Preisvorteil eine Marktdominanz der seltenerdelement-freien Technologien und somit einen geringen Bedarf an Seltenerdelementen.
- Im Szenario „Dominanz NdFeB-Motoren“ veranlasst eine stabile Preis- und Versorgungssituation und ein damit verbundenes geringes Problembewusstsein nur wenige Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen bei den seltenerdelementfreien Motortechnologien. Die hohe Effizienz und Leistungsdichte der NdFeB-haltigen Motortechnologien kompensiert die durch den Seltenerdeelementanteil entstehenden Zusatzkosten, so dass permanentmagnetisch erregte Synchronmotoren den Markt dominieren und eine hohe Nachfrage an Seltenerdelementen verursachen.
- Das Szenario „Verschiedene Motortypen“ geht von einer sich zyklisch verändernden Entwicklung bis 2035 aus. Phasen der Angebotsverknappung mit hohen Preisen für Seltenerdelemente lösen ein Ausweichen auf Konkurrenztechnologien aus. Dieses führt wiederum zu geringeren Preisen und einem ausreichenden Angebot, wodurch die

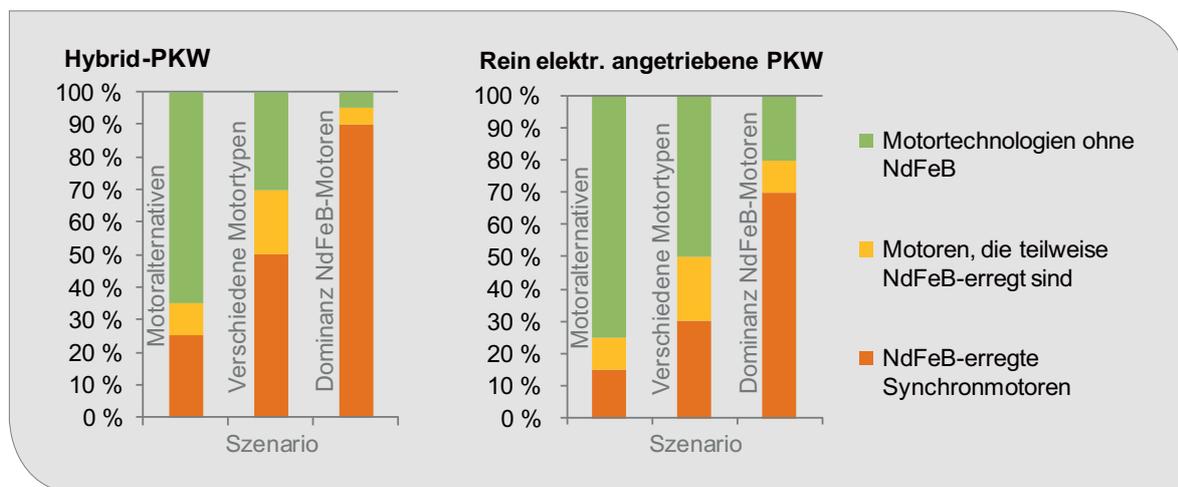


Abb. 4.3: Für 2035 geschätzte Anteile von Technologien für Traktionsmotoren, welche vollständig, teilweise oder nicht auf einer permanentmagnetischen Erregung durch NdFeB-Magnete beruhen (Quelle: eigene Darstellung)

Engpassproblematik aus dem Blickfeld gerät. NdFeB-Technologien werden dadurch wieder attraktiver, was erneut zu einer Angebotsverknappung führt, der Zyklus beginnt von vorn. Es resultiert ein Technologiemix aus NdFeB-haltiger Technologie, NdFeB-freien Technologien und Hybridtechnologien, die einen Kompromiss zwischen beiden darstellen.

- Bei zunehmender Größe des Motors nimmt der Effizienzvorteil der permanentmagnetisch erregten Synchronmotoren ab, so dass Motoren ohne NdFeB-Magnete insbesondere in Antriebskonzepten mit großen Elektromotoren, also batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) und Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV), eine Konkurrenz darstellen. Daher wurde in allen drei Szenarien ein höherer Anteil der NdFeB-freien Technologie für BEV und FCEV als für Hybridfahrzeuge angenommen.

Die für 2035 aus diesen Überlegungen heraus geschätzten Anteile der Motortechnologien, welche NdFeB-Magnetmaterial benötigen, sind in Abb. 4.3 zusammengefasst.

4.2.4 Foresight Rohstoffbedarf

Abb. 4.4 und Abb. 4.5 veranschaulichen, welcher Bedarf an Seltenen Erden sich aus Kombination der Szenarien für (a) Verkaufszahlen von E-PKW, (b) Marktanteil verschiedener Motortechnologien und (c) Dysprosiumanteil an den NdFeB-Magneten ergibt. Es wird deutlich, dass die Entwicklung des Marktanteils von E-PKW am gesamten Automobilmarkt den größten Einfluss auf den Bedarf an Neodym und Dysprosium hat. Jedoch kann durch alternative Motortechnologien, also eine Substitution auf Technologieebene, der Nachfrageanstieg für Neodym und Dysprosium erheblich abgemildert werden. Auch die Reduktion des Dysprosiumanteils in den Magneten birgt große Einsparpotentiale. Für Tab. 4.6 wurde ein plausibel erscheinender Mittelwert übernommen, sowie die sich aus den realistischen Szenarien ergebende mögliche Spanne angegeben. Bei den Produktionsdaten wurden auch die Substitute Praseodym und Terbium berücksichtigt (Details s. Kapitel 4.38). Es zeigt sich, dass elektrische Traktionsmotoren für E-PKW bis 2035 insbesondere den Bedarf an Dysprosium stark erhöhen könnten. Zur weiteren Auswertung s. Kapitel 4.38.

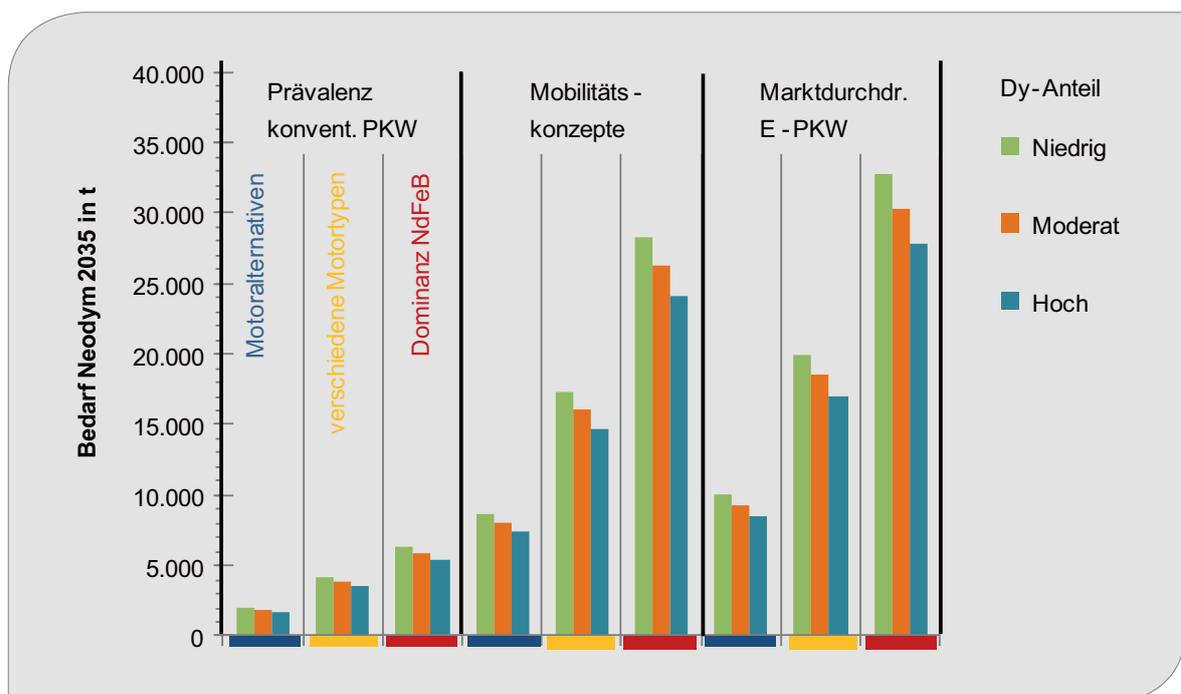


Abb. 4.4: Bedarf an Neodym für Traktionsmotoren in E-PKW 2035 in t entsprechend verschiedener Szenarien (Quelle: eigene Darstellung)

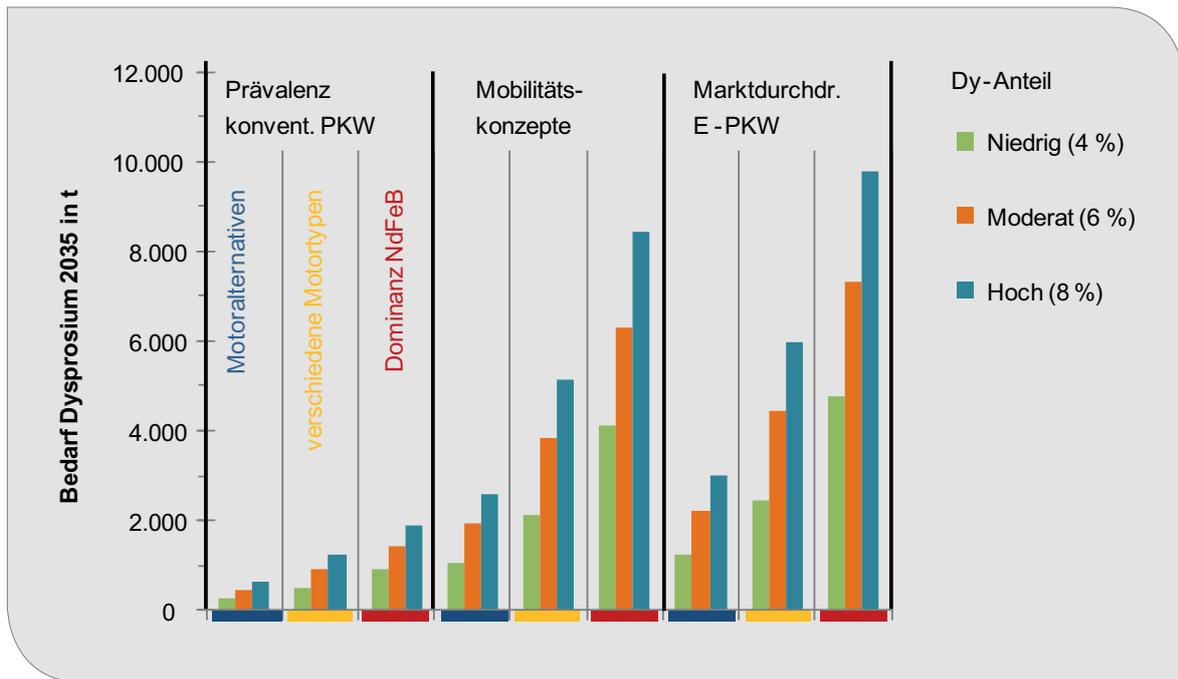


Abb. 4.5: Bedarf an Dysprosium für Traktionsmotoren in E-PKW 2035 in t entsprechend verschiedener Szenarien (Quelle: eigene Darstellung)

In einer Studie des Fraunhofer ISI (ANGERER et al. 2010) wird der Kupferbedarf für E-PKW in einem Szenario mit 70 % Marktanteil der E-PKW 2035 ca. 7 Mio. t betragen. Im Szenario mit 40 % Marktanteil der E-PKW werden ca. 5 Mio. t Cu benötigt. Der Bedarf für E-PKW wird also kein außergewöhnlicher Faktor bei der Erhöhung des gesamten Kupferbedarfs von 2014 bis 2035 sein (s. Tab. 4.6).

4.2.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Zu entsorgende Traktionsmotoren aus E-PKW werden in Deutschland derzeit in der Regel dem Kupfer-Recyclingstrom zugeführt (BAST et al. 2015). Es ist zwar technisch möglich, die NdFeB-Magnete zerstörungsfrei aus den Motoren zu entfernen und wiederverwenden, durch den Einsatz verschiedener Geometrien und Legierungen sowie die stetige Weiterentwicklung der Magnet- und Motortechnologien wird die direkte Wiederverwendung allerdings erschwert. Gelingt jedoch das sortenreine Sammeln von NdFeB-Magneten

Tab. 4.6: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf für E-PKW in t

| Rohstoff | Produktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|----------|----------------------------------|-------------|-------------------------|
| Nd, Pr | 36.600 ¹ | gering | 16.000 (1.700 – 33.000) |
| Dy, Tb | 2.330 ¹ | gering | 3.800 (260 – 9.800) |
| Kupfer | 18.365.341 (B) 21.446.333 (R) | gering | 5.000.000 |

B: Bergwerksförderung

R: Raffinadeproduktion

¹ Metallproduktion berechnet aus den SEO, Schätzung inkl. illegaler Förderung in China, (Quelle: KINGSNORTH 2015)

in einem separaten Abfallstrom, ist ein werkstoffliches Recycling durch Wasserstoffversprödung möglich, was aber zu Remanenzverlusten von ca. 3 % führt. Durch rohstoffliches Recycling mittels hydrometallurgischer Aufbereitung können reine Seltene Erden als Oxide zurückgewonnen werden. In Deutschland ist die Reduktion dieser Oxide zu reinen Metallen jedoch derzeit technisch nicht möglich (BAST et al. 2015).

2035 wird das Recycling von NdFeB-Magneten nach ihrem Einsatz in E-PKW-Traktionsmotoren in Deutschland wahrscheinlich wirtschaftlich sein, wobei dies von Mengenaufkommen, Rohstoffpreisen und dem Anteil der teureren Schweren Seltenerdelementen Dysprosium und Terbium abhängen wird (BAST et al. 2015).

4.3 PEM-Brennstoffzellen für Elektrofahrzeuge

4.3.1 Technologiebeschreibung

Nachdem führende Automobilhersteller Brennstoffzellen-Serienfahrzeuge für das Jahr 2004 angekündigt hatten und diese nicht kamen, haben

sich viele Aktivitäten und Forschungsanstrengungen auf Batteriefahrzeuge konzentriert. Nachdem diese aber nicht die geplanten Speicherdichten und Reichweiten erzielt haben, hat die Brennstoffzellentechnologie in den letzten Jahren wieder etwas an Bedeutung gewonnen. Der breite Markteintritt für mobile und stationäre Brennstoffzellen wird dabei immer weiter in die Zukunft verschoben. Nur einzelne Firmen bieten heute schon portable Brennstoffzellen für Nischenmärkte an.

Es gibt unterschiedliche Brennstoffzellensysteme. Allen ist gemein, dass sie durch kalte Verbrennung Strom liefern. Sie werden nach ihrem Elektrolyten bezeichnet (vergleiche Abb. 4.6). Weitere Einteilungen erfolgen über die Arbeitstemperatur (Tief- und Hochtemperaturbrennstoffzellen) und ihre Anwendung (stationär, portabel oder mobil).

Die Reaktionen in den Brennstoffzellen laufen an Grenzflächen ab, weshalb verschiedene Brennstoffzellenmodule, bestehend aus der Membran, Gasdiffusionslagen und Bipolarplatten (zur Stromleitung und Medientransport), in Stacks zusammengefasst werden (vergleiche Abb. 4.7).

In Fahrzeugen kommt die Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEM) als Stromlieferant für

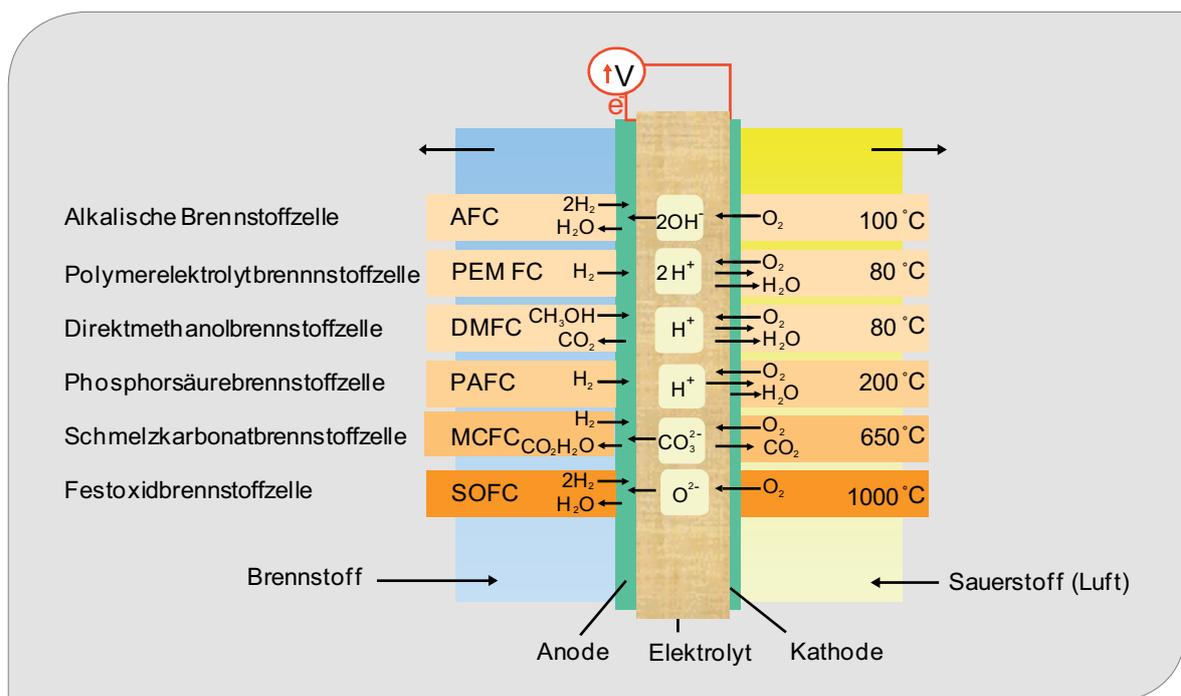


Abb. 4.6: Funktionsprinzip von Brennstoffzellen
(Quelle: verändert nach LEDJEFF-HEY 1996)

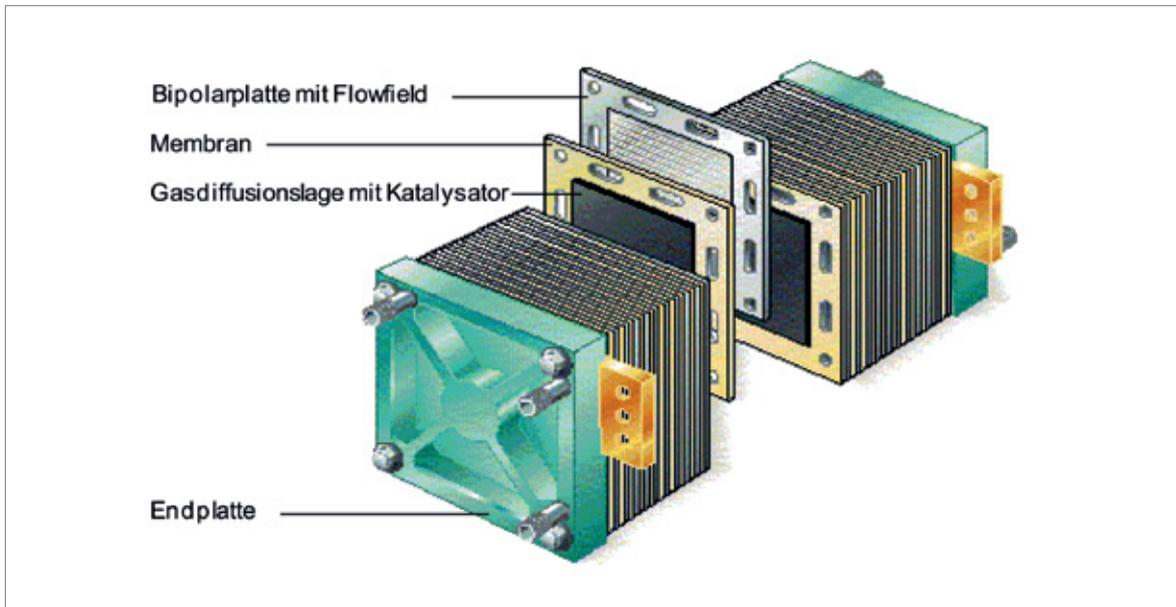


Abb. 4.7: Aufbau einer Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle
(Quelle: verändert nach CELANESE)

den Traktionsmotor zum Einsatz, da sie in der Lage ist, dynamisch auf schnelle Lastwechsel zu reagieren. Ferner können hohe Leistungsdichten erzielt werden. Die Arbeitstemperatur der PEM beträgt ca. 50–60 °C, da die Ionen-Leitfähigkeit dieser Polymere entscheidend vom Wassergehalt abhängig ist. In einer Prozessvariante (mit Phos-

phorsäure gefülltes Polymer) sind Temperaturen bis 120° C möglich. Daneben wird auch die Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC) für Fahrzeuge entwickelt, allerdings nur als Ersatz für die Fahrzeugbatterie (als APU, „Auxiliary Process Unit“).

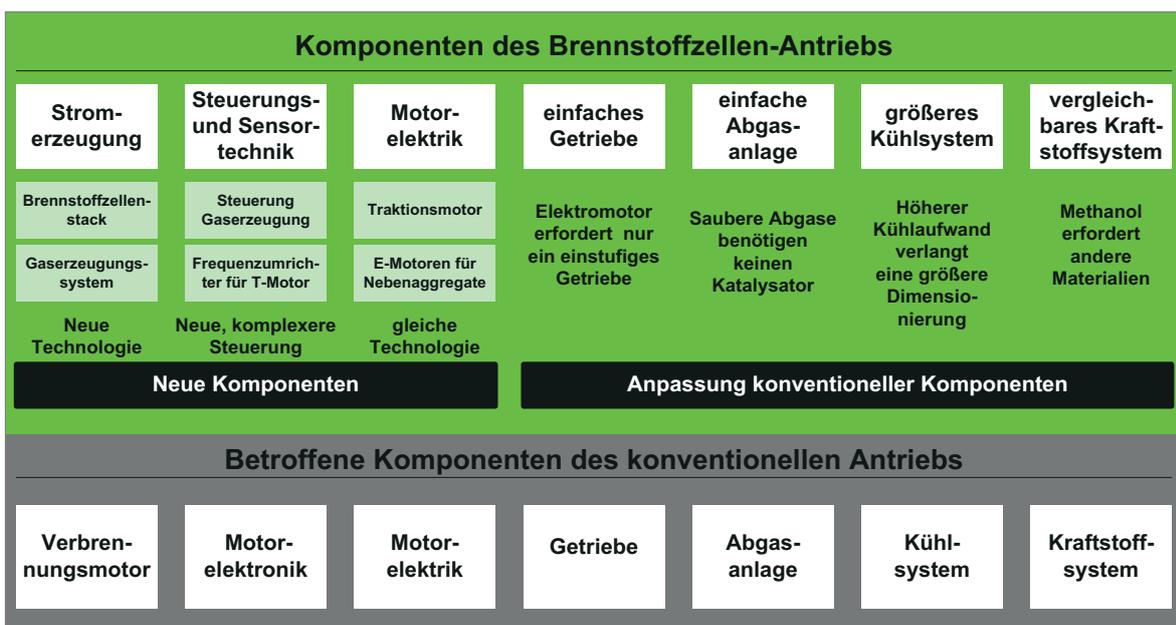


Abb. 4.8: Änderung bei den Komponenten des Antriebsstranges
(Quelle: WENGEL & SCHIRRMESTER 2000)

In Abb. 4.8 werden die Komponenten eines Brennstoffzellenantriebs denen eines Verbrennungsmotors gegenübergestellt. Wichtigste Veränderung beim konventionellen Antriebsstrang ist der Wegfall des Verbrennungsmotors und seiner Elektrik und Elektronik.

Beim Brennstoffzellenantrieb kommen die Brennstoffzelle, der Elektromotor zum Antrieb und Umrichter hinzu. Angepasst werden müssen vor allem der Tank, vom Flüssigkeitstank zum Wasserstoffdrucktank, aber auch Getriebe, Abgasanlage und das Kühlsystem.

4.3.2 Rohstoffinhalt

Der Elektrolyt in der Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEM) besteht aus einer dünnen, sauren Ionenaustauschermembran, die als Protonenleiter wirkt. Üblicherweise werden fluorierte Basispolymere verwendet, die durch den Einbau von Sulfonsäuregruppen ionenleitend gemacht wurden, wie z. B. Nafion. Als Katalysator wird in der Regel kohlegetragertes Platin verwendet. In den letzten Jahren ist es gelungen, die notwendigen Edelmetallgehalte auf ca. 0,5 g Platin pro kW Leistung in PEMs zu senken (MOUGENOT et al. 2011). Das amerikanische Energieministerium (DOE) hat in seinem Hydrogen and Fuel Cells Program Plan einen Zielwert von 0,2 g/kW gesetzt (DOE 2011). Dieser Wert wird von einigen Forschergruppen bereits erreicht (MARTIN et al. 2010). In der Literatur finden sich auch noch geringere Werte; bei Verwendung von dotierten Kohlenstoffnanoröhrchen (*engl.* Carbon Nanotubes, CNTs) könnte zukünftig vielleicht auch vollständig auf Platin verzichtet werden (LE GOFF et al. 2009).

Von Bedeutung sind auch die Peripherie der Brennstoffzelle und ihre Integration in das Fahrzeuggesamt-konzept. Dazu gehören Gebläse oder Verdichter, Systemregelung für Wasserstoff- und Luftversorgung, Sicherheitssensoren u. a. der Traktionsmotor als eine weitere wesentliche Komponente (vergleiche Kapitel 4.2).

Der elektrische Leistungsbedarf von Fahrzeugen nimmt infolge des zunehmenden Einsatzes von Elektromotoren stetig zu. Laufende Entwicklungen deuten auf eine weitere Erhöhung des elektrischen Leistungsbedarfs durch so genannte „by-wire-Lösungen“, auch bei Fahrzeugen mit Verbrennungs-

motoren, hin. Hierbei werden Lenkung (steer-by-wire) bzw. Bremsen (brake-by-wire) durch elektrisch betriebene Aggregate unterstützt. Zur Minimierung der elektrischen Verluste wird eine Erhöhung der Bordnetzspannung erforderlich sein. Brennstoffzellen als „eingebautes“ leistungsfähiges Kraftwerk begünstigen den Einsatz solcher „by-wire-Lösungen“ (WENGEL & SCHIRRMESTER 2000, KAISER et al. 2008).

Tab. 4.7: Spezifischer Platinbedarf beim Brennstoffzellen-Antriebsstrang

| | g pro kW Leistung | |
|--------|-------------------|------|
| | 2013 | 2035 |
| Platin | 0,5 | 0,2 |

4.3.3 Foresight industrielle Nutzung

Nachdem Leistungs- und Kostenziele nicht so schnell erreicht werden konnten wie geplant, entwickelt die Automobilindustrie zurzeit verstärkt Hybridfahrzeuge. Dennoch gab es immer wieder Kleinserien von Brennstoffzellenfahrzeugen, zuletzt kam Anfang 2015 der Mirai als erstes Brennstoffzellen-Serienfahrzeug auf den japanischen Markt. Es ist mit einem 155 PS Elektromotor ausgerüstet, die Höchstgeschwindigkeit liegt bei 180 km/h. Im ersten Jahr der Markteinführung 2015 sollen 2.000 Stück gebaut werden. Seit Herbst 2015 wird der Mirai in Deutschland, den USA und anderen Ländern ausgeliefert. Der Preis von 79.000 € für das 4-türige Fahrzeug und das noch sehr dünne Tankstellennetz für Wasserstoff werden den Absatz bremsen. In den USA bietet Toyota den Mirai mit 57.500 \$ (50.500 € bei einem Wechselkurs von 1,14 \$/€ am 18.02.2015) deutlich günstiger an. Die Reichweite kommt mit 500 km schon sehr nahe an Benzin- und Dieselfahrzeuge heran (FRAHM 2015). Ob und inwieweit Brennstofffahrzeuge zukünftig einen größeren Marktanteil gewinnen können, hängt von vielen Faktoren ab, die zum Teil im Fahrzeugbau (Speicherdichte, Reichweite), aber zum Teil auch in anderen Bereichen liegen (Verhältnis der Kosten von Strom zu Benzin, Entwicklung einer Wasserstoffwirtschaft u. a.).

Szenario für Brennstoffzellenfahrzeuge

Für die Entwicklung des weltweiten PKW-Markts wurden die drei Szenarien des am Fraunhofer ISI erstellten Global Mobility Model GLOMO (KÜHN et al. 2014, SCHADE et al. 2012) übernommen, welche bereits in Kapitel 4.1 beschrieben wurden.

Andere PEM-Brennstoffzellenmärkte

Gemessen an dem automobilen Sektor sind andere Anwendungen von PEM-Brennstoffzellen wie die stationäre Hausenergieversorgung oder die Stromversorgung portabler Geräte zwar ökonomisch und für die Markteinführung von Brennstoffzellen interessant, aber relativ unbedeutend in ihrer installierten Leistung. Deshalb werden sie hier nicht weiter betrachtet.

4.3.4 Foresight Rohstoffbedarf

Ausgehend von der Anzahl der Fahrzeuge in Tab. 4.1 und einer unterstellten Motorleistung von ca. 75 kW ergibt sich eine installierte Leistung von ca. 400 bis 470 GW in Brennstoffzellenfahrzeugen des Jahres 2035. Mit dem Wert von 0,2 g Platin pro kW ergibt sich, je nach Szenario, ein zukünftiger Bedarf von 0 bis 93 t Platin pro Jahr (vergleiche Tab. 4.8). Dies ist ein bedeutender Anteil der heutigen Weltproduktion. Diese offene Schere zwischen Produktion und Bedarf wird von einigen Autoren als zukünftig noch weiter öffnend gesehen, etwa durch strengere Emissionsnormen und Einführung des Dreiwegkatalysators weltweit (SCHADE et al. 2007). Andere sagen langfristig eine Entspannung durch den technischen Fortschritt voraus (DWV 2014).

Die Entwicklung der Komponenten der PEM-Brennstoffzellen ist noch stark im Fluss, wie

Tab. 4.8: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf für Brennstoffzellenfahrzeuge in t (Bedarfsvorschau für drei Szenarien; K: Prävalenz konventioneller PKW, E: Marktdurchdringung E-PKW, M: Mobilitätskonzepte)

| Rohstoff | Produktion 2013 (Bergwerksförderung) | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 | | |
|----------|---|-------------|----------------------|----|----|
| | | | K | E | M |
| Platin | 187 | > 0 | > 0 | 93 | 80 |

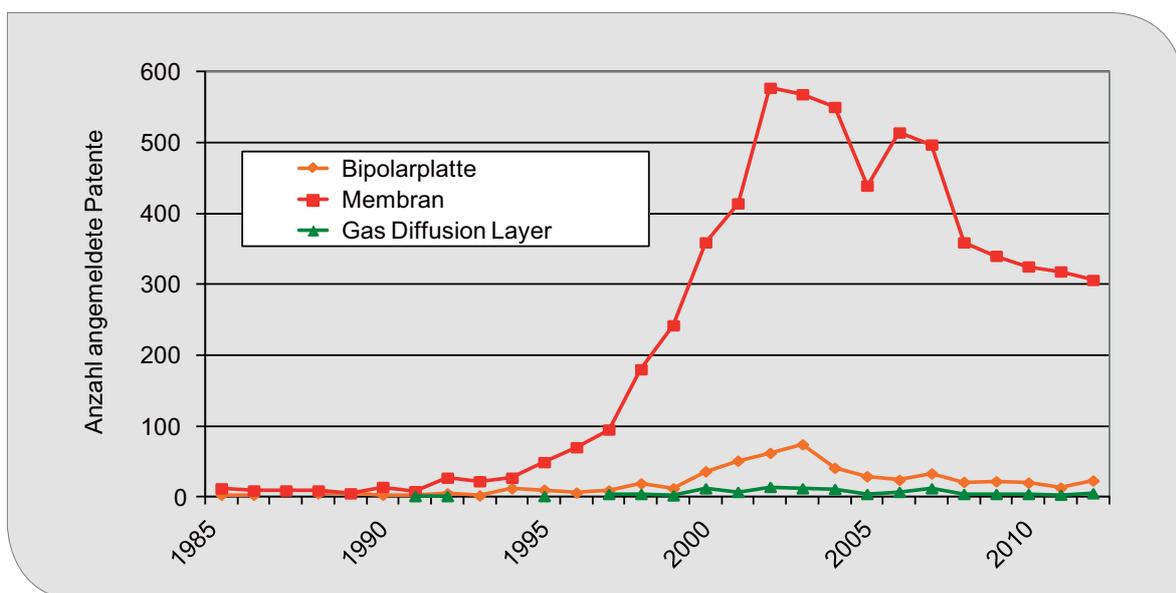


Abb. 4.9: Patententwicklung der Komponenten der PEM-Brennstoffzelle (Quelle: eigene Darstellung)

aus den steigenden Patentanmeldungen weltweit ersichtlich ist (vergleiche Abb. 4.9). Gerade die Kernkomponente Membran wurde stark beforscht (JOCHM et al. 2007), wobei die Patentzahlen in den letzten Jahren zurückgingen. Es ist noch nicht abzusehen, wie weit der Edelmetallgehalt reduziert werden kann bzw. inwieweit binäre oder ternäre Katalysatorsysteme Platin substituieren können.

Auf der anderen Seite ist die weltweite Entwicklung im mobilen Sektor ebenfalls schwierig einzuschätzen, da sich hier Low-Cost-Autos einerseits und Hightech-Fahrzeuge mit elektronischen Fahrer-Assistenz- und Sicherheitssystemen andererseits gegenüber stehen. Bis 2035 ist auch unklar, inwieweit der Übergang vom Mineralöl zu nachwachsenden Kraftstoffen gelingt.

4.3.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Rückgewinnungsraten beim Recycling von Edelmetallen liegen bei heute bekannten Anwendungen seit Jahren bei mehr als 97 % (HASSAN 2001). An den Recyclingverfahren für PEM-Brennstoffzel-

len wird derzeit noch gearbeitet, erste Konzepte liegen aber schon vor (LUCAS & WILTS 2011, IUTA 2007).

4.4 Superkondensatoren für Kraftfahrzeuge

4.4.1 Technologiebeschreibung

Superkondensatoren oder genauer Doppelschichtkondensatoren (EDLC = electro-chemical double layer capacitor), auch Super- oder Ultracapacitors (Supercaps oder Ultracaps) genannt, weisen eine besonders hohe Kapazität und damit eine besonders hohe spezifische Ladungsdichte auf. Diese beruht auf der Dissoziation von Ionen in einem flüssigen Elektrolyt, welche bei Anlegen einer Spannung ein Dielektrikum von wenigen Atomlagen bilden, indem sie sich an die jeweils umgekehrt gepolte Elektrode anlagern, vgl. Abb. 4.10. Wichtig ist dabei eine extrem große Elektrodenfläche, weshalb v.a. Aktivkohle aufgrund seines großen Porenvolumens als Elektrode verwendet wird. Daneben werden auch Kohlenstoff-Aerogele

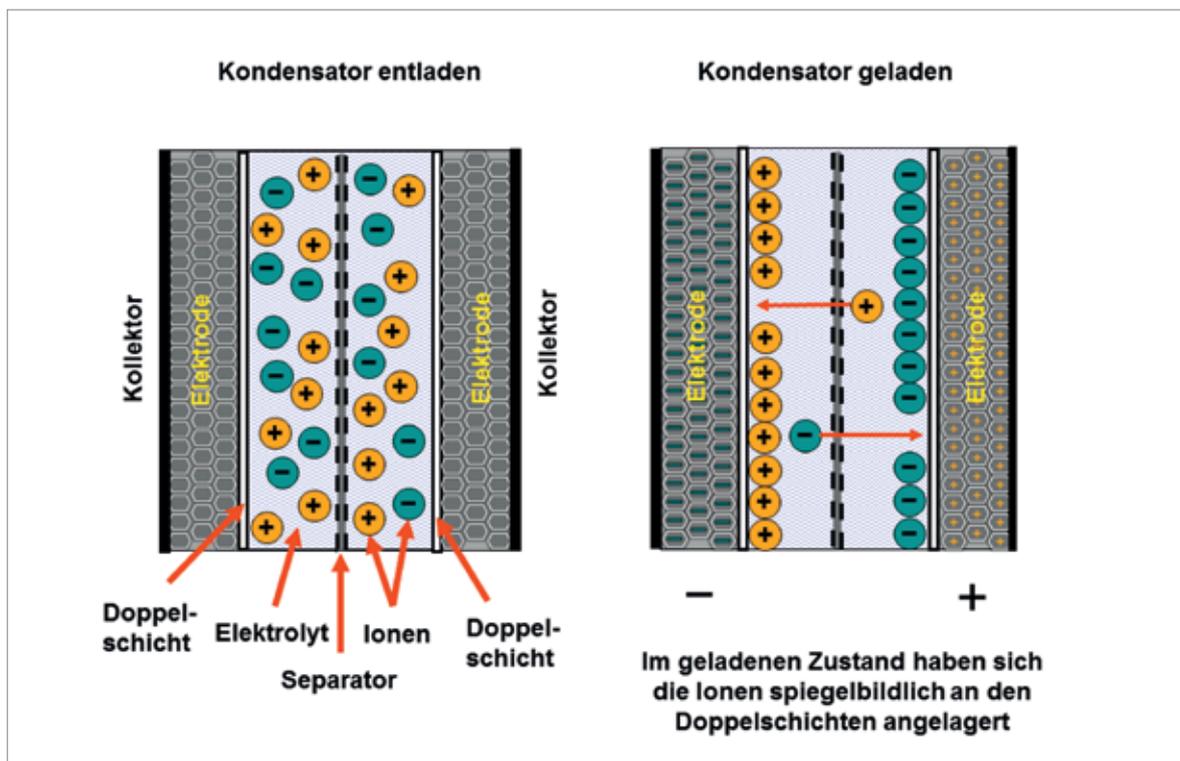


Abb. 4.10: Funktionsprinzip eines elektrischen Doppelschichtkondensators
(Quelle: Elcap, WIKIMEDIA, CC0)



Abb. 4.11: Bauformen von Doppelschichtkondensatoren und Modulen
(Quelle: WIMA)

mit größerer spezifischer Oberfläche eingesetzt (FISCHLE 2005), in den letzten Jahren wurden auch Graphen und Kohlenstoffnanoröhrchen eingesetzt.

Als Elektrolyt dienen zumeist organische Lösungen aus speziellen quaternären Salzen mit einer Dissoziationsspannung von über 2,5 V. Aber auch wässrige Lösungen mit Kalilauge (KOH) oder Schwefelsäure (H_2SO_4) mit einer Dissoziationsspannung von 1,2 V finden Verwendung. Diese Elektrolyte sind im Gegensatz zu konventionellen Kondensatoren ionenleitend, aber nicht elektronenleitend. Auf die Elektroden werden zudem noch Stromkollektoren aufgetragen, in organischen Systemen Aluminium und in wässrigen Titan oder Tantal. Supercaps mit wässrigen Elektrolyten weisen einen deutlich höheren Serienwiderstand und eine geringe Arbeitsspannung auf. Die Trennschicht, die verhindert, dass sich die Elektroden berühren, muss ionendurchlässig sein, wenn der Doppelschichtkondensator wie konventionelle Kondensatoren als Wickel aufgebaut ist. Bei organischen Elektrolyten werden hierzu Kunststoffe wie Polypropylen, Polyester, Polystyrol oder Teflon verwendet. Bei wässrigen Elektrolyten kommen Glasfasern oder Keramiken zum Einsatz. Kapazitäten und Betriebsspannungen lassen sich durch Parallel- bzw. Reihenschaltung mehrerer Zellen vergrößern.

Ein EDLC mit einer spezifischen Kapazität von 100 F hat schon eine Elektrodenoberfläche von etwa 1 km^2 . Der Kondensator selbst ist aber

gerade mal so groß wie ein Fingerhut. Allerdings sind die Dicke des Dielektrikums und die Kapazität umgekehrt proportional zueinander stehende Größen. Die Dicke der Doppelschicht beträgt nur wenige Ångström.

Doppelschichtkondensatoren haben eine längere Lebensdauer durch ihre mögliche Zyklenzahl bis zu 1 Mio. und können sehr schnell entladen und aufgeladen werden. Bei Akkumulatoren und Batterien wäre das nur unter großem Leistungsabfall möglich. Das liegt daran, dass Akkumulatoren und Batterien ihre Energie elektrochemisch speichern, die Supercaps jedoch elektrostatisch. Zwar weisen Supercaps eine geringe Energiedichte auf, sie können aber höhere Leistungen abgeben. Die kurze Lade- und Entladezeit ist in vielen Anwendungen von Vorteil. Der Betrieb von Hochleistungskondensatoren ist nahezu wartungsfrei. Supercaps füllen die Lücke in der Energiedichte zwischen Batteriesystemen und herkömmlichen Kondensatoren, vgl. Abb. 4.12. Durch seine extrem hohe Leistungsdichte kann ein Doppelschichtkondensator vor allem Systeme puffern, die kurzzeitig einen hohen Strom abgeben oder benötigen. Ein Anwendungsbeispiel ist das Bremsen eines Autos: die Bremsenergie kann gespeichert und kurze Zeit später wieder zum Anfahren verwendet werden. Der Einsatz im Personenwagen hängt allerdings stark von den Kosten des Kondensators ab (Kötz et al. 2005).

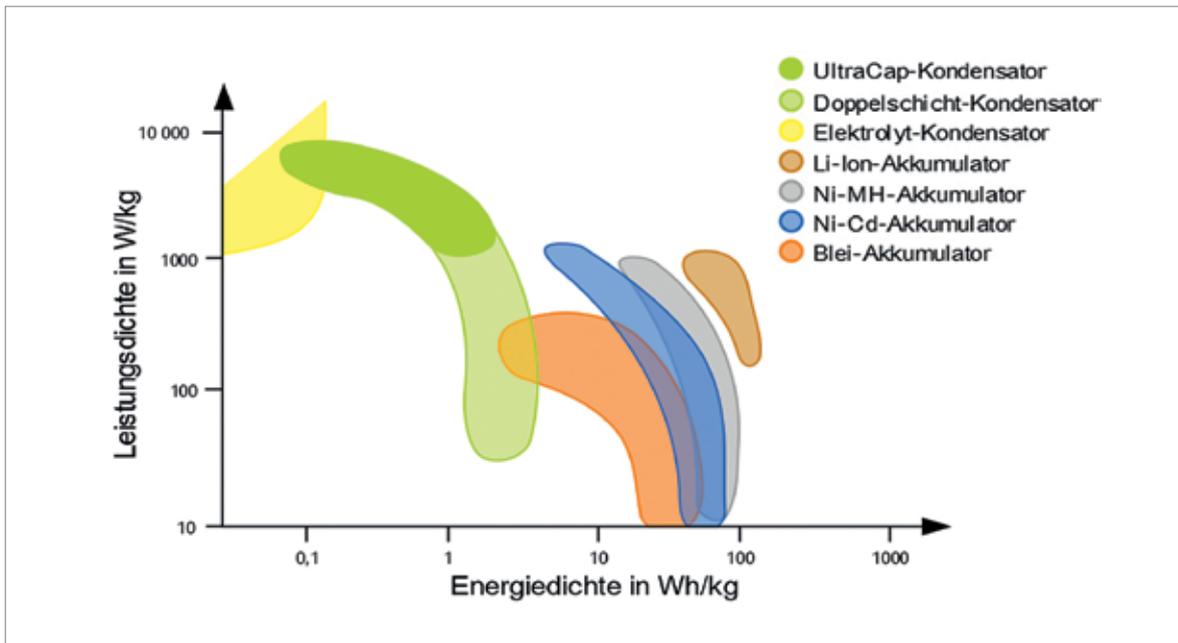


Abb. 4.12: Energie- und Leistungsdichte von Batteriesystemen

(Quelle: MovGP0, Cepheiden, Alex42, WIKIMEDIA, CC BY-SA 2.0 de, verändert)

4.4.2 Rohstoffinhalt

Die kommerziell erhältlichen Doppelschichtkondensatoren (DSK) enthalten vor allem Kohlenstoff in Form von Aktivkohle oder Kohlenstoff-Aerogelen sowie organische Salze (Alkylammoniumsalze). Als organische Lösungsmittel werden z. B. Acetonitril oder Propylencarbonat verwendet. Die Kollektoren bestehen aus Aluminium, das teilweise noch durch Laser versiegelt wird. Als Separator dienen entweder Keramiken, Glasfaserwerkstoffe oder dünnes Gewebe auf Cellulose-Basis.

Für einen Doppelschichtkondensator von 300 F Nennkapazität wird eine Aluminiummenge von ca. 14 g abgeschätzt, entsprechend ca. 50 g/Wh (FISCHLE 2005).

4.4.3 Foresight industrielle Nutzung

In der nahen Zukunft finden DSK mit Kapazitäten über 1.000 F voraussichtlich ihren bevorzugten Einsatz in hybriden 12/42 V Kfz-Bordnetzsystemen. Typische Anwendungen mit einem großen Verhältnis von Kurzzeitleistung zu mittlerer Leistung wie beispielsweise die Servolenkung oder aktive Federungen führen zu zunehmendem elektrischen Leistungsbedarf im Kfz und erfordern

Speicher mit hohen Leistungsdichten (KÖTZ 2002). Hohe Stückzahlen großer Kapazitäten werden mit der breiten Einführung von Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeugen erwartet.

Dazu müssen die Kosten für Supercaps aber weiter gesenkt werden, während die Energie- und Leistungsdaten erhöht werden müssen. Supercaps stehen immer in Konkurrenz zu Batterien, die in der Zukunft auch höhere Leistungsdichten bei deutlich höherer Energiedichte aufweisen werden.

Von 2013 bis zum Jahr 2020 prognostiziert FROST & SULLIVAN (2015a) eine durchschnittliche Wachstumsrate von 10,7 % im Fahrzeugbereich, vgl. Abb. 4.13. Damit ist das Wachstum etwas unter dem Durchschnitt aller Bereiche von 11,3 % (FROST & SULLIVAN 2015a).

4.4.4 Foresight Rohstoffbedarf

Bei Kosten von 2.400–6.000 €/kWh (BULLIS 2011) und einem Weltmarkt im Jahr 2013 von ca. 103 Millionen \$ im Fahrzeugbereich (FROST & SULLIVAN 2015a) und den Angaben aus FISCHLE (2005) ergibt sich ein Aluminiumverbrauch von 2.150 Tonnen für 2013. Unterstellt man, dass sich die Wachstumsrate von 10,7 % bis 2035 nicht abschwächt, ergibt sich

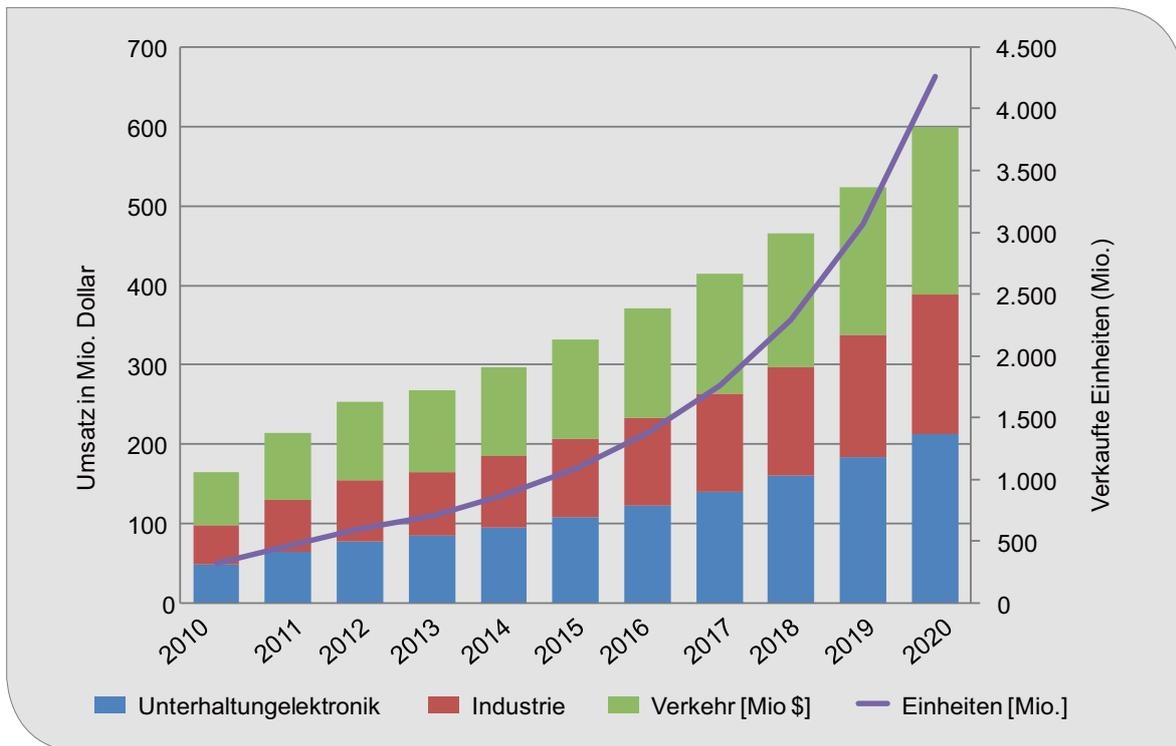


Abb. 4.13: Prognostizierter Umsatz und verkaufte Einheiten an Supercaps
(Quelle: eigene Darstellung nach Angaben in Frost & Sullivan 2015a)

ein Weltmarkt von ca. 1,024 Mrd. \$, woraus sich für 2035 ein potenzieller Aluminiumbedarf von ca. 12.200 t errechnet. Daraus lässt sich abschätzen, dass der Bedarf an Aluminium für Supercaps im Jahr 2035 gegenüber der Weltproduktion 2013 (Tab. 4.9) wahrscheinlich gering sein wird.

zu recyceln, da sie keine giftigen Materialien enthalten.

4.4.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Derzeit findet noch kein Recycling von Aluminium oder Elektrolyten aus Supercaps statt. Es wird angenommen, dass das Recycling ähnlich wie bei Batterien durchgeführt werden kann, für die schon Pilotprozesse existieren (JIANG & PICKERING 2011). Im Vergleich zu Batterien sind Supercaps besser

4.5 Legierungen für den Airframe-Leichtbau

4.5.1 Technologiebeschreibung

Bei der Entwicklung neuer Flugzeugmodelle spielt die Optimierung der für Rumpf, Flügel, Heck und Fahrgestell verwendeten Werkstoffe eine bedeutende Rolle. Grundlegende Voraussetzungen für ein geeignetes Material sind eine hohe Korrosions- sowie Ermüdungsbeständigkeit, Schadenstoleranz, Steifig- und Festigkeit. Besonders wichtig ist die möglichst geringe Dichte des Materials, die

Tab. 4.9: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Bedarf von Aluminium für SuperCaps für Fahrzeuge in t

| Rohstoff | Produktion 2013 (Raffinadeproduktion) | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|-----------|---------------------------------------|-------------|----------------------|
| Aluminium | 47.811.880 | 2.150 | 12.200 |



Abb. 4.14: Innenansicht des Airframes einer Boeing 747
(Quelle: Ignis, CC BY-SA 3.0)

zur Gewichtsreduktion des Flugzeugs und somit zu Treibstoffeinsparungen führt. Aufgrund ihrer Leichtigkeit waren Aluminiumlegierungen jahrzehntelang die dominierenden Werkstoffe im Airframe-Leichtbau. Diese Synopse beschäftigt sich mit aktuellen Materialentwicklungen.

4.5.2 Rohstoffinhalt

Legierungen

Die Zusammensetzung bewährter Aluminiumlegierungen in Flugzeugrahmen ist in Tab. 4.10 zusammengefasst.

Herkömmliche Aluminiumwerkstoffe müssen allerdings genietet werden. Die Zugabe von Scandium führt dazu, dass das Material mit Lasern geschweißt werden kann, was erhebliche Kosteneinsparungen ermöglicht (ANGERER et al. 2009).

Al-Sc-Legierungen waren als Werkstoff für Bleche im Airbus A350 angedacht (ANGERER et al. 2009), wurden dort schlussendlich aber nicht verwendet. Die Firma Airbus Group bietet jedoch produktionsbereite Al-Mg-Sc-Legierungen (SCALMALLOY®) an (AIRBUS GROUP 2015). Daneben liefert die Firma Aleris Al-Mg-Sc-Legierungen, mit denen im Vergleich zur herkömmlichen Al-Cu-Legierungen bis zu 5 % Gewichtseinsparungen erzielt werden können (ALUMINIUM-MESSE 2014, AIRWISE 2013). Die gewichtssparenden Bauteile können ohne Änderungen an der Konstruktion in bestehende Baureihen eingefügt werden (Aluminium-Messe 2014, AIRWISE 2013). Al-Sc-Legierungen mit einem Anteil von 0,1–0,5 % Sc wurden beim Bau russischer Militärflugzeuge eingesetzt (AHMAD 2003). Al-Sc-Legierungen werden außerhalb der Luftfahrtindustrie in Sportgeräten (Fahrräder, Baseballschläger, etc.) verwendet (AHMAD 2003, USGS 2014a) und sind potentielle Werkstoffe für den 3D-Druck (PUTNAM 2014).

Tab. 4.10: Zusammensetzung herkömmlicher Aluminiumlegierungen im Airframe-Leichtbau nach Woidasky & Jeanvré (2015) (Angaben in %)

| Al | Cu | Fe | Mg | Mn | Si | Zn |
|-------|---------|-----------|---------|-----------|-----------|-----------|
| 89–93 | 1,6–4,4 | < 0,2–0,7 | 0,5–2,8 | < 0,1–0,8 | < 0,1–0,8 | < 0,2–6,8 |

Titanlegierungen ähneln den Al-Sc-Legierungen in Festigkeit und Dichte, wobei sie etwas leichter, dafür aber auch etwas fester sind. Sie werden aufgrund der geringeren Kosten deutlich häufiger als Al-Sc-Legierungen in der zivilen Luftfahrt eingesetzt (SCHWARZ et al. 2004).

Darüber hinaus gewinnen neue Generationen von Aluminium-Lithium-Legierungen an Bedeutung für den Flugzeugrahmenbau. Gegenüber herkömmlichen Al-Legierungen haben diese Al-Li-Legierungen zum einen eine geringere Dichte und zum anderen verbesserte Materialeigenschaften, die ein Neudesign der Bauteile mit geringerem Materialeinsatz ermöglichen. Beides führt insgesamt zu einer Gewichtsreduktion von „mindestens 9 %“ (MIROVSKY et al. 2014) „bis 25 %“ (ALUMINIUM-MESSE 2014, CONSTELLIUM 2013). Der Hersteller Constellium liefert seine Al-Li-Legierungen („Airware“) an Airbus, Boeing und Bombardier, zum Beispiel für den Airbus A350-XWB und die Bombardier CSeries (ALUMINIUM-MESSE 2014, CONSTELLIUM 2013). Die Al-Li-Legierungen können zu 100 % recycelt werden (CONSTELLIUM 2013). Al-Li-Legierungen können grundsätzlich auch Scandium enthalten, beim Anbieter CONSTELLIUM ist Scandium laut Sicherheitsdatenblättern jedoch kein Bestandteil. Über die in Tab. 4.10 genannten üblichen Legierungselemente hinaus können Al-Li-Legierungen außerdem Zirkon und Silber enthalten.

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK)

Hochleistungs-Al-Legierungen bleiben weiterhin ein wichtiger Bestandteil im zivilen Flugzeugrahmenbau, verlieren aber ihre eindeutige Dominanz durch die vermehrt eingesetzten Verbundwerkstoffe, wobei es sich hauptsächlich um kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe handelt (DURSUN & SOUTIS 2014). Diese Kompositmaterialien sind mit ca. 50 Gewichtsprozent (AIRWISE 2013) bereits Hauptbestandteile der Großraumflugzeuge Boeing 787, Dreamliner (Erstflug: 2009) und Airbus A350 (Erstflug: 2013). Al-Legierungen machen nur noch 20 Gew.-%, Titanlegierungen 15 Gew.-% aus. Das vor dem A350 fertig gestellte Airbus-Modell A380 (Erstflug: 2005) besteht noch zu 25 Gew.-% aus Verbundwerkstoffen, wovon 85 Gew.-% CFKs sind (WOIDASKY & JEANVRÉ 2015). Abb. 4.15 zeigt die Entwicklung der Materialzusammensetzung am Beispiel einiger Flugzeugmodelle von Boeing.

Die kleineren, deutlich häufiger verkauften Schmalrumpf-Flugzeuge („Single Aisle“) bestehen allerdings immer noch hauptsächlich aus Al-Legierungen (AIRWISE 2013). Insgesamt haben Aluminiumlegierungen daher einen Anteil von 70 % am Strukturgewicht der derzeit verkauften Flugzeuge (AIRWISE 2013).

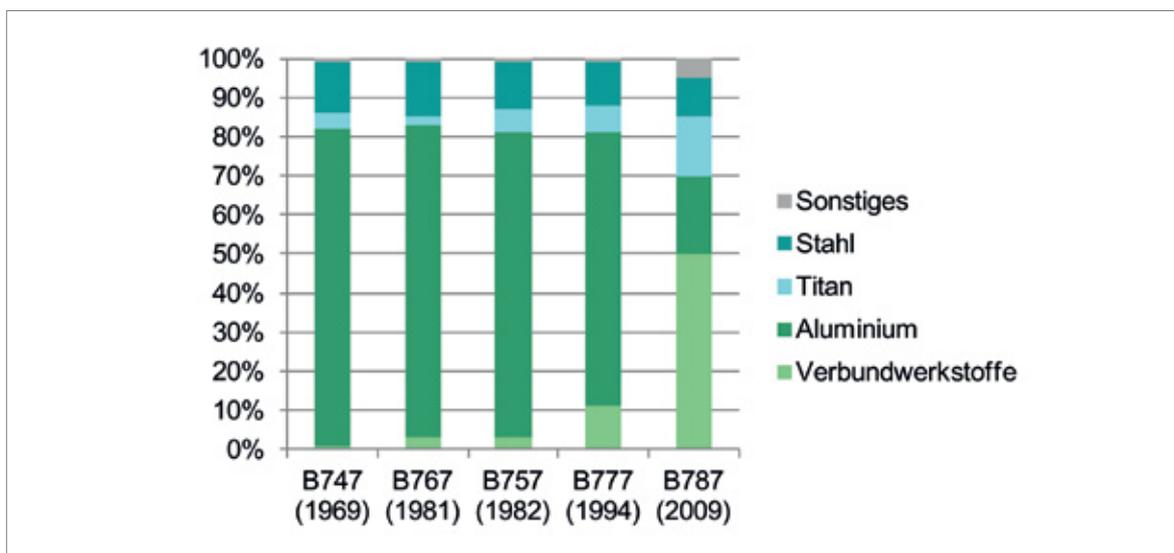


Abb. 4.15 Entwicklung des Anteils (Gewichtsprozent) verschiedener Werkstoffe an Flugzeugtypen von Boeing basierend auf Zahlen aus WOIDASKY & JEANVRÉ (2015); in Klammern ist das Jahr des Erstflugs angegeben.

4.5.3 Foresight industrielle Nutzung

Die drei Flugzeughersteller Bombardier, Boeing und Airbus gehen in ihren Wachstumsprognosen davon aus, dass sie 2033/2034 mehr als doppelt so viele Flugzeuge im Einsatz haben werden als heute (AIRBUS 2014, BOEING 2015, BOMBARDIER 2015). Dabei sind die kleineren Schmalrumpf-Flugzeuge der stärkste Wachstumsmarkt und machen sowohl bei Airbus als auch bei Boeing ca. 70 % der in den nächsten 20 Jahren verkauften Flugzeuge aus, während Bombardier ausschließlich kleinere Flugzeugtypen produziert.

4.5.4 Foresight Rohstoffbedarf

Bis 2035 werden laut Experteneinschätzung Großraumflugzeuge aus einer Kombination von Metalllegierungen und kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen gebaut werden. Kleinere Flugzeuge werden nach und nach auf diese Technologie umgestellt. Aufgrund des Branchenwachstums wird der Bedarf an Aluminium für die zivile Luftfahrt zwischen 2010 und 2020 trotz der allmählichen Umstellung um 2,4 % pro Jahr steigen (AIRWISE 2013). Innerhalb der Aluminiumlegierungen erscheint es momentan wahrscheinlich, dass scandiumhaltige Legierungen kurz- und mittelfristig beim Bau neuer Flugzeuge bestehender Serien Verwendung finden werden, da hierbei keine Neukonstruktion erforderlich ist. Bei der Planung neuer Bautypserien werden wahrscheinlich Al-Li-Legierungen durch die ermöglichten Gewichtseinsparungen favorisiert werden, so dass sie langfristig zur wichtigsten Al-Legierung im Flugzeugbau werden könnten.

Der genaue Anteil Li in den Legierungen ist in der Regel Betriebsgeheimnis. Um eine ungefähre Größenordnung des Lithiumbedarfs für Al-Li-Legierungen im Flugzeugrahmenbau zu ermitteln, gehen wir hier vereinfacht davon aus, dass alle 2035 ein-

gesetzten Al-Legierungen 2 % Lithium enthalten. Ebenfalls wird ein Anteil von 0,5 % Ag angenommen. Die Zahlen orientieren sich an Angaben in Sicherheitsdatenblättern des Herstellers Constellium.

Im Szenario „Dominanz Al-Legierungen“ nehmen wir an, dass die Aluminiumlegierungen ihre heutige Dominanz von ca. 70 % Materialanteil im Airframe-Bau bis 2035 halten. Hier bestehen Schmalrumpfflugzeuge 2035 noch immer zu 80 % aus Aluminiumlegierungen, Großraumflugzeuge zu 20 %. Das Szenario „Dominanz Verbundwerkstoffe“ geht hingegen davon aus, dass Al-Legierungen von CFK-Kompositen verdrängt werden. Hier werden 2035 Schmalrumpfflugzeuge wie die heutigen Großraumflugzeuge zu 20 % aus Al-Legierungen gefertigt, Großraumflugzeuge zu 10 %. Beiden Szenarien liegen Durchschnittswerte der Leergewichte verschiedener heutiger Bautypen (PALT 2015) zu Grunde. Die jährlichen Neuzulassungen 2035 wurden aus den nach Bautypen aufgeschlüsselten Wachstumsprognosen der drei Hersteller Bombardier, Boeing und Airbus abgeschätzt (AIRBUS 2014, BOEING 2015, BOMBARDIER 2015).

Im Szenario „Dominanz Al-Legierungen“ ergibt sich ein Bedarf von 4.650 t Lithium und 160 t Silber, im Szenario „Dominanz Verbundwerkstoffe“ sind es 1.350 t Lithium und 34 t Silber. Dies entspricht 16 % bzw. 5 % der weltweiten Lithiumproduktion 2013, sowie weniger als 1 % der weltweiten Silberproduktion (Tab. 4.11), so dass nicht von einer deutlichen Steigerung des Li-Bedarfs bzw. Ag-Bedarfs durch Leichtbaulegierungen für Flugzeuge auszugehen ist. Für alle weiteren Legierungselemente (s. Rohstoffinhalt) erwarten wir keine kritischen Bedarfsimpulse ausgehend vom Airframe-Leichtbau, da Aluminiumlegierungen in diesem Bereich etabliert sind. Für einen gemäßigten Bedarfszuwachs spricht das allgemeine Wachstum der Branche von ca. 3,6 % (AIRBUS

Tab. 4.11 Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf für Airframe-Leichtbau-Legierungen in t

| Rohstoff | Produktion 2013 (Bergwerksförderung) | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|----------|---|-------------|----------------------|
| Lithium | 29.759 | gering | ca. 1.350–4.650 |
| Silber | 26.241 | gering | ca. 34–160 |

2014, BOEING 2015, BOMBARDIER 2015), für einen Bedarfsrückgang hingegen die starke Konkurrenz zu Verbundwerkstoffen.

4.5.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Während Aluminiumlegierungen bereits sehr gut recycelt werden können, befindet sich das Recycling von CFK-Verbundstoffen noch in der Entwicklung. CFKs werden erst ab 2030 in großer Masse zum Recycling anfallen, da die Lebensdauer ziviler Verkehrsflugzeuge durchschnittlich 26 Jahre beträgt (WOIDASKY & JEANVRÉ 2015). Allerdings fallen bereits heute Produktionsabfälle an. Derzeit werden 15 % der Komponenten ausgemusterter Flugzeuge wiederverwendet, was 90–95 % des Gesamtgewinns aus der Verwertung entspricht (WOIDASKY & JEANVRÉ 2015). 50–60 % werden recycelt, woraus sich allerdings nur 10 % des Gesamtertrags ergeben. Die verbleibenden 25–35 % werden entsorgt, was den Gesamtgewinn um 10–15 % reduziert.

4.6 Automatisches Pilotieren von Straßenfahrzeugen

4.6.1 Technologiebeschreibung

Für das automatische Führen von Fahrzeugen wird auch der Begriff „Autonomes Fahren“ verwendet. Man versteht darunter die teil- oder vollautomatische Bewegung von Fahrzeugen im realen Straßenverkehr. Dies schließt die Spurführung des Fahrzeugs und die situationsbedingte Wahl einer sicheren Geschwindigkeit ein. In komplexen Verkehrssituationen, wie sie das Pilotieren über belebte innerstädtische Kreuzungen darstellen kann, ist dies eine große Herausforderung für die im Fahrzeug verbauten technischen Steuer- und Regelsysteme, die nur allmählich und in Stufen bewältigt werden kann. Die Fahrzeughersteller haben sich in Absprache mit dem VDA-Arbeitskreis „Automatisches Fahren“ und der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) auf folgende Stufen des autonomen Fahrens geeinigt:

Teilautomatisches Fahren: Dabei überwacht der Fahrer die automatisierten Funktionen ständig und geht keiner fahrfremden Tätigkeit nach. Dies

schließt die heute serienmäßig erhältlichen Assistenzsysteme ein, darunter Abstandsregeltempomat, Spurhalteassistent, Kreuzungsassistent, Bremsassistent, Nachtsichtassistent, Parkassistent und andere.

Hochautomatisiertes Fahren: Die Assistenzsysteme führen das Fahrzeug in bestimmten (weniger komplexen) Verkehrssituationen, erkennen ihre Grenzen selbst und fordern den Fahrer zur Übernahme auf. In diesem Modus kann sich der Fahrer begrenzt fahrfremden Tätigkeiten widmen, er muss aber ständig bereit sein, die Führung zu übernehmen. Solche Systeme werden erprobt, sind aber in Serienfahrzeugen noch nicht verfügbar.

Vollautomatisches Fahren: In diesem Modus führen die Assistenzsysteme das Fahrzeug in allen Verkehrssituationen automatisch (autonom). Die Überwachung durch den Fahrer ist entbehrlich, er kann sich fahrfremden Tätigkeiten widmen. Auch die fahrerlose Bewegung des Fahrzeugs durch den Verkehr ist in dieser Stufe möglich. Sie bildet die Endstufe der Entwicklungsanstrengungen der Automobilindustrie zum autonomen Fahren.

Assistenzsysteme für PKW haben eine lange Tradition. Sie begann in den 1950er Jahren mit der serienmäßigen Einführung von Bremskraftverstärker und Servolenkung. 1958 bot Chrysler erstmals einen Tempomat in einem Serienfahrzeug an. Seit 1985 ist das Antiblockiersystem (ABS) und daraus abgeleitet die Antischlupfregelung (ASR) und der automatisch schaltende Allradantrieb in Serienfahrzeugen erhältlich. 1987 brachte Toyota das erste GPS-geführte Navigationssystem auf den Markt und seit 1995 ist die elektronische Stabilitätskontrolle (ESP) verfügbar. Heute sind in Neufahrzeugen bis zu 100 Steuergeräte verbaut (Audi 2015), neben der Motorregelung vor allem für Assistenzsysteme.

Die Innovationsgeschwindigkeit bei Assistenzsystemen hat sich in den letzten Jahren dramatisch beschleunigt. Und nicht nur die Automobilindustrie, auch IT-Konzerne wie Google und Apple sind auf dem Entwicklungsfeld aktiv. Autonome Fahrzeuge von Google sind in der Zwischenzeit nicht nur auf Autobahnen unterwegs, sondern haben auch auf Landstraßen und in der Stadt um die 160.000 km zurückgelegt (SPIEGEL 2014). Motivation für den Einstieg der IT-Konzerne ist, so wird vermutet,

die Gewinnung wertvoller Nutzerprofile. Auch in der Automobilindustrie selbst herrscht Euphorie. Sie äußert sich in Statements wie „Die Branche steht in den nächsten Jahren vor einem der größten Umbrüche seit Bestehen des Automobils“ (WINTERKORN in STERN 2015a), oder „Es geht um nicht weniger als die zweite Erfindung des Auto-

mobils“ (Zetsche in DER SPIEGEL 2014). Getrieben wird diese Entwicklung durch die immer leistungsfähiger werdende Computertechnologie, die Miniaturisierung von Prozessoren, Sensoren und Aktuatoren sowie den fallenden Preisen solcher Komponenten.

Tab. 4.12: Fahrerunterstützungs- und Assistenzsysteme
(Quelle: eigene Recherchen)

| | System | Entwicklungsstand |
|-----|--|--------------------------|
| 1. | Bremskraftverstärker (Servobremse) | Im Markt seit den 1950er |
| 2. | Servolenkung | Markteinführung 1951 |
| 3. | Tempomat | Markteinführung 1958 |
| 4. | ABS | Markteinführung 1985 |
| 5. | Antischlupfregelung (ASR) | Markteinführung 1985 |
| 6. | Automatisch schaltender Vierradantrieb | Markteinführung 1985 |
| 7. | GPS-Navigation | Markteinführung 1987 |
| 8. | ESP | Markteinführung 1995 |
| 9. | Abstandsregeltempomat (ACC) | Im Markt |
| 10. | Anfahrhilfe für Steigungen | Im Markt |
| 11. | Einparkhilfe | Im Markt |
| 12. | Fahreraufmerksamkeitsassistent | Im Markt |
| 13. | Fernlichtassistent | Im Markt |
| 14. | Fußgängerschutzsystem | Im Markt |
| 15. | IR-Wärmebildkamera für Nachtfahrten (night vision) | Im Markt |
| 16. | Kurvenlichtassistent | Im Markt |
| 17. | Notbremsassistent (collision avoidance system) | Im Markt |
| 18. | Reifendruckkontrolle | Im Markt |
| 19. | Rückfahrkamera | Im Markt |
| 20. | Seitenwindassistent | Im Markt |
| 21. | Sicherheitsgurtstraffer | Im Markt |
| 22. | Spurhalteassistent | Im Markt |
| 23. | Spurwechselassistent | Im Markt |
| 24. | Teilautomatisches Fahren | Im Markt |
| 25. | Telefonassistent | Im Markt |
| 26. | Totwinkelassistent | Im Markt |
| 27. | Verkehrszeichenerkennung | Im Markt |
| 28. | Warnassistent bei Falschfahrt | Im Markt |
| 29. | Unfallassistent (Positionsmeldung u. a.) | In Entwicklung |
| 30. | Elektronische Deichsel für Lkw | In Entwicklung |
| 31. | Ferngesteuertes automatisches Parken | In Entwicklung |
| 32. | Intelligent speed limit adaptation | In Entwicklung |
| 33. | Automatischer Kreuzungsassistent | In Entwicklung |
| 34. | Hochautomatisches Fahren | In Entwicklung |
| 35. | Vollautomatisches und fahrerloses Fahren | Fernziel |

In Tab. 4.12 sind beispielhaft Assistenzsysteme zusammengestellt und nach Entwicklungsstand gruppiert. Die Übersicht zeigt die technologische Vielfalt an Unterstützungsfunktionen, erhebt aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es werden Einzelsysteme aufgeführt und Cluster, die mehrere Einzelsysteme bündeln wie bei „Teilautomatisches Fahren“. „Im Markt“ heißt, dass das System als Ausrüstung von Serienfahrzeugen bei den Fahrzeugherstellern geordert werden kann.

Assistenzsysteme sind auf leistungsfähige Sensoren angewiesen, die valide Informationen über das Fahrzeugumfeld bereitstellen. Sie werden gegenwärtig durch optische Kameras im sichtbaren und IR-Lichtwellenspektrum, durch Ultraschallsensoren und durch Radarsensoren gewonnen. Abb. 4.16 zeigt die Sensorausstattung eines Serienfahrzeugs der Mittelklasse. Eine Komponente, die in Serienfahrzeugen heute noch fehlt, ist der Laserscanner. Der Laserscanner ist technisch ein LiDAR (Light Detection And Ranging), der mit Hilfe von monochromatischer Laserstrahlung auf optischem Weg Entfernung und Geschwindigkeit im Nah- und Fernbereich messen kann.

Der Auswerteprozessor des LiDAR errechnet aus dem Vergleich der ausgesandten und reflektierten Laserstrahlung ein zentimetergenaues Abbild der Fahrzeugumgebung.

Laserscanner sind leistungsfähige, aber heute noch sehr teure Komponenten. Das erste autonome Versuchsfahrzeug von Google ist mit dem High Definition LiDAR HDL-64E der kalifornischen Firma Velodyne Lidar, Inc. ausgestattet. Es hat eine maximale Reichweite von 120 m, misst mit einer Genauigkeit von unter 2 cm und kostet 70.000 \$. Die geometrischen Abmessungen sind nicht geeignet für Serienfahrzeuge. Abb. 4.17 zeigt ein selbstfahrendes Versuchsfahrzeug von Google mit dem sperrigen Laserscanner am Dach.

Velodyne hat die Zeichen der Zeit erkannt und ist dabei, kompakte und kostengünstige mobile Laserscanner zu entwickeln. Abb. 4.18 gibt das gegenwärtige LiDAR-Angebot des Unternehmens für mobile Anwendungen wider.

Konventionelle LiDARs arbeiten mit einem Laser. Der erzeugte Laserstrahl wird dann über oszillie-

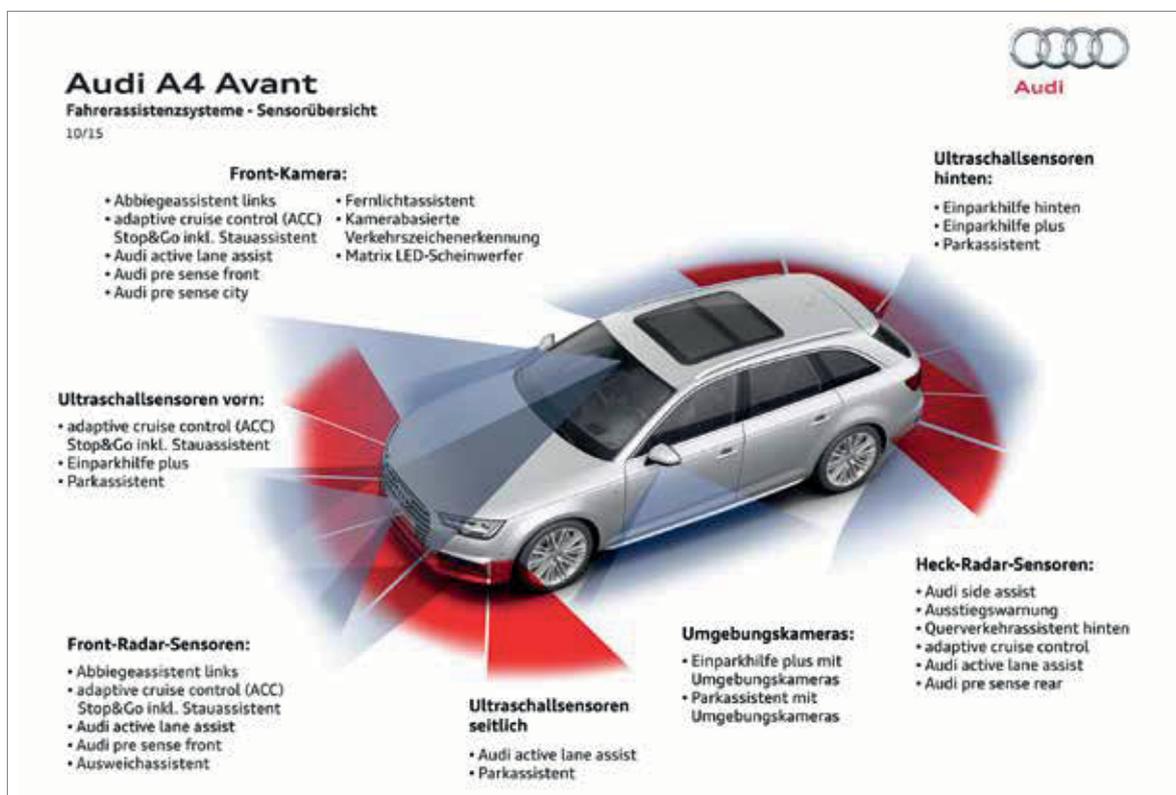


Abb. 4.16: Sensoren eines Serienfahrzeugs für die Gewinnung von Informationen über das Fahrzeugumfeld (Quelle: Audi AG)



Abb. 4.17: Selbstfahrendes Auto von Google
(Quelle: Michael Shick, WIKIMEDIA,
CC BY-SA 4.0)

rende Drehspiegel auf die Messfläche gelenkt. Das Velodyne-LiDAR HDL-64E verzichtet auf Drehspiegel, sondern ist mit 64 Lasern ausgerüstet, die einen vertikalen Strahlenfächer erzeugen. Durch die Rotation des Laserkopfes, die zwischen 300 und 900 U/min eingestellt werden kann, wird das 360°-Sichtfeld abgetastet. Verwendet werden Laser der Klasse 1 mit einer Strahlleistung von unter 1 mW, die für das menschliche Auge ungefährlich ist. Der Laser arbeitet auf der Wellenlänge 905 nm im unsichtbaren Infrarot (VELODYNE 2010). Es könnte sich um einen InGaAs-Laser handeln, dessen stoffliche Zusammensetzung und Geometrie nicht bekannt sind.

Das kompakte Velodyne VDL-16 Lidar Puck arbeitet mit 16 Lasern. Es weist die in Tab. 4.13 dargestellten Eigenschaften auf (VELODYNE 2015).

Tab. 4.13: Eigenschaften des Velodyne VDL-16 Lidar Puck
(Quelle: Velodyne 2015)

| Geometrische Abmessungen | 100 mm Durchmesser, 65 mm Höhe |
|--------------------------|---------------------------------|
| Gewicht | 600 g |
| Leistungsaufnahme | < 10 W |
| Messbereich | ~ 11 ¹ – 100 m |
| Genauigkeit | im Zentimeter Bereich |
| Sichtfeld horizontal | 360 ° |
| Sichtfeld vertikal | 30 ° (15 ° nach oben und unten) |
| Preis | 7.999 \$ |



Abb. 4.18: Mobile LiDAR-Geräte der Firma Velodyne, Inc., links: Gerät LiDAR HDL-64E (genutzt im selbstfahrenden Google Fahrzeug), Mitte: Gerät HDL-32E, rechts: VDL-16, auch „Puck“ genannt neu und kompakt
(Quelle: Velodyne, Inc.)

Während bei den HDL-Scannern der Lidarkopf rotiert, besitzt der Puck keine äußeren rotierenden Teile. Die geometrischen Abmessungen und technischen Daten der Entwicklung kommen bereits in die Nähe der Anforderungen für Anwendungen bei Straßenfahrzeugen. Allerdings schließt der Preis trotz der massiven Ermäßigung die Nutzung in Serienfahrzeugen aus. Bei entsprechender Nachfrage, die den Aufbau einer Serienfertigung ermöglicht, sieht Velodyne Spielräume für nicht näher spezifizierte weitere Preissenkungen (HIGGINS 2014).

BMW hat auf der Consumer Electronics Show 2015 in Las Vegas ein Forschungsfahrzeug auf Basis des i3 vorgeführt, das auf bekannten Parkdeckgeometrien ohne Fahrer automatisch einparkt. Der Einparkvorgang wird von einem Smartphone ausgelöst. Das Fahrzeug sucht sich selbsttätig eine Parklücke und navigiert in diese hinein. Die Rückholung erfolgt analog. Das Forschungsfahrzeug ist mit vier Laserscannern ausgestattet (PRIEMER 2015).

¹ Information nicht verfügbar. Die Auswerteelektronik des HDL-64E ignoriert Laufzeiten der Laserstrahlung von Objekten, die weniger als die 3 ft (91 cm) entfernt sind (VELODYNE o. J.)

4.6.2 Rohstoffinhalt

Das LiDAR von **Laserscannern** arbeitet mit Festkörper- oder Halbleiterlasern. Kommerziell weit verbreitet sind mit Neodym dotierte YAG-Laser (Nd:YAG-Laser). Dieser Festkörper-Laser nutzt als Wirtsmaterial einen transparenten Yttrium-Aluminium-Granat-Einkristall ($Y_3Al_5O_{12}$). Das aktive Material ist Neodym, das etwa ein Atomprozent von Yttrium ersetzt. Bei der Dotierung werden Y^{3+} -Ionen durch Nd^{3+} -Ionen ersetzt. Die energetisch dominierende Laserstrahlung des Nd:YAG-Kristalls liegt im Infrarotbereich und hat eine Wellenlänge von 1064 nm, die durch Frequenzverdoppelung auf 532 nm gebracht werden kann. 532 nm werden vom Auge als grünliches Licht wahrgenommen. Für das Pumpen werden Gallium-Arsenid-Laserdioden eingesetzt, die Licht der Wellenlänge 808 nm in den YAG-Kristall einstrahlen. Außerdem sind Peltierelemente, beispielsweise Bismutellurid (Bi_2Te_3), auf dem Pumplaser und dem YAG-Kristall zur Temperaturstabilisierung vorhanden. Die Feinabstimmung der Frequenz erfolgt piezokeramisch, indem der YAG-Kristall einer mechanischen Spannung ausgesetzt wird. Als Piezokeramik wird beispielsweise Blei-Zirkonat-Titanat ($Pb[Zr_xTi_{1-x}]O_3$, $0 \leq x \leq 1$) genutzt. Zur Frequenzverdoppelung eignet sich das Mineral Kalium-Titanoxid-Phosphat mit der Summenformel $KTiOPO_4$ (EICHENSEER 2003).

Radarsensoren für die Abstandsmessung, beispielsweise für Parkassistenten, lassen sich heute hoch integriert bauen. Ein Konsortium aus KIT, der Robert Bosch GmbH und anderen Partnern hat einen miniaturisierten Radarsensor entwickelt, der in Serie zu Kosten unter einem Euro gefertigt werden soll. Die Hochfrequenzkomponenten, die Sende- und Empfangsantennen und die Auswertelektronik sind auf einem SiGe-Chip von 8 mm x 8 mm untergebracht. Der Sensor arbeitet mit elektromagnetischen Wellen der Frequenz von 122 GHz. Der Abstand von Objekten in einigen Metern Entfernung lässt sich nach Aussage der Entwickler mit einer Genauigkeit von unter 1 mm bestimmen (KIT 2012).

Ultraschallsensoren für die Abstandsmessung nutzen piezoelektrische Keramiken oder piezoelektrische Kunststoffe für die Schallerzeugung und -detektion. Dabei wird das piezoelektrische Material durch Wechsellspannung zum Schwingen gebracht (Piezolausprecher). Das umgekehrte

Prinzip wird für die Detektion der reflektierten Welle genutzt. Die eingehende Welle trifft auf piezoaktives Material. Die übertragene Schwingung erzeugt elektrische Signale, die von der Auswertelektronik interpretiert werden.

Bildgebende **IR-Nachtsichtgeräte** für die Detektion von weiter entfernten Hindernissen bei Nachtfahrten benötigen vor allem Germanium als infrarotdurchlässiges optisches Material und Vanadiumoxide für die Absorption der einfallenden IR-Strahlung (ANGERER et al. 2009). Die bei der IR-Absorption entstehenden elektrischen Signale werden elektronisch ausgewertet. Die bildgebende Elektronik erstellt daraus ein Abbild der ausgeleuchteten Fahrbahn.

Neben den aktiven Halbleitermaterialien der verschiedenen Sensoren werden für die elektronischen Schaltungen Kupfer, Lötzinn, Gold als Kontaktmaterial, Platinen als Schaltungsträger und eine Vielzahl passiver Bauelemente wie ohmsche und induktive Widerstände sowie Kondensatoren verbaut. Die benötigten Stoffmengen für die elektronischen Bauteile und ihre Sensoren sind jedoch weit von kritischen Werten entfernt.

4.6.3 Foresight industrielle Nutzung

Es wurde schon erwähnt, dass die Ausstattung von Straßenfahrzeugen mit Assistenzsystemen gegenwärtig ein hoch dynamisches Innovationsfeld ist. Während in den 40er-Jahren, zwischen Mitte der 50er- und Mitte der 90er-Jahre des letzten Jahrhunderts alle fünf Jahre ein neues Assistenzsystem auf den Markt kam, steigerte sich dies in den 20 Jahren seit 1995 auf ein neues System pro Jahr (Tab. 4.12). In der Zwischenzeit ist das halbautomatische Autofahren im Straßenverkehr Realität geworden. Forschungsfahrzeuge bewältigen bestimmte Strecken und Fahrsituationen sogar schon hochautomatisch.

Bei einer Befragung von Mitgliedern des VDI gaben 100 % an, dass das hochautomatische Fahren auf Autobahnen bis 2035 flächendeckend Realität sein wird, 23 % glauben sogar, dass es schon 2025 soweit ist (VDI 2014). Jürgen Lehold, der Leiter der Konzernforschung bei Volkswagen, verspricht in der Ausgabe des STERN vom 19. Februar 2015: „Irgendwann im nächsten Jahrzehnt sei ein (*hochautomatischer*, Anm. d. Verf.) Autobahn-

pilot in jedem Golf zu haben. Zu erschwinglichen Preisen von wenigen Tausend Euro im Paket mit anderen Assistenzsystemen“ (STERN 2015b).

Der Schritt zum vollautomatischen Fahren scheint dann nicht mehr weit. Aber Martin Winterkorn, Chef von Volkswagen, warnt im STERN vom 26. Februar 2015 bei der Frage „Wo werden wir Roboterautos zuerst sehen?“: „Auf Autobahnen oder im Parkhaus. Schwieriger wird es in München vollautomatisch den belebten Stachus zu überqueren. Da werden wir in den nächsten zehn Jahren keine autonomen Fahrzeuge auf die Menschheit loslassen können“ (STERN 2015a).

Und Ralf Guido Herrtwich, Leiter Fahrassistenz- und Fahrwerksysteme in Konzernforschung und Vorentwicklung bei Daimler, erklärt in einer Pressemitteilung des Konzerns vom 25. September 2014 auf die Frage „Wie lange wird es dauern, bis der Fahrer aus dem Geschehen heraus genommen werden kann?“: „Das kommt auf die Verkehrssituation an. Bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten, im Stau oder beim Parken ist es eine Frage von Jahren. Bei hohen Geschwindigkeiten und komplexen Situationen wird der Fahrer noch mindestens zehn Jahre am Geschehen beteiligt sein, schätze ich“ (DAIMLER 2014).

Die Erwartungen der Experten stimmen also gut überein. Man kann davon ausgehen, dass bis 2025 hochautomatisches Fahren in Serienfahrzeugen angeboten wird. Schwieriger ist es, den Einführungszeitpunkt von vollautomatischen Serienfahrzeugen zu benennen, die sich auch fahrerlos im Straßenverkehr bewegen dürfen. Wenngleich noch gravierende rechtliche Fragen zu klären sind, wird der Zeitpunkt von der Lösung der technischen Herausforderungen bestimmt werden. Wenn die Innovationsdynamik auf dem Feld der Assistenzsysteme anhält, könnten bis spätestens 2035 vollautomatische Serienfahrzeuge am Straßenverkehr teilnehmen.

4.6.4 Foresight Rohstoffbedarf

Für die Abschätzung des künftigen Rohstoffbedarfs soll das technische Konzept des schon anwendungsnahen Velodyne LiDAR VDL-16 Puck zugrunde gelegt werden. Es enthält 16 Lasersysteme. Es wird ferner angenommen, dass, wie im zuvor erwähnten selbstparkenden Forschungs-

fahrzeug BMW i3, vier LiDAR pro Fahrzeug eingesetzt werden (PRIEMER 2015). Die geometrischen Abmessungen der Laser im VDL-16 sind nicht bekannt. Für die Abschätzung des künftigen Rohstoffbedarfs werden die in Tab. 4.14 dargestellten Annahmen zugrunde gelegt.

Tab. 4.14: Annahmen zur Abschätzung des Rohstoffbedarfs

| | |
|-----------------------------|-------------------------------|
| Wirtskristall | YAG |
| Aktives Material | 1 Atom-% Nd |
| YAG-Dimension | 3 mm Durchmesser, 10 mm Länge |
| YAG-Dichte | 4,55 g/cm ³ |
| Anzahl Laser pro LiDAR | 16 |
| Anzahl LiDAR pro Fahrzeug | 4 |
| Globale PKW-Produktion 2035 | 110 Mio. Fahrzeuge pro Jahr |

Mit diesen Annahmen errechnet sich ein Gewicht des einzelnen YAG-Kristalls von 0,32 g, bei 16 verbauten Lasern 5,14 g YAG pro LiDAR und bei vier LiDAR 20,6 g YAG pro Fahrzeug. Für die Ausstattung von 110 Mio. PKW mit LiDAR-Laserscannern entsteht danach ein jährlicher Bedarf an YAG-Kristall von 2.263 t.

Die chemische Summenformel für mit 1 Atom-% Neodym dotiertes YAG lautet $Y_{2,97}Nd_{0,03}Al_5O_{12}$. Das Molekulargewicht dieses Materials beträgt 595,3 g. Es enthält nach Tab. 4.15 0,72 Gew.-% Neodym und rund 44 Gew.-% Yttrium. Daraus ergibt sich mit den getroffenen Annahmen ein jährlicher Bedarf von etwa 16 t Neodym und 1.004 t Yttrium, wenn alle 2035 produzierten Personenkraftwagen mit Laserscannern ausgestattet würden (Tab. 4.16). Um den vorhandenen Unsicherheiten Rechnung zu tragen, ist das formulierte Szenarium eine Potenzialabschätzung und bildet die Obergrenze für den erwarteten Rohstoffbedarf der Anwendung.

2013 sind ausschließlich Forschungsfahrzeuge mit Laserscannern ausgerüstet. Der Rohstoffbedarf für diese Fahrzeugscanner ist vernachlässigbar.

Der Vergleich des erwarteten Rohstoffmengenpotenzials für Laserscanner mit der Weltproduktion zeigt, dass in dieser Anwendung kein kritisches Nachfragesegment entsteht. Diese Einschätzung gilt auch für die übrigen Fahrzeugsensoren.

Tab. 4.15: Gewichtsanteile der Rohstoffe im Nd:YAG-Festkörper-Laser

| Element | Atomgewicht g/Mol | Atomanzahl | Molekulargewicht g/Mol | Gewichtsanteil % |
|--------------|----------------------|------------|---------------------------|---------------------|
| Yttrium | 88,9 | 2,97 | 264,0 | 44,35 |
| Neodym | 144,2 | 0,03 | 4,3 | 0,72 |
| Aluminium | 27,0 | 5 | 135,0 | 22,68 |
| Sauerstoff | 16,0 | 12 | 192,0 | 32,25 |
| Summe | | 20 | 595,3 | 100,00 |

Tab. 4.16: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Potenzialabschätzung für den Rohstoffbedarf von Laserscannern zum automatischen Pilotieren von PKW in t

| Rohstoff | Produktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|-----------|---------------------|-------------|----------------------|
| Neodym | 28.900 ¹ | ~ 0 | 16 |
| Yttrium | 5.500 ¹ | ~ 0 | 1.004 |
| Aluminium | 47.811.880 (R) | ~ 0 | 513 |

R: Raffinadeproduktion

¹ Metallproduktion berechnet aus den SEO, Schätzung inkl. illegaler Förderung in China (Quelle: KINGSNORTH 2015)

4.6.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Der Laserscanner dürfte die zentrale Sensor-Komponente für die Realisierung des vollautomatischen Führens von Straßenfahrzeugen sein. Laserstrahlung ist monochromatisch und lässt sich deshalb sehr gut bündeln. Dadurch ist auch in größerer Entfernung der Abtaststrahl schmal und in der Lage feine Strukturen aufzulösen. Es ist eher unwahrscheinlich, dass die Leistungsfähigkeit der kostengünstigen Ultraschall- und Radarsensoren so weit gesteigert werden kann, dass sie das benötigte hochgenaue Abbild der Fahrzeugumgebung erzeugen können. Als Alternative kämen Mustererkennungsverfahren in Betracht, die das Bild optischer Stereokameras auswerten. Mustererkennungsverfahren sind im militärischen Bereich sehr verbreitet.

Es ist möglich, das LiDAR von Laserscannern mit unterschiedlichen Halbleiter- und Festkörper-Lasersystemen zu realisieren. Die Forschungsfahrzeuge von Google arbeiten mit Laserscannern der Velodyne Laser Incorporation, die für die Erzeugung der 905 nm Laserstrahlung InGaAs-Halbleiterlaser verwenden dürften. Aber auch mit dem gängigen Nd:YAG-Festkörper-Laser können mit

946 nm und 1.064 nm Wellenlängen in der Nähe der InGaAs-Laserstrahlung realisiert werden.

Vollautomatisch gesteuerte Fahrzeuge, beispielsweise für fahrerlose Ruftaxis, wären im schienen-gebundenen Verkehr technisch ungleich einfacher zu realisieren. Hierfür müssten allerdings Schienenwege gebaut werden, während vollautomatische Autos das vorhandene, höchst verästelte Straßen- und Wegenetz nutzen, das jedes bewirtschaftete Gebäude (mit wenigen Ausnahmen) zu erreichen ermöglicht. Dieser gewichtige Vorteil wird den Ausbau des fahrerlosen Schienenverkehrs in die Fläche beschränken.

Für die Entsorgung von gebrauchten Autos gibt die Altfahrzeug-Verordnung anspruchsvolle Recyclingziele vor. Seit dem 1. Januar 2015 müssen 95 % des Leergewichts wiederverwendet oder stofflich oder energetisch verwertet werden. Die energetische Verwertung wird beschränkt, indem mindestens 85 % wiederverwendet oder stofflich zu verwerten sind (ALTFahrzeugV 2013). Unterlaufen werden die gesetzlichen Vorgaben in erheblichem Umfang, indem hochbetagte Gebrauchtfahrzeuge, darunter, so die Vermutung, auch schrottreife Autos, in Entwicklungsländer und nach Osteuropa exportiert werden (EUWID 2015).

Sensoren, Aktuatoren und Prozessoren können am Ende einer Autolebensdauer nicht wiederverwendet werden, weil der technische Wandel nach mehr als einem Jahrzehnt dies nicht zulässt. Für diesen komplexen Elektronikschrott sind auch die Möglichkeiten der stofflichen Rückgewinnung aus technischen und wirtschaftlichen Gründen unbefriedigend. Es ist zu erwarten, dass ein nicht unerheblicher Teil dieser Komponenten energetisch verwertet (Platinen, Isolierungen, Kunststoffgehäuse) oder beseitigt wird.

Ein zentraler Begleiteffekt der technischen Assistenzsysteme ist die Unfallvermeidung. Eine Hochrechnung von MCKINSEY (2013) prognostiziert für 2025 weltweit 1,5 Millionen tödliche Unfälle im Straßenverkehr. Die vermiedene Verschrottung und Wiederinstandsetzung von Unfallfahrzeugen verbessert die Rohstoffeffizienz. Assistenzsysteme helfen, Verkehrsstaus zu vermeiden, den Parkraum besser auszunutzen (Flächenentsiegelung) und unterstützen behinderte und ältere Menschen mit eingeschränkten sensorischen Fähigkeiten. Sie verbessern die Energieeffizienz und reduzieren die Emissionen von CO₂ und Schadstoffen indem sie den Fahrzeugantrieb um den optimalen Betriebspunkt aussteuern. Assistenzsysteme für das autonome Fahren leiten einen revolutionären Innovationschub ein, der mit dem vollautomatischen und fahrerlosen Führen von Autos im Straßenverkehr seine Kulmination erreicht. Es wird mit erheblichen gesellschaftlichen Implikationen verbunden sein, kennzeichnend für eine Zukunftstechnologie. Taxis werden zu fahrerlosen Ruftaxis, die per Smartphone angefordert werden und denen man per Sprachbefehl das Ziel vorgibt. Car-Sharing-Dienste werden flexibilisiert. Das angeforderte Fahrzeug fährt zum vorgegebenen Zeitpunkt fahrerlos vors Haus und ist bereit zum Einsteigen. Am Ende der Fahrt steuert es automatisch den nächsten Auftrag an. Der Nutzer merkt kaum einen Unterschied zum eigenen Auto und steigt ohne Komforteinbuße auf Car-Sharing um. Die bestehende Fahrzeugflotte wird effizienter ausgenutzt, die Neuproduktion und die Menge der benötigten Rohstoffe nehmen ab. Solche Effekte auf die Rohstoffnachfrage lassen sich heute noch nicht mit der nötigen Sicherheit einschätzen, sie werden Gegenstand einer nächsten Aktualisierung sein.

4.7 Unbemannte Luftfahrzeuge für kommerzielle Anwendungen („Drohnen“)

4.7.1 Technologiebeschreibung

Unbemannte Luftfahrzeuge werden auch als ferngesteuerte Luftfahrzeuge oder umgangssprachlich als „Drohnen“ bezeichnet. In unbemannten Luftfahrtsystemen werden verschiedene Technologien zur Erfüllung bestimmter Aufgaben kombiniert, weshalb es eine Vielzahl an unterschiedlichen Systemkonfigurationen gibt. Im Kern besteht ein unbemanntes Luftfahrtsystem (s. Abb. 4.19) aus einem unbemannten Luftfahrzeug mit einer Funktionseinheit („Payload“), einer Bodenstation und einer Kommunikations- und Steuerungseinheit (GUPTA et al. 2013).

Fünf Haupttechnologien sind für die Erfüllung gegenwärtiger und zukünftiger Marktanforderungen maßgeblich (VOLPE 2013): (1) Airframe, (2) Triebwerke, (3) Kommunikations- und Steuerungssysteme, (4) Sensoren und (5) Informationsverarbeitung. Darüber hinaus sind zahlreiche weitere Systemkomponenten erforderlich (COLOMINA & MOLINA 2014, GUPTA et al. 2013).



Abb. 4.19: Ein Oktocopter transportiert eine 1,5 Liter Getränkeflasche (Quelle: HCl2, WIKIMEDIA, CC BY-SA 3.0)

Zu den wichtigsten Bauformen gehören unbemannte Luftfahrzeuge mit starren oder beweglichen Flügeln, Luftschiffe, unbemannte Helicopter sowie Multicopter mit mehr als zwei Rotoren (DHL 2014, GUPTA et al. 2013).

Die Klassifikationssysteme für unbemannte Luftfahrzeuge sind je nach Land und Einsatzzweck verschieden (NASA 2013), in Tab. 4.17 wird nach Startmasse, Flughöhe, Reichweite und Flugdauer differenziert (TAB 2011).

Die meisten Plattformen werden für unbemannte Luftfahrzeuge der Größenklasse „Mini“ entwickelt bzw. hergestellt (TAB 2011). Zu den Hauptländern der Entwicklung zählen die USA, Israel, Frankreich, UK, Russland, Deutschland und die Volksrepublik China (AUVSI 2013, EUROPEAN COMMISSION 2014b).

In Deutschland regulieren das Luftverkehrsgesetz und die Luftverkehrs-Ordnung den Einsatz von unbemannten Luftfahrtsystemen. Demnach kann für den Betrieb von unbemannten Luftfahrzeugen mit einer Gesamtmasse von maximal 25 kg in Sichtweite des Steuernden eine Erlaubnis erteilt werden, wenn eine Flughöhe von 100 Metern über Grund nicht überschritten wird und keine Menschen oder Menschenansammlungen überflogen werden.

Unbemannte Luftfahrzeuge werden bislang vorwiegend für militärische Zwecke, zunehmend

aber auch für zivile und kommerzielle Zwecke eingesetzt. Größere unbemannte Luftfahrzeuge mit einem Gewicht von mehr als 250 kg werden im Folgenden nicht berücksichtigt, da sie vorwiegend militärischen Zwecken dienen und ihre Zusammensetzung der Geheimhaltung unterliegt.

Zu den Anwendungen mit großen zivilen und kommerziellen Marktpotenzialen gehören (AUVSI 2013, COLOMINA & MOLINA 2014, DHL 2014, GUPTA et al. 2013, ROGLIA & CRAGLIA 2012):

- Fernerkundung für Precision Agriculture: Management von Trockenperioden, Pflanzenkrankheiten, Bewässerung und Pestizidausbringung,
- Fernerkundung für Erdbeobachtung und Katastrophenschutz: Detektion von Bränden, Erkundung von Katastrophengebieten, Erkennung von geologischen Veränderungen und Aufnahmen für wissenschaftliche Zwecke (u. a. Natur- und Artenschutz),
- Fernerkundung für die Planung von Bauvorhaben und Infrastruktur-Monitoring: Auslegung von Baustellen und –prozessen, Überwachung von Stromleitungen, Telekommunikationseinrichtungen, Pipelines, Straßenverkehr, Eisenbahnen, etc.,
- Fernerkundung für die territoriale Überwachung: Küstenwache, Grenzschutz, polizeiliche Aufgaben,
- Gütertransport in der Logistik: Während die großräumigen unbemannten Transportflüge

Tab. 4.17: Ausgewählte Kategorien unbewaffneter unbemannter Luftfahrzeuge
(Quelle: VAN BLYENBURGH in TAB 2011)

| | Startmasse (max.) [kg] | Flughöhe (max.) [km] | Reichweite (max.) [km] | Flugdauer (max.) [h] |
|--------------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Nano | < 0,025 | 100 | < 1 | < 1 |
| Micro | < 5 | 250 | < 10 | 1 |
| Mini | < 30 | 300 | < 10 | < 2 |
| Close Range | 150 | 3.000 | 10–30 | 2–4 |
| Short Range | 200 | 3.000 | 30–70 | 3–6 |
| Medium Range | 1.250 | 5.000 | 70–200 | 6–10 |
| Medium Range Endurance | 1.250 | 8.000 | > 500 | 10–18 |
| Low Altitude Deep Penetration | 350 | 50–9.000 | > 250 | 0,5–1 |
| Low Altitude Long Endurance | < 30 | 3.000 | > 500 | > 24 |
| Medium Altitude Long Endurance | 1.500 | 14.000 | > 500 | 24–48 |
| High Altitude Long Endurance | (4.500) 12.000 | 20.000 | > 2.000 | 24–28 |

mit großer Wahrscheinlichkeit ähnliche Charakteristika wie die bemannten Transportflüge aufweisen, haben kleinere unbemannte Luftfahrzeuge das Potenzial, revolutionäre Innovationsschübe in der Logistik auszulösen, z. B. in der Intralogistik, indem sie die Auslieferung von Waren in Megacities durch Straßentransport ersetzen oder Güter in Gegenden mit schwacher Infrastruktur wie z. B. im ländlichen Afrika ausliefern können (DHL 2014).

Als weitere Einsatzbereiche werden Luftbildaufnahmen für Medien, Film und Marketing, für Archäologie und für die Kartierung von Gebieten genannt. Darüber hinaus ist eine kreative Bastlerszene entstanden, die zahlreiche Eigenentwicklungen und Open Source Projekte vorantreibt.

Wichtige Treiber für die Marktdurchdringung sind geeignete Maßnahmen zur Integration von unbemannten Luftfahrtsystemen in den Luftraum sowie kostengünstige Komponenten und neue Systemlösungen, was durch die große Bandbreite an Anbietern mittelfristig gesichert erscheint (AUVSI 2013). Hemmnisse sind aus heutiger Sicht Bedenken über den Schutz der Privatsphäre und der Flugsicherheit (DHL 2014).

Wichtige Entwickler und Anbieter von unbemannten Luftfahrtsystemen in Deutschland sind die Firmen Microdrones und HeightTech. Zu den aktiven Firmen im Bereich Gütertransport zählen DHL, Deutsche Post AG, Zookal, Google, Amazon und FedEx.

4.7.2 Rohstoffinhalt

Unbemannte Luftfahrzeuge gehören zu den systemischen Innovationen, die mehrere bereits am Markt etablierte Komponenten kombinieren. Angesichts der Vielzahl an unterschiedlichen Systemkonfigurationen muss für eine Einschätzung des Rohstoffinhaltes eine Auswahl an Komponenten und Einsatzzwecken erfolgen.

Tab. 4.18 zeigt wesentliche Optionen zu Komponenten und Informationen über Materialien im Überblick.

Auch wenn die Projektionen für Komposite (Airframe, Flügel und Rotoren) auf starkes Wach-

tum hinweisen, wird der Anteil des Segments der unbemannten Luftfahrzeuge am Kompositmarkt für die gesamte Luftfahrt mit (0,8 % für 2009) bis 2018 gering bleiben (HIGH PERFORMANCE COMPOSITES 2009). Aufgrund seiner begrenzten Verfügbarkeit könnten am ehesten für Scandium in Al-Mg-Sc-Zr-Legierungen nennenswerte relative Nachfrageimpulse entstehen.

Das Auftragsvolumen für Antriebe unbemannter Luftfahrzeuge ist relativ klein. Daher stehen in der Regel keine Mittel für die Neuentwicklung eines perfekt geeigneten Triebwerks für unbemannte Luftfahrzeuge zur Verfügung. Aus diesem Grund nimmt man meist einen bestehenden Antrieb und passt ihn an (FLUGREVUE 2014). Bei einem massenhaften Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugen könnten unter Umständen nennenswerte Nachfrageimpulse auf Lithium-Akkus ausgelöst werden.

Die Komponenten für Avionik und Payloads sind wenig spezifisch für unbemannte Luftfahrzeuge. GPS-Sensoren befinden sich in Milliarden Mobiltelefonen, auch Standard-Sensoren, wie beispielsweise für Infrarot (IR), werden in Applikationen wie Bewegungsmeldern massenhaft eingesetzt. Für das Wachstumssegment Fernerkundung für Precision Agriculture kommen vor allem IR- und multi-spektrale Sensoren zum Einsatz (COLOMINA & MOLINA 2014). Germanium hat bei IR und optischen Sensoren ein wichtiges Anwendungsfeld. In der Sensorik, u. a. auch bei Barometern, Gyrometern und Accelerometern, gibt es einen starken Trend hin zu Mikroelektromechanischen Systemen (MEMS), meist auf Silizium-Basis. Mit den GPS-Signalen lässt sich nicht nur die Position, sondern auch die Geschwindigkeit des Empfängers bestimmen. Für den zukünftig möglichen Gütertransport in der Logistik verwendet die Microdrone „Paketcopter“ Magnetometer, die das Erdmagnetfeld in seiner räumlichen Ausdehnung messen, für die Navigation. GPS und Magnetometer werden auch zu Einheiten kombiniert. An Magnetometer-Technologien werden Fluxgate-Magnetometer, supraleitende Quanteninterferenzgeräte, Proton-Magnetometer, Helium-3- und Helium-4-Magnetometer und Alkali-Magnetometer genannt (HOVDE et al. 2013). Für unbemannte Luftfahrzeuge wird insbesondere der Einsatz von Alkalimagnetometern (Rb, Cs, K) diskutiert.

Tab. 4.18: Komponenten und Materialien für zivile unbemannte Luftfahrzeuge
(Zusammenstellung des ISI, basierend auf BONIEL et al. 2014, COLOMINA & MOLINA 2014, GUPTA et al. 2013, KRUCZKOWSKI 2012, MOON et al. 2014, NORTHWEST UAV PROPULSION SYSTEMS 2011, SCHMIDKE et al. 2011, VOLPE 2013)

| | Heutige Situation | Neue Entwicklungen |
|---|---|--|
| Airframe | Carbonfaser-verstärkte Polymere (83 % Marktvolumen) | Polymer-Komposite dominieren weiter; neue Hochleistungslegierungen durch kostengünstigere Fertigung (z. B. additive Fertigung von Al-Mg-Sc-Zr) |
| Antrieb, Energieversorgung und -speicherung | Verbrennungsmaschinen, Düsentriebwerke, elektrische Systeme (Elektromotor, Lithium-Polymer-Akkus) | Hocheffiziente, eingebettete Triebwerke und effiziente kleinräumige Antriebe, Si ₃ N ₄ -Nanokompositkeramik, Brennstoffzellen, Photovoltaik und hybride Systeme |
| Flügel bzw. Rotor | Rotoren aus Carbonfaser, Carbonfaser-Glasmatrix-Schaum | Additive Fertigung von Komponenten basierend auf PP, PS/ABS-Schaum |
| Avionik (Luftfahrtelektronik) | Bordcomputer mit Orientierungssystem, Navigationssystem bzw. Autopilot und Kommunikationseinrichtungen, Sensoren und Empfänger für die Flugsteuerung (Magnetometer, GPS-Empfänger, Barometer, Gyrometer, Accelerometer) | Neue Architekturen basierend auf geteilten Ressourcen für Flugkontrolle/ Navigation, Flugplanung und Anpassung, Payload-Management |
| Payload (Nutzlast) | Sensoren für das gesamte elektromagnetische Spektrum (insb. sichtbar, IR, Radar, multi-spektral), meteorologische, biologische und chemische Sensoren, Datenverarbeitung, Glas- und Quarzfaserkomposite für Bugkonen, Radarnasen, Nutzlastverkleidungen, Fracht | Elektromagnetische Weitwinkel-Sensoren, Blätterwerk-durchdringendes Radar, Radar mit synthetischer Apertur, Laser Scanning (LIDAR), kleinere, leichtere und leistungsfähigere Sensoren |

Während für die Fernerkundung grundsätzlich alle möglichen Konfigurationen in Frage kommen, gibt es für den Einsatz in besiedelten Gegenden bei geringen Flughöhen Restriktionen. Gemäß DHL (2014) ist für die Logistik in Städten und die Intra-logistik vor allem die Konfiguration Multicopter mit Elektroantrieb geeignet. Mit 2,6 kg Eigengewicht kann das Modell md4-1.000 für bis zu 90 Minuten in der Luft bleiben und dabei Spitzengeschwindigkeit von ca. 50 km/h erreichen (MICRODRONES 2015).

4.7.3 Foresight industrielle Nutzung

Zur zukünftigen Nutzung von unbemannten Luftfahrzeugen liegen nur wenige punktuelle Angaben mit beträchtlicher Bandbreite vor (AUVSI 2013,

HARRISON 2013), was auf den geringen Reifegrad der Industrie zurückgeführt werden kann. Für die nähere Zukunft wird erwartet, dass der kommerzielle Markt für unbemannte Luftfahrtsysteme bis 2022 unter 2 % des globalen Gesamtmarktes bleiben wird (WARWICK & DICKERSON 2012). Der Anteil der USA an den weltweiten Ausgaben für unbemannte Luftfahrtsysteme wird in den kommenden zehn Jahren als dominierend eingeschätzt (RDT&E: 62 %, Beschaffung 55 %) (TEAL GROUP 2012).

Für die USA liegt eine Projektion der jährlichen Verkäufe von unbemannten Luftfahrzeugen nach Stückzahlen bis 2035 vor (VOLPE 2013). Demnach dominieren aktuell die unbemannten Luftfahrzeuge des öffentlichen Sektors und wachsen von aktuell rund 8.000 Stück (v. a. Militär) bis 2035 auf

70.000 Stück (36.000 für den Federal und State Sektor, 34.000 für die Polizei). Die unbemannten Luftfahrzeuge (UAV) des kommerziellen Sektors sind derzeit marginal, sollen die unbemannten Luftfahrzeuge des öffentlichen Sektors um das Jahr 2028 überholen und 2035 schließlich bei ca. 175.000 Stück liegen. Ein Großteil der unbemannten Luftfahrzeuge soll auf die Kategorien „Micro“ und „Small“ entfallen. Alleine für die Überwachung und Besprühung von Getreide werden gemäß dieser Projektion für 2035 rund 100.000 zusätzliche unbemannte Luftfahrzeuge benötigt (VOLPE 2013). Insgesamt soll der Markt für unbemannte Luftfahrzeuge 2035 in den USA bei 250.000 Stück liegen.

Die FAA (2010) kommt für die USA auf deutlich moderatere Schätzungen. Demnach sollen die Stückzahlen 2020 bei rund 15.000 und 2030 bei rund 30.000 liegen. Diese Projektionen beruhen auf der Annahme, dass kommerzielle Aktivitäten nicht vor 2018 beginnen, keine wichtige außergewöhnliche Nachfrage entsteht und die Kosten für unbemannte Luftfahrssysteme mit zunehmender Technologiereife und Massenproduktion sinken. In einer anderen Modellierung werden die größten Marktanteile in den USA bis 2025 für Precision Agriculture (ca. 140.000–165.000 Stück/a; 80 %) und öffentliche Sicherheit (ca. 20.000 Stück/a, 10 %) gesehen, rund 10 % entfallen auf den Rest (AUVSI 2013).

4.7.4 Foresight Rohstoffbedarf

Derzeit konkurrieren zahlreiche UAV-Plattformen um zukünftige Marktanteile. Angesichts dieses nicht konsolidierten Marktes kann eine Abschätzung des zukünftigen Rohstoffbedarfs nur illustrativ sein. 2013 wurden rund 8.000 unbemannte Luftfahrzeuge in den USA vorwiegend für den öffentlichen Sektor verkauft. Wir schätzen gemäß Volpe (2013), dass im Jahr 2035 in den USA rund 70.000 unbemannte Luftfahrzeuge für den öffentlichen Sektor verkauft werden, 125.000 Stück für Precision Farming und 50.000 Stück für sonstige kommerzielle Zwecke.

Für die Abschätzung der weltweit jährlich verkauften unbemannten Luftfahrzeuge aus den Daten für die USA werden folgende Annahmen getroffen:

- Öffentlicher Sektor: Der Weltmarktanteil der USA beträgt im Jahr 2013 60 %. In Projektion A wird er im Jahr 2035 ebenso 60 % betragen, in Projektion B nur noch 20 % (Annahme: Konvergenz der globalen Märkte unbemannter Luftfahrzeuge).
- Precision Farming: Die globale landwirtschaftliche Nutzfläche beträgt 15.750.000 km², davon entfallen auf die USA 1.650.000 km² (CIA 2015). In Projektion A wird angenommen, dass das Marktpotenzial für unbemannte Luftfahrzeuge 2035 proportional zur Fläche der elf OECD Länder mit der größten landwirtschaftlichen Nutzfläche ist (USA, Australien, Kanada, Mexico, Türkei, Frankreich, Spanien, Polen, Deutschland, Italien, UK).

Tab. 4.19: Projektionen der weltweit verkauften Stückzahlen und Massen an unbemannten Luftfahrzeugen

| | Stückzahl 2013 | Stückzahl 2035 | Masse [t] (5 kg) | Masse [t] (25 kg) | Masse [t] (250 kg) | Gesamt- masse [t] |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| Öffentlicher Sektor | | | | | | |
| Projektion A | 13.000 | 117.000 | 47 | 47 | 23 | 117 |
| Projektion B | 13.000 | 350.000 | 140 | 140 | 70 | 350 |
| Precision Farming | | | | | | |
| Projektion A | 0 | 284.000 | 142 | 142 | 0 | 284 |
| Projektion B | 0 | 625.000 | 313 | 313 | 0 | 626 |
| Andere kommerzielle Zwecke | | | | | | |
| Projektion A | 0 | 200.000 | 40 | 140 | 20 | 200 |
| Projektion B | 0 | 417.000 | 83 | 292 | 42 | 417 |

In Projektion A beträgt der Flächenanteil der USA 44 %. In Projektion B werden zusätzlich zu diesen elf OECD-Ländern die BRIC-Länder (Indien, China, Russland, Brasilien, die Nummern zwei bis fünf der Welt nach landwirtschaftlicher Nutzfläche) in die Hochrechnung einbezogen. In Projektion B beträgt der Flächenanteil der USA 20 %.

- Andere kommerzielle Nutzungen (insbesondere Logistik): Hier wird beispielhaft der Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugen in den Top 30 urbanen Agglomerationen 2030 zugrundegelegt (UN POPULATION DIVISION 2014). In Projektion A wird angenommen, dass das Marktpotenzial 2035 proportional zur Bevölkerung in den Top 30 urbanen Agglomerationen ist, die in OECD-Ländern liegen (New York/Newark, Los Angeles/Long Beach/Santa Ana, Tokyo, Osaka, Mexico City, Istanbul). In Projektion A beträgt der Anteil der USA an dieser Bevölkerung 25 %. In Projektion B werden zusätzlich die urbanen Agglomerationen in den BRIC-Ländern in die Hochrechnung einbezogen (Dehli, Mumbai, Kalkutta, Bangalore, Chennai, Hyderabad, Shanghai, Beijing, Guangzhou, Chongqing, Tianjin, Shenzen, Sao Paulo, Rio de Janeiro). In Projektion B beträgt der Anteil der USA an dieser Bevölkerung 12 %.

Zusätzlich sind die UAVs nach Anwendungen auf Gewichtsklassen aufgeteilt worden. Für den öffentlichen Sektor verteilen sie sich auf die 5 kg-Klasse, 25 kg-Klasse und 250 kg-Klasse im Verhältnis 40/40/20, für Precision Farming im Verhältnis 50/50/0 und für andere kommerzielle Zwecke im Verhältnis 20/70/10. Hieraus lässt sich abschätzen, welches Gesamtgewicht die jährlich verkauften unbemannten Luftfahrzeuge im Jahr 2035 in etwa haben werden.

Die Gesamtmasse an jährlich verkauften unbemannten Luftfahrzeugen im Jahr 2035 liegt in Projektion A bei 601 Tonnen, in Projektion B bei 1.393 Tonnen. Zum Vergleich: Das Leergewicht eines Airbus A380-800 liegt bei 275 Tonnen. Größere unbemannte Luftfahrzeuge mit einem Gewicht von mehr als 250 kg wurden in dieser Abschätzung nicht berücksichtigt, da sie vorwiegend militärischen Zwecken dienen und ihre Zusammensetzung der Geheimhaltung unterliegt.

Für die Nachfrage nach Rohstoffen bedeutet dies, dass nur auf Spezialitäten ein nennenswerter Nachfrageimpuls durch unbemannte Luftfahrzeuge ausgelöst werden kann. Da mit Carbonfasern heute schon ein guter Werkstoff für den Airframe zur Verfügung steht, dürften sich Scandium-legierte Aluminiumlegierungen, wenn überhaupt, nur in speziellen Einsatzgebieten etablieren. Die Antriebseinheiten werden in der Regel als Derivate der Massenprodukte für den bemannten Antrieb entwickelt, so dass hier im Vergleich zur bemannten Luftfahrt keine nennenswerten Rohstoffbedarfe zu erwarten sind.

Angesichts der hohen Stückzahlen von unbemannten Luftfahrzeugen können die Avionik-Sensoren und Empfänger (Magnetometer, GPS, Barometer, Gyrometer, Accelerometer) und die Payload-Sensoren (elektromagnetische Wellen, insbesondere IR) unter Umständen eine relevante Rohstoffnachfrage induzieren. Germanium in IR und optischen Sensoren sowie Rubidium und Cäsium in Alkali-Magnetometern könnten möglicherweise rohstoffintensiv werden. Es liegen aber nicht ausreichend Daten für eine seriöse Abschätzung vor. Während Kalium in großen Mengen gefördert wird, sind die weltweiten Produktionsmengen an Cäsium und Rubidium unbekannt.

4.7.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Zum Recycling und zur Ressourceneffizienz liegen keine aussagekräftigen Informationen vor. Der Verlust an unbemannten Luftfahrzeugen durch Absturz dürfte eine wichtige Lücke im Materialkreislauf sein. Die geringen Materialmengen und die Verwendung von Verbundmaterialien erschweren das Recycling.

Unbemannte Luftfahrzeuge haben eine Lebensdauer von ca. elf Jahren und sind leicht in Stand zu halten (AUVSI 2013).

Derzeit konkurrieren viele Technologien und Komponenten in den Märkten für unbemannte Luftfahrzeuge. Über den Einfluss von Rohstoffpreisen oder -engpässen auf das Design von UAVs ist nichts bekannt.

Informations- und Kommunikationstechnik, optische Technologien, Mikroelektronik

4.8 Bleifreie Lote

4.8.1 Technologiebeschreibung

In elektronischen Anwendungen waren bleihaltige Lote Standard, bis sie in der EU aus Gesundheits- und Umweltschutzgründen verboten wurden. Diese Synopse befasst sich mit bleifreien Lötmaterialien, die sich als Substitute für bleihaltige Lote in Elektronikapplikationen eignen.

Löten

Löten ist eine Technik zur Verbindung metallischer Werkstoffe. Dazu wird das Verbindungsmaterial, genannt Lot, durch Wärmezufuhr verflüssigt. Im Gegensatz zum Schweißen werden dabei allerdings nicht die zu verbindenden Werkstoffe aufgeschmolzen. Aufgrund einer hohen Löslichkeit in der flüssigen Lotphase diffundieren Atome der zu verbindenden Werkstoffe in diese hinein. Beim Abkühlen entstehen an der Grenzfläche Legierungen, welche die chemische Verbindung von Werkstoff und Lot bewerkstelligen. Das Löten gehört somit zur Kategorie stoffschlüssiger Verbindungen, wie z. B. auch Schweißen und Kleben. Demgegenüber stehen nicht stoffschlüssige, leicht lösbare Verbindungstechniken wie beispielsweise Schrauben und Klettverschluss.

Weil die Schmelztemperatur des Lotes niedriger als die des Werkstoffes sein muss, bestehen Lote aus niedrig schmelzenden Metallgemischen. Dafür sind eutektische Gemische besonders interessant, denn ihr Schmelzpunkt ist niedriger als der Schmelzpunkt der einzelnen Komponenten (Abb. 4.21). Bei Schmelztemperaturen bis 450 °C spricht man von Weichloten, darüber von Hartloten. Ab 900 °C kommen Hochtemperaturlote zum Einsatz.

Das Lotmaterial kann in Form von Lotdraht oder Lotpaste erworben werden. Flussmittel sind zum Teil enthalten oder werden beim Prozess zugesetzt, um Oberflächenoxide von den Werkstoffen zu entfernen und deren Neubildung vorzubeugen.

Neben der beschriebenen Hauptanwendung gibt es weitere Anwendungen, für die spezielle Lote benötigt werden, z. B. Glaslot zum Verbinden von Keramik und Glas, Silberlot zur Verbindung metallisierter Keramikteile.

Bleifreies Löten in der Elektronik

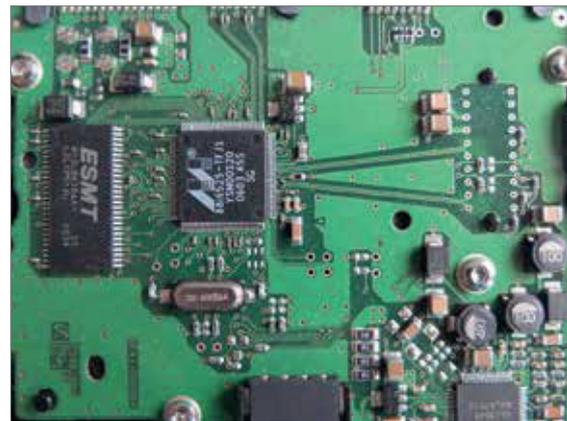


Abb. 4.20: Gelötete Leiterplatte einer HDD-Festplatte
(Quelle: eigenes Werk)

Fast jedes elektronische Gerät enthält eine gelötete Leiterplatte (Abb. 4.20). Anwendungen sind somit u. a. Computer, Laptops, Smartphones, Fernseher, medizinische Geräte, Glasfaserrezeptoren, Datenspeicher, Fahrzeuge (Kfz- und Zugverkehr, Luft- und Raumfahrt) aber auch Haushaltselektronik wie beispielsweise Waschmaschinen und andere „weiße Ware“ (BURTON 2014, TRANSPARENCY MARKET RESEARCH 2015b). Ein iPad enthält z. B. 7.877 Lötstellen, für welche insgesamt 3 g Zinn benötigt werden (SIMPSON 2012).

Beim Löten von Leiterplatten werden ausschließlich Weichloten verwendet. Eutektische bzw. nah-eutektische Zinn-Blei-Gemische galten lange Zeit als Standardmaterial (Abb. 4.21). Der Vorteil eines Gemisches mit eutektischer Zusammensetzung ist, dass dieses kongruent bei einer Temperatur schmilzt und erstarrt. Ein eutektisches Gemisch verhält sich also wie ein reines Metall. Bei anderen Zusammensetzungen des Gemisches kommt es hingegen zu graduellen Phasenumwandlungen entlang der Solidus- und Liquiduskurven (Abb. 4.21), woraus ein Gefüge mit schlechteren mechanischen Eigenschaften resultiert. Klassische Zinn-

Blei-Lote enthalten mit 63 % etwas mehr Zinn als die eutektische Zusammensetzung, da Zinn beim Löten schneller durch Oxidation und Reaktionen mit dem Substrat verloren geht (SWEATMAN & SUPERIOR 2006).

Blei kann allerdings beim Menschen akute und chronische Vergiftungen verursachen. Für letztere genügt bereits die Aufnahme relativ kleiner Mengen (1 mg pro Tag) über einen längeren Zeitraum hinweg, da sich das Blei im menschlichen Körper (v. a. in den Knochen) ansammelt und kaum ausgeschieden wird. Eine chronische oder akute Überdosis Blei schädigt das Nervensystem, beeinträchtigt die Blutbildung und Fruchtbarkeit und verursacht Magen-Darm-Beschwerden sowie Nierenschäden. Eine Bleivergiftung kann tödlich enden. Zudem gilt Blei als krebserzeugend im Tierversuch.

Die Gefahr des Einatmens von Bleistäuben oder der Aufnahme über Nahrung ist bei Leiterplatten

in elektronischen Geräten sehr gering. Die Aufnahme durch Hautkontakt spielt nur eine untergeordnete Rolle und ist ebenfalls unwahrscheinlich. Bedenken ergaben sich aus der Problematik der weltweiten Entsorgungspraktiken von Elektronikschrott. Trotz offizieller Recyclingsysteme (bspw. in Deutschland) enden Elektronikprodukte häufig auf Müllkippen ärmerer Länder in Asien und Afrika (HAGELÜKEN 2009). Wertvolle Rohstoffe werden dort ohne Sicherheitsvorkehrungen und mit geringer Ausbeute zurückgewonnen. Die ortsansässige Bevölkerung ist so entweder direkt durch fehlenden Arbeitsschutz oder indirekt durch zu hohe Konzentration in Boden und Wasser von Blei aus Elektroschrott betroffen.

Aus diesen Gründen legte die EU mit der Richtlinie 2002/95/EG (genannt „RoHS 1“ für Restriction of Hazardous Substances) einen Grenzwert von 0,1 % für den Gehalt von Blei in Werkstoffen für elektronische Anwendungen fest. Da die Entwicklung von bleifreien Loten gleicher Qualität nicht

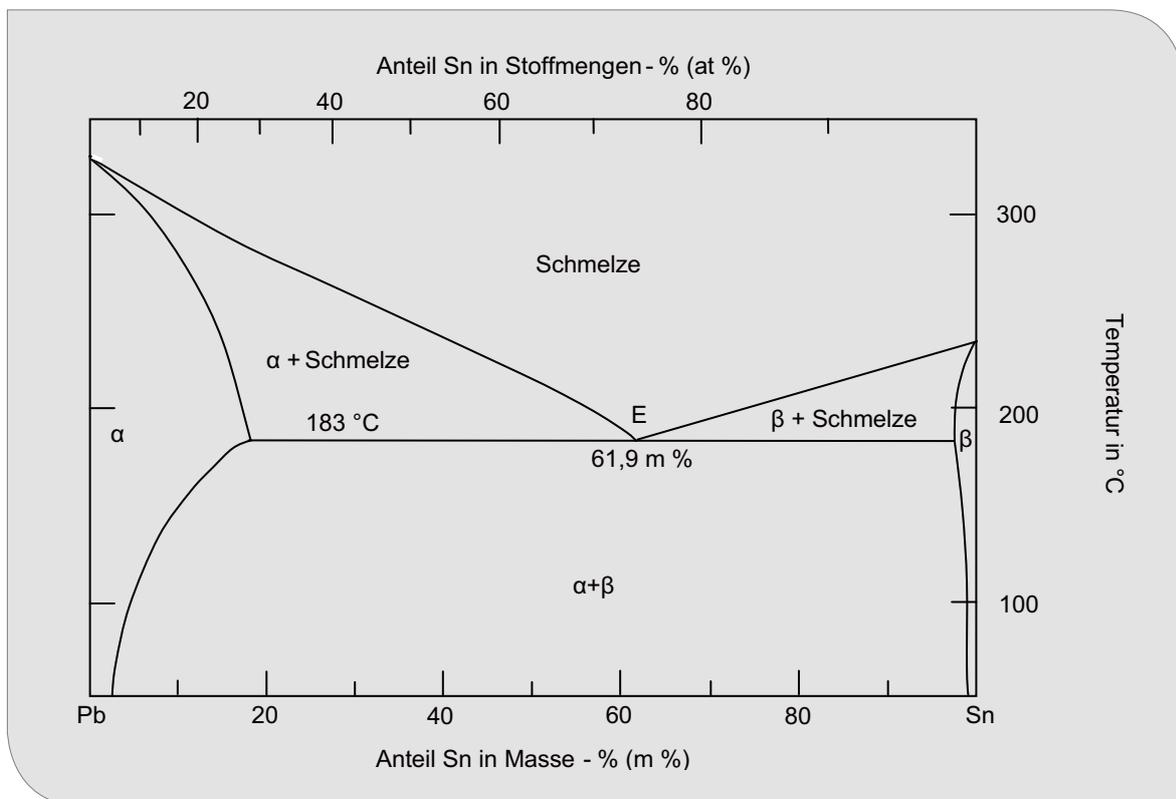


Abb. 4.21: Phasendiagramm Blei (Pb) – Zinn (Sn): Nur bei eutektischer Zusammensetzung (E: 61,9 Masse-% Sn) schmilzt ein Blei-Zinn-Gemisch kongruent bei einer Schmelztemperatur von 183 °C. Bei allen weiteren Zusammensetzungen kommt es zu einem teilweisen bzw. graduellen Erstarren oder Schmelzen entlang der gezeichneten Kurven (Quelle: eigene Darstellung)

trivial ist (s. Kapitel 4.8.2) und für diese außerdem Nachweise über ihre Langzeitverlässlichkeit fehlen, wurden Anwendungen mit hohen Sicherheitsansprüchen von der Regelung ausgenommen. Die Ausnahmeregelung galt zunächst für Medizintechnik, Sicherheitstechnik, Messgeräte, Luft- und Raumfahrt, Bahntechnik, Feuerwehrentechnik sowie für militärische und polizeiliche Verwendung. Die nachfolgende Richtlinie 2011/65/EU (genannt „RoHS 2“) bekräftigte die Grenzwerte für Blei und befristete die Ausnahmeregelung für medizinische Geräte bis 2014/2016 und für Kontroll- und Überwachungssysteme bis 2017.

Es wurde 2006 erwartet, dass weltweit viele Staaten mit ähnlichen Erlassen nachziehen würden. Die Schweiz und die Türkei haben inzwischen ähnliche Richtlinien eingeführt. Auch in China gelten seit 2007 an die RoHS angelehnte Bestimmungen. Der Grenzwert für Blei in elektronischen Werkstoffen wurde übernommen. Allerdings ist ein Überschreiten des Grenzwerts in China nicht verboten, sondern muss lediglich gekennzeichnet werden (MEYER-GÜLDNER 2007). In den USA gibt es Steuervergünstigungen für die Verwendung bleifreier Lote und in vereinzelt Bundesstaaten an die RoHS angelehnte Direktiven (ROHSGUIDE.COM 2015). Japan spielte auf dem Gebiet der bleifreien Lote eine Vorreiterrolle und arbeitete bereits 1998 intensiv an deren Entwicklung (LAU & LIU 2004). Dort gibt es keine spezifischen gesetzlichen Grenzwerte, aber die allgemeinen Richtlinien zu Reduktion, Wiederverwendung und Recycling von Elektronikschrott nehmen die Hersteller stark in die Verantwortung und motivieren diese entsprechend. Ähnliches gilt für Südkorea (ROHSGUIDE.COM 2015).

Kritisiert wird häufig, dass die Verwendung von Blei in Loten stark reglementiert wurde, während es für die Hauptanwendung in Bleiakkumulatoren (Startbatterien von PKW) keine Beschränkungen gibt. Eine vergleichende Ökobilanz der US-Umweltbehörde EPA konnte keinen eindeutigen Umweltnutzen bleifreier Lote gegenüber bleihaltigen Loten herausstellen (EPA 2005). Neben dem Sickerwasser aus bleihaltigem, nicht umweltgerecht entsorgtem Elektroschrott wurden in dieser Ökobilanz der Abbau und die Extraktion des häufig in bleifreien Loten verwendeten Silbers und der Energieverbrauch beim Lötten als starke Umwelteinflussfaktoren identifiziert.

Löttechniken in der Elektronikindustrie

Die auf Leiterplatten (Printed Circuit Boards PCB) gelöteten Bauteile lassen sich in durchsteckmontierte Bauteile und oberflächenmontierte Bauteile einteilen.

Durchsteckmontierte Bauteile (Through Hole Technology THT) haben Drahtanschlüsse, die durch Kontaktlöcher in der Leiterplatte gesteckt werden. Anschließend werden sie durch Wellenlötten mit den Leiterbahnen der Leiterplatte verbunden. Dazu wird zunächst ein Flussmittel auf die Leiterplatten aufgetragen. Anschließend werden sie vorgeheizt. Daraufhin fahren die Leiterplatten über eine Welle aus flüssigem Lot. Schließlich erfolgt ein kontrolliertes Abkühlen.

Oberflächenmontierte Bauelemente (Surface Mounted Technology SMT) werden durch Wiederaufschmelzlötten (Reflow-Lötten) an der Leiterplatte befestigt und kontaktiert. Dazu wird zunächst im Siebdruckverfahren Lötpaste (z. T. auch Kleber) auf die Kontaktstellen der Leiterplatte aufgebracht. Danach bestückt man die Platte mit Bauteilen. Im Lötöfen erfolgt anschließend das eigentliche Lötten durch Wärmezufuhr. Dabei wird auch der evtl. aufgetragene Kleber ausgehärtet.

Das Wiederaufschmelzlötten der oberflächenmontierten Bauteile ist kostengünstiger und ermöglicht eine höhere Dichte von Bauteilen auf der Leiterplatte. Dadurch wurden Wellenlötten bzw. durchsteckmontierte Bauteile außerhalb Chinas aus vielen Anwendungen verdrängt. In China, welches ca. 50 % des Zinnbedarfs für Lötmaterialien beansprucht, beispielsweise für die Produktion von Haushaltselektronik (weiße Ware), ist Wellenlötten allerdings noch immer Standard. Auch allgemein in der Leistungselektronik sind durchsteckmontierte Bauteile nach wie vor gängige Elemente, insbesondere bei starker mechanischer Belastung oder hoher Strombelastung, bei welcher die Oberflächenmontierung keinen ausreichenden Halt gewährleistet. Beide Montagetechnologien können auch auf einer Leiterplatte kombiniert werden, indem durchsteckmontierte Bauteile an der Oberseite und oberflächenmontierte Bauteile an der Unterseite angebracht werden. Inzwischen gibt es auch Leiterplatten mit mehreren, durchkontaktierten Ebenen (Mehrlagenplatinen, Multi-Layer-Platten).

Als Alternativen zum Löten in der Elektronikbranche sind nach Angaben des internationalen Zinnverbands ITRI elektrisch leitende Klebstoffe, eingebettete Komponenten oder Einpresstechniken denkbar. Bisher konnten sie der Löttechnologie aber keine nennenswerten Marktanteile abnehmen.

4.8.2 Rohstoffinhalt

Prinzipiell müssen Lote folgende Kriterien erfüllen:

- Die Schmelztemperatur des Lotes muss unterhalb der Schmelztemperatur der zu lötenden Materialien liegen. Bei Elektronik Anwendungen sollte sie außerdem niedrig genug sein, um Polymerbestandteile mit geringer Hitzetoleranz nicht zu gefährden. Gleichzeitig muss die Schmelztemperatur oberhalb der Betriebstemperatur der Anwendung liegen, um ein ungewolltes Ablösen der Bauteile durch Wiederaufschmelzen des Lots auszuschließen.
- Das Lot muss Legierungen mit den Werkstoffen bilden können.

Zinn eignet sich dank seines niedrigen Schmelzpunktes und seiner Fähigkeit, Legierungen mit allen elektronikrelevanten Werkstoffen zu bilden, sehr gut für Lote. Es stellt daher auch die Basis aller bleifreien Lote dar, welche im Vergleich zu bleihaltigen Loten sogar wesentlich höhere Sn-Gehalte von 95–99 % aufweisen (KOTADIA et al. 2014). Dadurch kommen aber auch einige Schwächen des Zinns zum Tragen, woraus sich für die Legierungselemente einige Aufgaben ergeben (KOTADIA et al. 2014):

- Verbesserung der Benetzungseigenschaften durch Reduktion der Oberflächenspannung
- Bildung eines eutektischen Gemisches (s. o., Abb. 4.21) mit geeigneter Schmelztemperatur
- Unterdrückung der Phasenumwandlung von β -Sn zu α -Sn sowie Verhinderung von Whiskerbildung, welche das Gefüge und damit die mechanischen Eigenschaften negativ beeinflussen
- Optimierung mechanischer Eigenschaften (Dehnungsvermögen, Widerstand gegenüber Erwärmung, Erschütterung, etc.)

Geeignete Legierungselemente werden darüber hinaus nach ihren Kosten und ihrer Verfügbarkeit beurteilt. Erprobt wurden u. a. Ag, Bi, Cd, Cu, In, Sb, Zn, Al. Tab. 4.20 zeigt die chemische Zusammensetzung und den Schmelzpunkt einiger bleifreier Lote. Aus dem genannten Anforderungskatalog haben sich Sn–Cu, Sn–Ag, Sn–Ag–Cu als Favoriten für bleifreie Lote ergeben. Sn–Ag–Cu-Legierungen (genannt SAC-Legierungen) sind die am häufigsten verwendeten bleifreien Lote bei der Bestückung von Leiterplatten mit oberflächenmontierten Bauteilen (SMT, s. Technologiebeschreibung). Es kommen Zusammensetzungen zum Einsatz, die nah am Eutektikum liegen (s. Tab. 4.20). Die exakte Zusammensetzung des Eutektikums ist unbekannt. Aufgrund der drei statt zwei enthaltenen Elemente ist das Phasendiagramm wesentlich komplexer als jenes in Abb. 4.21. Sn–Ag–Cu ist jedoch aufgrund des enthaltenen Silbers teuer. Außerdem eignet sich diese Legierung weniger gut für das bei durchsteckmontierten Bauteilen übliche Wellenlöten. Hier ist Sn–Cu die gängige Alternative, weil diese Legierung kostengünstiger und besser verfügbar ist als Sn–Ag, welches jedoch bessere Benetzungsfähigkeiten und mechanische Eigenschaften aufweist (KOTADIA et al. 2014). Sn–Bi kommt ebenfalls zum Löten

Tab. 4.20: Zusammensetzung und Schmelzpunkte von bleifreien Loten

| Zusammensetzung | Schmelzpunkt in °C | Mikro-zusätze |
|--|--------------------|------------------------------|
| Sn-3,8Ag-0,7Cu (nah eutektisch), Sn-3,9Ag-0,6Cu, Sn-1Ag-0,5Cu, Sn-3Ag-0,5Cu, Sn-4Ag-0,5Cu | 217 | Co, Fe, Zn, Ni, Al, Bi |
| Sn-0,7Cu (eutektisch) | 227 | Zn, Ni |
| Sn-0,7Cu-0,05Ni+Ge | 227 | Ni, Ge |
| Sn-3,5Ag (eutektisch), Sn-2Ag | 221 | Bi, Zn |
| Sn-9Zn (eutektisch) | 198,5 | Cu, Ag |
| Sn-8Zn-3Bi | 189–199 | |
| Sn-20Bi-10In | 143–193 | |
| Sn-58Bi (eutektisch) | 138 | Al, Cr, Si, Nb, Pt, Cu |
| Sn-52In, Sn-50In | 118–125 | |
| Bi-33In (eutektisch) | 109 | |

durchsteckmontierter Bauteile zum Einsatz. Diese Legierung hat den Vorteil einer niedrigen eutektischen Temperatur, aber auch Nachteile, z. B. eine schlechtere Bindungsstärke. Indium- und Wismut-haltige Legierungen werden wegen der begrenzten Verfügbarkeit dieser Metalle vermutlich nur in Nischenanwendungen zum Einsatz kommen. Sn-Zn wird aufgrund schlechter Korrosionseigenschaften selten verwendet (KOTADIA et al. 2014).

Um die Eigenschaften der bleifreien Lote zu verbessern, werden weitere Elemente in Mikrokonzentrationen zugegeben (s. Tab. 4.20). So hat das patentgeschützte, mikrolegierte Lot SN100C (Sn-0.7Cu-0.05Ni+Ge) laut Herstellerangaben einen Anteil von 10 % am weltweiten Markt für Elektroniklote inkl. bleihaltiger Lote (CONSÉE 2014).

Zusätzlich können metallische oder keramische Nanopartikel die mechanischen Eigenschaften verbessern, indem sie eine Vergrößerung des Gefüges durch Kornwachstum verhindern (KOTADIA et al. 2014). Als metallische Nanopartikel können z. B. Co, Ni, Pt, Al, Cu, Zn, Ge, Ag, Sb, Au verwendet werden. Als keramische Nanopartikel sind beispielsweise Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , SiO_2 oder Kohlenstoffnanoröhrchen (s. Kapitel 4.41) geeignet.

Insgesamt ist festzustellen, dass es nicht ein bleifreies Standardlotmaterial für alle Anwendungen gibt, sondern die verschiedenen Legierungen konkurrieren und für spezifische Anwendungen optimiert werden (KOTADIA et al. 2014). Für das elektronische Hochtemperatur-Löten oberhalb 240 °C sind noch einmal andere Legierungen, z. B. Au-Sn, Au-Ge, Zn-Al, Zn-Sn, Bi-Ag oder Sn-Sb interessant (ZENG et al. 2012).

4.8.3 Foresight industrielle Nutzung

Die Bedeutung verschiedener Anwendungen für bleifreie Lote lässt sich über den entsprechenden Bedarf am Hauptbestandteil Zinn abschätzen. Der internationale Verband der Zinnindustrie ITRI schätzt, dass ca. 90 % des Zinnbedarfs für Lote auf die Elektronikbranche entfällt. Die restlichen 10 % werden für industrielle Anwendungen benötigt. Im Folgenden konzentrieren wir uns daher auf die Hauptanwendung Elektronik.

Als Wachstumstreiber für Haushalts- und Unterhaltungselektronik wird an erster Stelle der Anstieg des verfügbaren Einkommens pro Haushalt genannt (REPORTLINKER.COM 2015, TRANSPARENCY MARKET RESEARCH 2015a), welcher auch einer der vier wesentlichen Wachstumstreiber des Weltwirtschaftswachstums im Allgemeinen ist (HAWKSWORTH et al. 2015). Danach folgen fallende Produktpreise und ein weltweit steigendes Bewusstsein über Nutzen und Vorteile elektronischer Produkte. Technologiefortschritte bzw. innovative Produktentwicklungen stellen einen weiteren, wesentlichen Wachstumsfaktor dar. Insgesamt ergibt sich laut REPORTLINKER.COM (2015) für Haushalts- und Unterhaltungselektronik global von 2015 bis 2020 ein durchschnittliches jährliches Wachstum von ca. 3 %. Ein starkes Wachstum ist in Schwellen- und Entwicklungsländern, insbesondere in Asien, zu erwarten. Von den vielfältigen elektronischen Unterhaltungsprodukten (u. a. Fernseher, Computer, LapTops, Smartphones, Kameras, Audio-Anwendungen, Spielkonsolen), wird nur für Smartphones, Tablets und OLED-Fernseher ein Wachstum mit deutlich mehr als 3 % erwartet (REPORTLINKER.COM (2015)). Insgesamt sind derzeit jedoch keine ungewöhnlich hohen Wachstumsimpulse vom Segment Haushalts- und Unterhaltungselektronik zu erahnen. 2015 führte ein Abschwung in der chinesischen Elektronikindustrie sogar dazu, dass der weltweite Bedarf an Zinn um 3 % abnahm (ITRI 2015), vgl. auch Abb. 4.22.

Eine gewisse Steigerung des Bedarfs an elektronischen Komponenten kann von vernetzter Produktionstechnik (s. Kapitel 4.39) ausgehen.

ITRI geht von einem Wachstum der Elektronikbranche von 3–6 % aus und sieht China als den momentan größten Wachstumsmarkt.

Ein weiteres Anwendungsfeld für bleifreie Lote könnte sich aus dem zurzeit entwickelten Vakuumisolationsglas (VIG) für Fenster ergeben (vgl. Kapitel 4.25).

4.8.4 Foresight Rohstoffbedarf

Lote für elektronische Anwendungen

Es ist davon auszugehen, dass Löten auf absehbare Zeit die dominante Verbindungstechnik für

Leiterplatten bleibt (SWEATMAN, SUPERIOR 2006, KOTADIA et al. 2014), auch wenn andere Technologien (s. Kapitel 4.8.1) den Loten Marktanteile abnehmen könnten (CONSÉE 2014).

Die Entwicklung des Bedarfs an Lötmaterial pro Anwendung wird laut internationalem Zinnverband ITRI von folgenden Trends beeinflusst:

- Fortschritte in der Löttechnologie
- Miniaturisierung in der Elektronik

Verbesserungen in der Löttechnologie ermöglichen einen geringeren spezifischen Lötmaterialbedarf. Insbesondere der Übergang von Through-Hole-Technologie und Wellenlöten zu Surface-Mounted-Technologie und Wiederaufschmelzlöten (vgl. Kapitel 4.8.1) führt zu einem reduzierten Materialbedarf pro Lötstelle (ITRI). Außerhalb von China kommt das materialintensivere Wellenlöten nur noch selten zum Einsatz. In der chinesischen Elektronikbranche, welche ca. die Hälfte des weltweiten Bedarfs an Zinn für Lötmaterial verursacht, ist Wellenlöten noch immer Standard. Langfristig ist aber auch hier eine Umstellung zu erwarten, was sich reduzierend auf den Lötmaterialbedarf in 2035 auswirken wird. Weitere Einsparungen ergeben sich aus Verbesserungen bei der Rückgewinnung und

Vermeidung von Lötabfällen während der Produktion (ITRI).

Auch die Miniaturisierung elektronischer Bauteile und die entsprechende Verfeinerung der Löttechnologie tragen zu einem geringeren Bedarf an Lötmaterial bei (BURTON 2014). Andererseits wird für die neu entwickelten Multi-Layer-Leiterplatten mehr Lötpaste benötigt, als für herkömmliche Leiterplatten (TRANSPARENCY MARKET RESEARCH 2015b).

Der exponentielle Miniaturisierungstrend in der Elektronikbranche wird mit einer Faustregel, genannt Mooresches Gesetz, beschrieben. Intel-Mitbegründer Gordon Moore prognostizierte 1965, dass sich die Anzahl von Transistoren auf einem Chip jedes Jahr verdoppeln wird. Diese Faustregel hatte zunächst bis 1975 Bestand und wurde dann auf einen längeren Zeitraum korrigiert. Aktuell finden sich je nach Quelle 18, 20 oder 24 Monate als Bezugszeitraum. Gegenwärtig wird eine allmähliche Verlangsamung des Wachstums vermutet (NICCOLAI 2015). Moore selbst nimmt an, dass es innerhalb der nächsten zehn Jahre zu einer Sättigung und somit zum Ende der exponentiellen Miniaturisierung kommen wird (COURTLAND 2015).

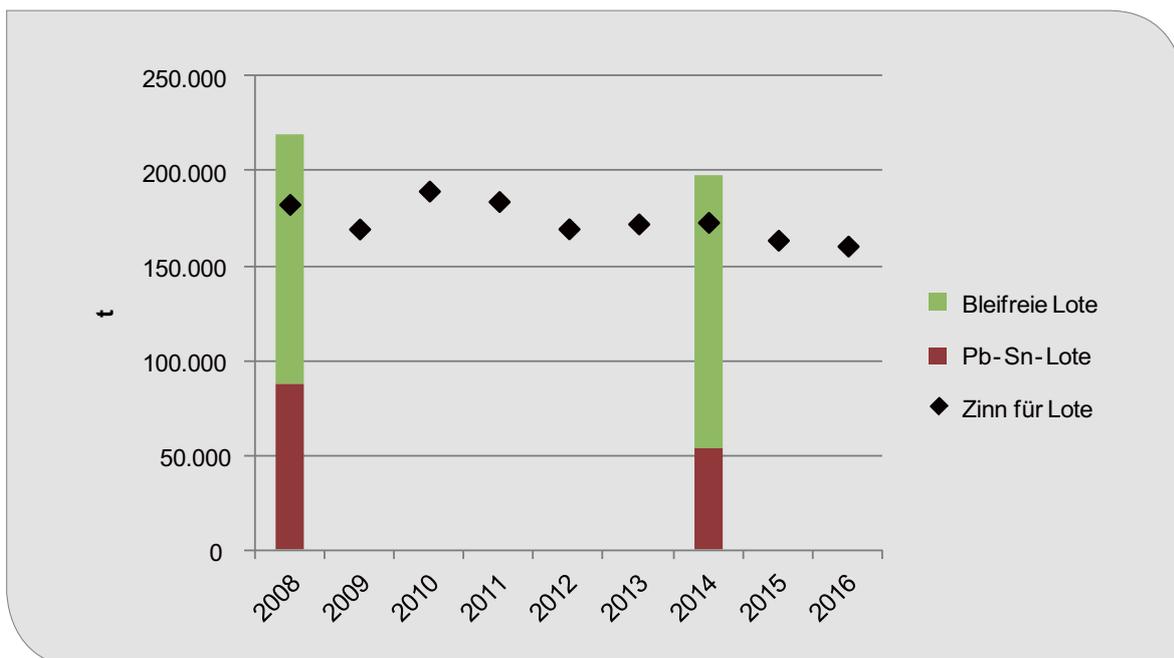


Abb. 4.22: Bedarf an Lötmaterial und dafür verwendetes Zinn in t, Werte übernommen oder berechnet nach Angaben von ITRI, z. B. ITRI (2015)

In den letzten Jahren haben Miniaturisierung und verbesserte Löttechniken trotz des Wachstums der Elektronikbranche zu leicht abnehmenden Bedarfen an Lotmaterialien geführt (Abb. 4.22). Wir schätzen die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate von 2008 bis 2014, basierend auf Angaben von ITRI, auf CAGR = -1,7 %. Auch wenn die Miniaturisierung von Elektronikkomponenten in den nächsten Jahren eine Sättigung erreicht, hat die langfristige Umstellung der Löttechnologie in China erhebliches Reduktionspotenzial des spezifischen Bedarfs. Wir gehen daher in Anlehnung an die Entwicklung der letzten Jahre vereinfacht davon aus, dass der weltweite Lötmittelbedarf bis 2035 trotz Wachstums der Elektronikbranche weiter mit CAGR = -1,7 % fällt.

Bleifreie Lote

Der Marktanteil bleifreier Lote betrug 2014 laut (IPC 2015) 73 % und ist somit gegenüber 2008 gestiegen (ca. 60 % (ITRI 2015)). Der steigende Marktanteil bleifreier Lote mit höherem Zinnanteil hatte eine steigernde Wirkung auf den Bedarf an Zinn für Lote, welcher somit flacher als der Gesamtbedarf an Loten abgesunken ist (vgl. Abb. 4.22). Von 2008 bis 2014 ergibt sich aus Daten des Branchenverbands ITRI eine durchschnittliche jährliche Wachstumsrate von CAGR = -0,7 %.

In IPC (2015) wird prognostiziert, dass der Marktanteil bleifreier Lote bis 2025 auf 89 % steigt. Als Gründe für den weiteren Anstieg werden die strenger Anforderungen der EU-ROHS2 (s. Kapitel 4.8.1) an bisher ausgenommene Bereiche (Medizin, Militär, Raumfahrt) gesehen. Darüber hinaus haben die Einschränkungen der ROHS-Richtlinien bleihaltige Lote vom Standardprodukt zum Nischenprodukt gemacht, was die verbliebenen Nutzer in den Spezialanwendungen vor Preisprobleme stellt und diese somit zum Umstieg motiviert (ITRI, IPC 2015).

Um das volle Potenzial der Technologie abzuschätzen, nehmen wir an, dass bleifreie Lote 2035 einen Marktanteil von 100 % haben werden. Desweiteren schätzen wir den Anteil von Zinn in bleifreien Loten auf durchschnittlich 97 % (vgl. Tab. 4.20). Wie Tab. 4.21 zeigt, ergibt sich aus unserem Szenario insgesamt eine Reduzierung des Zinnbedarfs für bleifreie Lote um ca. 23 % bis 2035. Entgegenwirken könnte diesem Trend die

Tab. 4.21: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf für zinnbasierte Lote in t

| Rohstoff | Produktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|----------|----------------------------|-------------|----------------------|
| Zinn | 289.790 (B) 362.996 (R) | 173.400 | 133.600 |
| Silber | 26.241 (B) | < 5.400 | < 5.200 |

B: Bergwerksförderung

R: Raffinadeproduktion

Markteinführung und Verbreitung von Vakuumisolationsglasfenstern mit bleifreiem Metalllotverbund (s. Kapitel 4.25). Insgesamt ist jedoch keine ungewöhnliche Erhöhung des Zinnbedarfs durch bleifreie Lote bis 2035 zu erwarten.

Nimmt man für eine Maximalwertabschätzung an, dass 2013 wie 2035 alle bleifreien Lote 3,8 % Silber enthalten, zeigt sich, dass bleifreie Lote heute und in Zukunft nur eine Nebenanwendung von Silber darstellen (Tab. 4.21). Der tatsächliche Bedarf dürfte deutlich geringer sein, da es einige Alternativen gibt, die sowohl blei- als auch silberfrei sind (s. Kapitel 4.8.2).

4.8.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Das Standardverfahren zum Recycling von Leiterplatten beginnt mit der mechanischen Zerkleinerung (Shreddern). Durch Schmelz- und Hüttenprozesse können anschließend Kupfer und Edelmetalle (Gold, Silber, Palladium und Platin) zurückgewonnen werden. In Umicores integrierter Metallhütte werden neben allen Edelmetallen auch zehn weitere Metalle, darunter Zinn, zurückgewonnen (HAGELÜKEN 2009). Itrimex hat einen auf Leiterplatten spezialisierten Recyclingprozess entwickelt, welcher nicht auf thermischen Verfahren, sondern auf anorganischen Lösemitteln beruht (ITRIMEX 2013).

In vielen afrikanischen und asiatischen Ländern wird das Recycling von Elektronikschrott ohne Umwelt- und Arbeitsschutzvorkehrungen und mit sehr geringen Rückgewinnungsraten durchgeführt. Durch illegalen Export gelangen auch große Teile des europäischen Elektroschrotts dorthin.

Über 60 % des Schrotts werden aufgrund falscher Entsorgung und illegalem Export nicht dem ordnungsgemäßen Recycling zugeführt (HAGELÜKEN 2009).

4.9 RFID – Radio Frequency Identification

4.9.1 Technologiebeschreibung

Radio Frequency Identification (RFID) bezeichnet eine Transponder-Technologie zur Identifizierung von Objekten, Tieren oder Personen über Funk. Ein Transponder-System besteht aus zwei Hauptkomponenten, dem Transponder (mobiler Datenträger, auch „Tag“ genannt) und dem Lesegerät (kann die Daten vom „Tag“ auslesen und ggf. auch verändern). Das Lesegerät ist in der Regel mit einer weiteren Dateninfrastruktur verbunden. Ein RFID-Transponder basiert auf einem Mikrochip mit einem Schaltkreis für einen miniaturisierten Receiver/Transmitter und einer Antenne, die meist auf einem Substrat befestigt ist. RFID-Tags sind in verschiedenen Bauformen erhältlich, darunter Smart Label („intelligente Etiketten“), Smart Tickets und Smart Cards.

Abb. 4.23 zeigt die Funktionsweise des RFID-Systems schematisch.

RFID-Tags werden hinsichtlich der Art ihrer Energieversorgung unterschieden. Passive Systeme befinden sich in einem Schlafzustand, bis sie mit einem (elektro-) magnetischen Feld in Berührung kommen. Aktive Systeme ermöglichen im Vergleich zu passiven Systemen weitere Funktionalitäten, indem z. B. Sensoren integriert und sie dauerhaft über eine Batterie mit Energie versorgt werden. Semi-passive Systeme haben eine Batterie, z. B. um periodisch Daten aufzuzeichnen, geben sie aber nur bei Aktivierung durch das Lesegerät ab. Für den massenhaften Einsatz kommen aufgrund der Kosten nur passive und in Zukunft ggf. semi-passive Tags in Frage.

Herstellung

Der Herstellungsprozess von RFID-Tags kann in vier Schritte unterteilt werden: die Herstellung des Integrierten Schaltkreises (IC), der Antenne und des Inlays sowie die Konversion in das Endprodukt (RAND EUROPE et al. 2012). ICs werden aus einem Wafer gefertigt, der in Chips geschnitten wird. Die Chips werden durch Flip-Chip Technologie entweder auf ein Trägermaterial oder direkt auf die Antennenverbindung montiert. Die Antenne wird

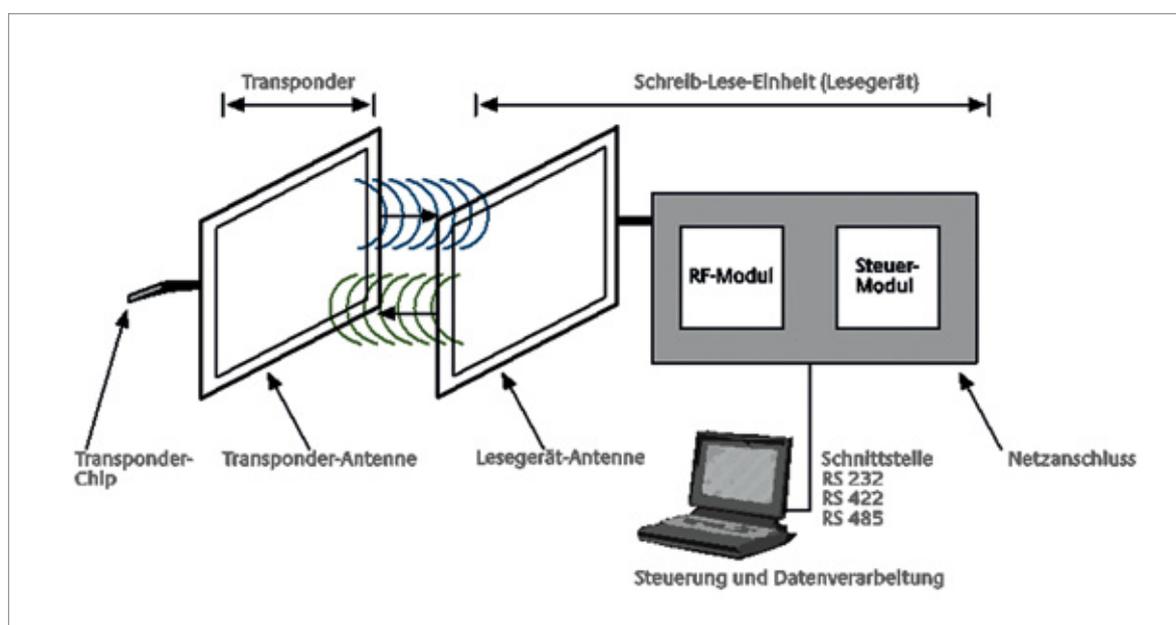


Abb. 4.23: Schematischer Aufbau eines RFID-Systems
(Quelle: IZT, EMPA, BSI 2004)

in subtraktiven Verfahren (insb. Ätzen von Kupfer- oder Aluminium-kaschiertem Laminat, Ausstanzen aus Aluminiumfolie) oder additiven Verfahren (u. a. Drucken mit Leitpasten auf Substrate) hergestellt. Das Inlay entsteht durch Kontaktierung der Antenne mit dem Chip auf dem Substrat. Häufig erfolgt eine Konversion in ein Smart Label, indem Papier mit Klebstoff als Deckschicht aufgebracht wird.

Anwendung

Die RFID-Technologie ist eine Querschnittstechnologie, deren Anwendungspotenziale in fast allen Wirtschafts- und Lebensbereichen liegen. Der Einsatz von RFID-Systemen eignet sich überall dort, wo automatisch gekennzeichnet, erkannt, registriert, gelagert, überwacht oder transportiert werden muss. Folgende Anwendungsgebiete von RFID sind hervorzuheben:

- Logistik – Tracking und Tracing (Post, Fluggepäck, etc.),
- Supply Chain und Inventory Management (Paletten, Kartons, etc.),
- Produktauthentifizierung und Diebstahlsicherung (Medikamente, Kleidung, etc.),
- produktbezogene Dienstleistungen (Mehrweg, Leihen, Archivieren etc.) und
- personenbezogene Anwendungen (Authentifizierung, Zugang, Zutritts- und Routenkontrollen, etc.).

Weitere Funktionalitäten sind z. B. die Überwachung von Tieren oder der Umwelt. RFID-Systeme erweitern die Funktionalitäten und Einsatzmöglichkeiten anderer Auto-ID-Systeme (Barcode-System, Chip-Karten, Optical Character Recognition OCR und Biometrie) und bieten hohe Effizienzsteigerungspotenziale. Chip-Karten können mit RFID-Technologie als kontaktlose Chipkarten kombiniert werden.

Tab. 4.22: Weltweite Verkaufszahlen an passiven RFID Tags unterteilt in HF und UHF [Millionen Stück] (Quelle: IDTECHEx 2014a, UHF – Ultrahochfrequenz, HF – Hochfrequenz, NFC – Near Field Communication)

| | Jahr 2013 | Jahr 2014 * |
|--|--------------|--------------|
| UHF | 3.029 | 3.845 |
| Einzelhandel | | |
| Kleidung und Schuhe | 2.250 | 3.000 |
| andere | 25 | 50 |
| Logistik, Rollcontainer, Beförderungsmittel | 125 | 125 |
| Asset Management/Lagerbestand/Dokumente | 450 | 475 |
| Medizin/Gesundheitswesen | 18 | 23 |
| Luftgepäck und Luftfracht | 72 | 74 |
| Zugangskontrolle und Ticketing | 1,5 | 2 |
| Embedded (eingebunden in ein Produkt, z. B. in einen PC) | 0,1 | 2 |
| Personen | 22 | 24 |
| Andere | 65 | 70 |
| HF | 2.182 | 2.479 |
| Smart Cards (Kontaktlose Karten/Anhänger) | 1.250 | 1.400 |
| Smart Tickets | 600 | 700 |
| Bücher | 90 | 95 |
| Medizin | 22 | 28 |
| Assets/Werkzeuge | 105 | 110 |
| Pässe | 75 | 80 |
| Personen | 5 | 6 |
| NFC Anwendungen (ohne Bezahlung) | 10 | 30 |
| Andere | 25 | 30 |

* Schätzungen für 2014

Im Jahr 2013 wurden weltweit rund 5,2 Mrd. passive RFID-Tags verkauft, im Jahr 2014 geschätzte 6,3 Mrd. passive RFID-Tags (IDTechEx 2014a). Tab. 4.22 zeigt die jährlichen Verkaufszahlen nach Einsatzbereichen unterteilt in Hochfrequenz (HF) und Ultrahochfrequenz (UHF) Tags.

Haupteinsatzbereiche für passive RFID-Tags sind Smart Label im Einzelhandel (Kennzeichnung einzelner Kleidungsstücke und Schuhe) sowie Smart Cards und Smart Tickets (Authentifizierung und Zutrittskontrolle). In Smart Labels kommt sowohl die HF- (13,56 MHz) als auch die UHF-Technologie (über 800 MHz) zum Einsatz. Smart Labels dienen wie herkömmliche Etiketten dazu, Objekte zu identifizieren und über diese zu informieren. Smart Labels kommen beispielsweise zum Supply Chain Management bei der METRO Group und bei Garry Weber im großen Maßstab zum Einsatz.

Den Anwendungsvorteilen von RFID-Systemen stehen Fragen von Datenschutz und Sicherheit, die Kosten und teilweise auch technische Probleme entgegen. Die Interferenz der Radiowellen mit Wasser (u. a. Lebensmittel) und Aluminium (u. a. Verpackung) verlangt spezielle technische Lösungen zur Gewährleistung der Funktionalität z. B. von Lebensmittelverpackungen. Um die Anwendung auf Massenprodukten zu ermöglichen, strebt die Anwenderseite eine Kostenreduktion von heute rund 10 Cent (RFID JOURNAL 2015) auf unter 1 Cent pro Tag an. Zusätzlich zu den Kosten für RFID-Tags und Lesegeräte müssen Unternehmen oft auch Middleware kaufen, um RFID-Daten filtern und in ihre EDV integrieren zu können. Potenzielle RFID-Anwender stehen vor der Wahl, ein neues RFID-System aufzubauen oder andere Wege zu verfolgen, wie z. B. die Verwendung ohnehin vorhandener Überwachungskameras in Verbindung mit leistungsfähigen Bilderkennungsverfahren zur Vermeidung von Out-of-Stock Situationen im Einzelhandel (KALLMAYER 2015).

Hauptentwicklungsziele sind die Verbesserung der Produktionstechnik, die Kostenreduktion und eine Erweiterung der Funktionalitäten wie z. B. ergänzende Produktinformationen, Verringerung von Out-of-Stock Situationen und die Erhöhung von Erfassungsraten bei der Pulklesung z. B. für Selbstkassieren. Voraussetzung für einen massenhaften Einsatz sind zudem Standardisierungen, u. a. der Informationsformate.

In Deutschland gibt es eine Reihe bedeutender Hersteller und Anwender von RFID-Systemen. Zu den wichtigsten Anwendungsbranchen gehören der Handel und die Konsumgüterindustrie (u. a. Metro Group), die Automobilindustrie (u. a. Mercedes-Benz) und die Kurier-, Express- und Paketbranche (u. a. DHL). Auch auf Seiten der Produktion sind in Deutschland Schlüsselakteure ansässig, sowohl auf Ebene der Komponenten wie z. B. Chips (z. B. NXP), als auch der Systemintegratoren (u. a. Siemens, SAP). Der Weltmarktführer für RFID-Technologie SMARTRAC stellt Inlays und Tags auch in Deutschland her. Neben diesen Firmen von Weltrang gibt es darunter aber auch viele innovative mittelständische Betriebe wie TBN und Feig Elektronik.

4.9.2 Rohstoffinhalt

RAND EUROPE et al. (2012) haben, aufbauend auf dem Technischen Report ISO/IEC TR 24729-2:2007 (ISO/IEC TR 2007), Interviews mit Stakeholdern in der Herstellung eigener empirischer Analysen von Label-Größen, die stoffliche Zusammensetzung von heutigen Smart Labels abgeschätzt.

Das Gesamtgewicht der passiven RFID-Tags (ohne Deckschicht) wird wesentlich durch das Antennenmaterial (Kupfer, Aluminium oder Silber) und die Tag-Fläche bestimmt. Für das IC-Bumping kommt neben Gold auch Palladium oder Nickel zum Einsatz (KALLMEYER 2015). Die additive Abscheidung von Aluminium (z. B. die Firma Tagoes) und das Elektroplating von Kupfer (z. B. die Firma BESI (2015)) sind Stand der Technik. Der französische Hersteller Tagoes hat einen additiven Prozess für die Antennenherstellung entwickelt, für den 10–100-mal weniger Aluminium als für konventionelle subtraktive Prozesse benötigt wird (RAND EUROPE et al. 2012).

Chemieunternehmen wie DuPont, Henkel und Hareus bieten für die massenhafte kostengünstige Herstellung von RFID-Tags im Druckverfahren verschiedene elektrisch leitende Tintensysteme an. Leittinten (oder Leitpasten) bestehen aus einem Polymer-Bindemittel, einem leitfähigen Material und einem Lösungsmittel, das sich nach dem Auftrag verflüchtigt. Silberbasierte Tinten haben den Vorteil, dass sie bei Oxidation – im Gegensatz zu kupferbasierten Systemen –

Tab. 4.23: Stoffliche Zusammensetzung von RFID Labeln [mg] (Quelle: RAND EUROPE et al. 2012; IC – Integrierter Schaltkreis, ACP – Adhesive Conductive Paste)

| Komponente | Material | Label-Größe | | |
|-------------|---------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| | | 4171 mm ² | 2219 mm ² | 894 mm ² |
| Deckschicht | PP | 183,9 | 100,7 | 40,6 |
| | Papier | 375,1 | 199,6 | 80,4 |
| Klebstoff | Acrylat | 84,4 | 44,9 | 18,1 |
| IC | Silizium | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| IC bumps | Gold | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| ACP | Epoxy-basiertes Material | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| ACP Metall | Nickel | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Klebstoff | Polyurethan | 28,5 | 15,2 | 6,1 |
| Antenne | Kupfer | 267,4 | 142,3 | 57,3 |
| | Aluminium | 38,6 | 20,5 | 8,3 |
| | Silber (gedruckt) | 28,0 | 14,9 | 6,0 |
| | Bonding Agent (gedruckt) | 11,8 | 6,3 | 2,5 |
| Substrat | PET | 290,7 | 154,7 | 62,3 |
| Klebstoff | Acrylat | 112,9 | 60,1 | 24,2 |
| Gesamt | nach Antenne (ohne Deckschicht) | Cu: 784,2 | Cu: 417,5 | Cu: 168,3 |
| | | Al: 555,4 | Al: 295,7 | Al: 119,3 |
| | | Ag: 556,7 | Ag: 296,4 | Ag: 119,5 |

ausreichende Leitfähigkeit beibehalten (KALLMAYER 2015). Sie werden in den größeren und reiferen Märkten verwendet (IDTECHEx 2013). Der Silberanteil der Pasten variiert nach verschiedenen Patentangaben zwischen ca. 30 % und 95 % mit typischen Werten um 60–70 % (STEIGER 2008).

4.9.3 Foresight industrielle Nutzung

Aktuelle Studien mit Angaben zu zukünftigen Stückzahlen jährlich verkaufter RFID-Tags sind in der Regel kostenpflichtig. Der typische Zeitraum für die Zukunftsprojektionen liegt bei fünf bis zehn Jahren, für größere Zeiträume sind keine Zukunftsaussagen zu Stückzahlen jährlich verkaufter RFID-Tags bekannt.

Eine IDTechEx Projektion (RAND et al. 2012) gibt die weltweiten Verkaufszahlen an passiven RFID-Tags für das Jahr 2021 mit 243 Milliarden Stück an. Aufbauend auf diesen Zahlen ist von RAND et al. (2012) in einem nicht nachvollziehbaren Verfahren die zukünftige Marktentwicklung für passive RFID-Tags in Europa bis 2026 abgeschätzt wor-

den. Auch die Allokationen nach Tag-Größen und -Typen (u. a. Chipless) sind nicht nachvollziehbar. RAND et al. (2012) geben die Antennenmarktanteile im Jahr 2011 für Aluminium mit 90 %, Kupfer mit 9 % und Silber mit 1 % an. Allerdings geht IDTECHEx (2014b) von einem derzeitigen Marktanteil von 5 % für Silber aus. Für das Jahr 2012 entfallen von den weltweit verkauften 243 Milliarden RFID-Tags rund 35 Milliarden RFID-Tags auf Europa (RAND et al. 2012).

Die mittel- bis langfristigen Prognosen des Marktes für RFID galten in der Vergangenheit oft als überzogen (KALLMAYER 2015). Insbesondere für das massenhafte Item-Level-Tagging einer großen Bandbreite an Konsumgütern gibt es aber derzeit kaum Anhaltspunkte. RAND et al. (2012) geben für die verkauften RFID-Tags auf Konsumgütern (ohne Kleidung und Schuhe) in Europa einen Sprung von 1.049 Milliarden (2018) auf 5.338 Milliarden (2019) an. Auch danach soll dieser Markt weiter exponentiell wachsen. In klar definierten Bereichen wie der Authentifizierung hochpreisiger und gesundheitsrelevanter Güter werden RFID-Tags sicher eine Zukunft haben. Auf dem Bekleidungs-

markt ist durch RFID-Systeme ein klarer Mehrwert durch Verringerung von Out-of-Stock Situationen darstellbar. Hier greifen optische Erkennungsverfahren wie der 2D-Barcode oder Kamerasysteme nur schwer (KALLMAYER 2015).

Für Deutschland liegen (lückenhafte) Schätzungen für das theoretische Potenzial von jährlich verkauften RFID-Tags vor (ERDMANN et al. 2009). Insgesamt wird dieses theoretische Potenzial auf mindestens 308,6 Milliarden RFID-Tags pro Jahr geschätzt (23,15 Mrd. Stück für Distribution, 272 Mrd. Stück für Einwegverpackungen, 0,35 Mrd. Stück für Mehrwegsysteme, 8 Mrd. Stück für Konsumgüter und 5 Mrd. Stück für personenbezogene Anwendungen). Die Posten Kühlkette, Archivierung und Smart Cards fehlen.

Für den Foresight industrielle Nutzung werden zwei Projektionen erstellt:

- Projektion A: Hochskalierung des Mengengerüstes nach RAND et al. (2012) von Europa auf die Welt (Faktor 7, der europäische Anteil am RFID-Tag-Weltmarkt betrug 2013 etwa ein Siebtel, vgl. RAND et al. 2012) und Verlängerung von 2026 bis 2035 (Faktor 2, vorsichtige Abschätzung).
- Projektion B: Ergänzung des theoretischen Potenzials für Deutschland nach IZT & EMPA (2009) um fehlende Posten (Annahmen: Anzahl der RFID-Tags für Smart Cards doppelt so hoch wie für Smart Tickets; RFID-Tags für Mehrwegsysteme hochgerechnet mit Faktor 10 für das Marktpotenzial 2022). Hochrechnung auf Europa (personenbezogene Anwendungen nach Bevölkerung hochgerechnet, alle anderen nach Bruttosozialprodukt), Hochskalierung auf die Welt (Faktor 7) und Verlängerung von 2026 bis 2035 (Faktor

2) wie bei Projektion A. Annahme, dass 1 % des theoretischen Potenzials bis 2035 ausgeschöpft ist.

Gemäß Projektion A würden im Jahr 2035 rund 2.100 Milliarden RFID-Tags weltweit jährlich verkauft, gemäß Projektion B wären es rund 85.000 Milliarden RFID-Tags. Dies ist ein erhebliches Wachstum mit einer großen Bandbreite. Zur Erinnerung: Im Jahr 2013 waren es 5,2 Milliarden, im Jahr 2014 6,3 Milliarden passive RFID-Tags.

4.9.4 Foresight Rohstoffbedarf

Zur Berechnung des globalen Rohstoffverbrauchs für RFID im Jahr 2013 werden die stofflichen Angaben gemäß RAND et al. (2012) und die Marktangaben von IDTECHEx (2014a) herangezogen. Der Marktanteil der verschiedenen Tag-Größen ist von uns in Ermangelung anderer Informationen gleichgewichtig angenommen worden, der Antennenanteil für Silber zu 5 %, Kupfer zu 20 % und Aluminium zu 75 %.

Für die Bedarfsvorschau 2035 ist das Mengengerüst aus dem vorigen Kapitel 4.9.3 angesetzt worden. Um der noch in geringem Umfang möglichen Materialeffizienz gerecht zu werden, wurden die Materialbedarfe nur für kleine RFID-Tags angesetzt. Aus den drei Szenarien für die Antennenmaterialanteile im Jahr 2026 von RAND et al. (2012) wurden von uns jeweils die Mittelwerte für den Aluminium-, Kupfer- und Silberanteil genommen und für 2035 angesetzt. RAND EUROPE et al. (2012) projizieren die zukünftigen Anteile von Antennenmaterialien (HF und UHF Label kombiniert) im Jahr 2026 auf 1–4 % für Silber, 3–15 % für Kupfer und 84–96 % für Aluminium.

Tab. 4.24 Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf für RFID-Tags in t

| Rohstoff | Produktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|-----------|----------------------------------|-------------|----------------------|
| Kupfer | 18.365.341 (B) 21.446.333 (R) | 162 | 10.800–436.000 |
| Aluminium | 47.811.880 (R) | 87,8 | 15.400–625.000 |
| Silber | 26.241 (B) | 4,25 | 251–10.100 |
| Nickel | 2.601.745 (B), 1.955.132 (R) | 0,052 | 21–846 |

B: Bergwerksproduktion

R: Raffinadeproduktion

Insgesamt halten wir aus heutiger Sicht die untere Projektion für die realistischere. Die durch passive RFID-Tags induzierten Kupfer- und Aluminiummengen sind isoliert gesehen gering. Auch die Einflüsse auf die Nickelnachfrage sind vernachlässigbar.

Nur unter den Annahmen der Projektion B könnten 2035 mehr als ein Drittel der heutigen Silberproduktion für RFID-Tags benötigt werden. Zwar läge der Antennenmaterialanteil von Silber 2035 nur bei 2 %, die weitreichende Durchdringung der Welt mit RFID würde dennoch eine nennenswerte Silbernachfrage induzieren. Gemäß der Vorgängerstudie (ANGERER et al. 2009) hielten es die im Jahr 2008 interviewten Experten nicht für möglich, dass die Antennen für RFID-Tags ohne silber-basierte Leitpasten massenhaft im Druckverfahren hergestellt werden können; diese Auffassung hat sich in dieser Studie mit der additiven Abscheidung von Aluminium und dem Elektroplating von Kupfer als Stand der Technik geändert.

Womöglich liegt auch der heutige Silberbedarf für RFID schon viel höher. Nach FORTIS BANK (2008) wurden 2006 bereits 10 t Silber für RFID-Tags eingesetzt und nicht wie in dieser Abschätzung für 2013 gut 4 t. GFMS gibt an, dass für RFID-Tags im Jahr 2010 bereits zwischen 31 und 62 t Silber benötigt wurden („with a long way to go before reaching full market“ (GFMS 2011)). Zum Vergleich: Alleine die Solarbranche verbrauchte im Jahr 2012 rund 1.100 t Silber-Flake Tinte (IDTECHEx 2013). Die Diskrepanzen in den Angaben des heutigen Silberbedarfs für RFID-Tags können zu einem Großteil mit dem hier angesetzten produktspezifischen Silbergehalt erklärt werden, im Gegensatz zu dem prozessspezifischen Silberbedarf in den Marktforschungsstudien. Aufgrund des hohen Wertes von Silber wird angenommen, dass das Recycling prozessspezifischer Abfälle in großem Maßstab erfolgt.

In einem Extremszenario könnte der Silberbedarf 2035 auch eine Größenordnung oberhalb der Werte in Tab. 4.24 liegen. Ursachen wären insbesondere höhere Silbergehalte pro Tag (insbesondere HF-Tags) und ein höherer Antennenmarktanteil. Der Silberbedarf pro Tag lag in obiger Abschätzung eher im unteren Bereich. Nach KALLMEYER (2015) benötigen HF-Tags in etwa das fünffache von UHF-Tags an Antennenmaterial. Angesichts der Differenzierung bei Materialien für

Leitpasten ist jedoch ein eher moderater Verlauf realistisch.

4.9.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Insgesamt ist die Materialeffizienz bei RFID-Antennen weitgehend ausgereizt. Bei UHF-Tags, die keine hohe Leitfähigkeit benötigen, wird das Antennenmaterial bereits in dünnen Schichten aufgetragen. Bei HF-Tags sind einer Verringerung des Antennenmaterials enge physikalische Grenzen gesetzt (KALLMEYER 2015).

Nanotechnologische Innovationen und verschiedene Marktanforderungen haben zu einer großen Produktvielfalt bei Leittinten geführt, darunter Graphen, CNT, Leitfähige Polymere, Silber- und Kupfer-Nanopartikel. Diese Innovationen besetzen heute noch Marktnischen. IDTECHEx (2014b) vermutet, dass der Marktanteil von Silber-basierten Leitpasten zukünftig von Kupfer-Nanopartikeln ersetzt werden wird.

In Zukunft ist es eventuell möglich sein, den RFID-Tag direkt auf ein Produkt oder eine Verpackung aufzudrucken, wobei dann eventuell kein Substrat erforderlich ist.

Für passive RFID-Tags gibt es derzeit noch keine nennenswerten Recyclingsysteme. Die ökonomischen Anreize für eine Kreislaufführung gebrauchter RFID-Tags sind aufgrund der Feinverteilung gering. Mit steigendem Silbergehalt könnte dies jedoch lohnender werden. Die heutigen Recyclingverfahren für Silber aus RFID-Tags mit Papiersubstrat belassen rund 85 % des Silbers in der Zellulose (ISO & IEC 2007), weshalb auch das Recycling keine nennenswerte Entlastung verspricht. Hier besteht ggf. Entwicklungsbedarf von Recyclingsystemen zur Wiedergewinnung von Silber.

4.10 Indium-Zinn-Oxid (ITO) in der Displaytechnik

4.10.1 Technologiebeschreibung

Die Display-Technologie hat sich in den letzten Jahren zu einer typischen Querschnittstechnologie

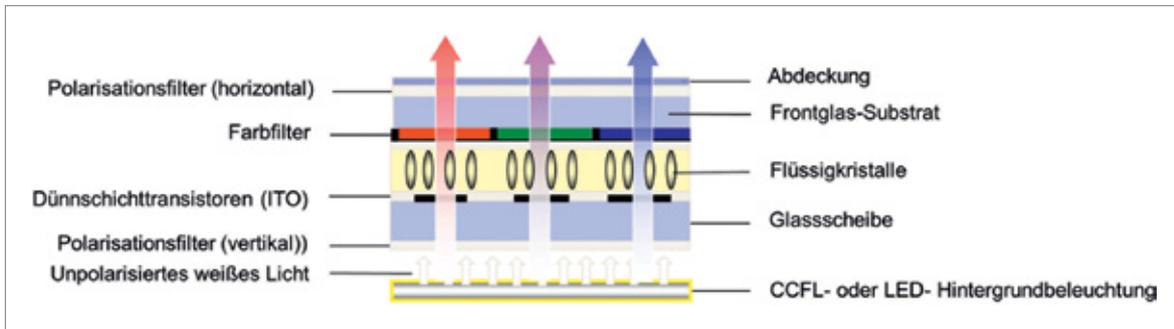


Abb. 4.24: Schematischer Aufbau eines LC-Display
(Quelle: eigene Darstellung)

entwickelt, deren Anwendung in vielen Bereichen zu finden ist. War es früher die Kathodenstrahlröhre, die als Fernsehgerät oder als Computer-Monitor Informationen sichtbar gemacht hat, so sind heute eine Vielzahl verschiedener flacher Bildschirme im Einsatz, die in Notebooks, Digitalkameras oder in Fahrzeugen zu finden sind oder in Bahnhöfen und Flughäfen zur großformatigen Information dienen. Für die Informationsgesellschaft gewinnen sie weiter an Bedeutung: die Nutzer sind immer stärker auf die optische Mensch-Maschinen Schnittstelle angewiesen, und als Touchscreens ermöglichen sie sogar die Steuerung von Geräten (BEHRENDT et al. 2008).

Flachbildschirme haben in den letzten Jahren gegenüber Kathodenstrahlröhren (Cathode Ray Tube CRT) deutlich Marktanteile gewonnen. Die konventionelle CRT-Technologie, die bis zum Jahr 2000 nahezu die einzig verfügbare Massentechnologie war, wird nur noch in speziellen Anwendungen verwendet. Flachbildschirme auf Basis von Flüssigkristallen (Liquid Crystal Displays LCDs) dominieren den Displaymarkt, nachdem die Hersteller die Produktion von Plasmabildschirmen in den Jahren 2013 und 2014 eingestellt haben (KATZMEYER 2014). Field Emitter Displays (FED) befinden sich im Demonstrationsstadium und bis jetzt wurden keine kommerziellen Displaygeräte auf den Markt gebracht. OLED-Displays sind zwar in geringen Abmessungen kommerziell verfügbar, ihr Marktanteil ist aber derzeit gering. OLED-Displays werden derzeit hauptsächlich in Navigationsgeräten, Autoradios, MP3-Playern und für Preisauszeichnungen in Supermärkten eingesetzt. Die Industrie versucht aber derzeit auch im Fernseh- und Tabletmarkt und andere Märkte mit größeren Bildschirmen einzusteigen (DISPLAYSEARCH 2014).

OLED gilt technologisch wie wirtschaftlich als eine aussichtsreiche neue Flachbildschirmtechnologie, die in Zukunft die LCD-Technologie vom Markt verdrängen könnte. Im Vergleich zu anderen Display-Technologien sind die selbstleuchtenden, schnell reagierenden OLEDs sehr viel leichter und brauchen weniger Strom. OLED-Displays haben eine hohe Auflösung, einen großen Betrachtungswinkel, sind sehr flach und biegsam (BEHRENDT et al. 2008).

Als transparente Elektrode werden leitfähige transparente Oxide eingesetzt (TCO, transparent con-

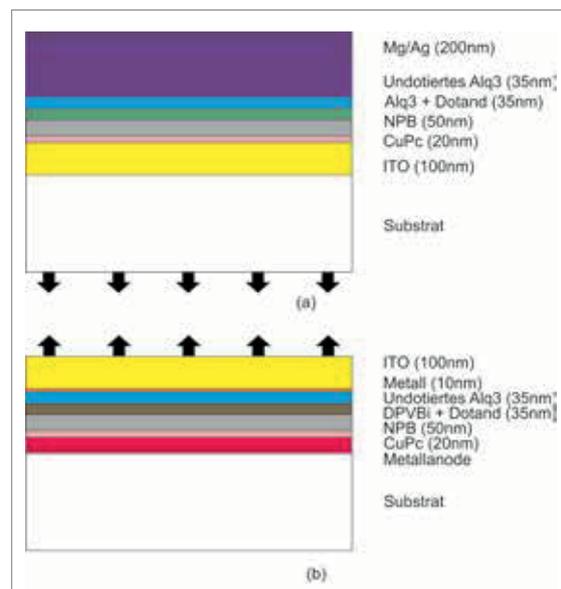


Abb. 4.25: Schematischer Aufbau eines OLED, a) Down-Emitting Stack, b) Up-Emitting Stack
(Quelle: eigene Darstellung angelehnt an STEINFELDT et al. 2004)

ductive oxide), meist dotiertes ZnO oder SnO₂. ZnO wird dabei z. B. mit Aluminium dotiert und SnO₂ mit Indium (ITO, Indium Tin Oxide) oder mit Fluor. Als eine weitere kostengünstigere Alternative zu ITO hat ein englisches Konsortium ein Verfahren entwickelt, Antimonzinnoxid (ATO) als transparente Elektrode auf Glas zu drucken. ATO besteht aus 90 % Zinn und 10 % Antimon, das preisgünstiger und leichter verfügbar als Indium ist (BUSH 2006).

In LCDs, OLEDs, PDPs und FEDs wird ITO zur Herstellung der Elektrodenschichten benutzt. Im Folgenden werden die Aufbauprinzipien von LCDs, OLEDs, PDPs und FEDs beschrieben.

Liquid Crystal Display (LCDs)

LCDs werden in vielen Prozessschritten hergestellt, um die verschiedenen Funktionsschichten zu strukturieren und aufzubringen. Die ITO-Schicht wird auf der vorderen und hinteren Glasplatte als Elektrode aufgebracht (Abb. 4.24). Danach wird eine Polymerschicht auf ein Glassubstrat aufgebracht. Diese Schicht wird so strukturiert, dass sie die spätere Ausrichtung der LC-Moleküle

ermöglicht. Die beiden Glasplatten werden ausgerichtet, zu einem Panel zusammengefügt und im Heißpressofen ausgehärtet. Danach erfolgt die Befüllung mit Flüssigkristallen und Aufbringung der Polarisationsfolien (FRAUNHOFER IZM 2007, STEINFELDT et al. 2004).

Organic Light Emitting Diode Display (OLED-Displays)

Bei der Herstellung von OLED-Displays wird pro Stack (siehe Abb. 4.25) auf ein Glassubstrat die transparente ITO-Schicht aufgebracht. In den nächsten Schritten werden alle anderen organischen und metallischen Schichten (u. a. Silber) durch Verdampfen appliziert. Anschließend wird die Frontscheibe angebracht und das ganze Luftdicht verkapselt (FRAUNHOFER IZM 2007, STEINFELDT et al. 2004).

Plasma Display Panel (PDP)

In Plasmadisplays (PDPs) befindet sich ein Neon/Xenon-Gasgemisch in kleinen Zellen zwischen

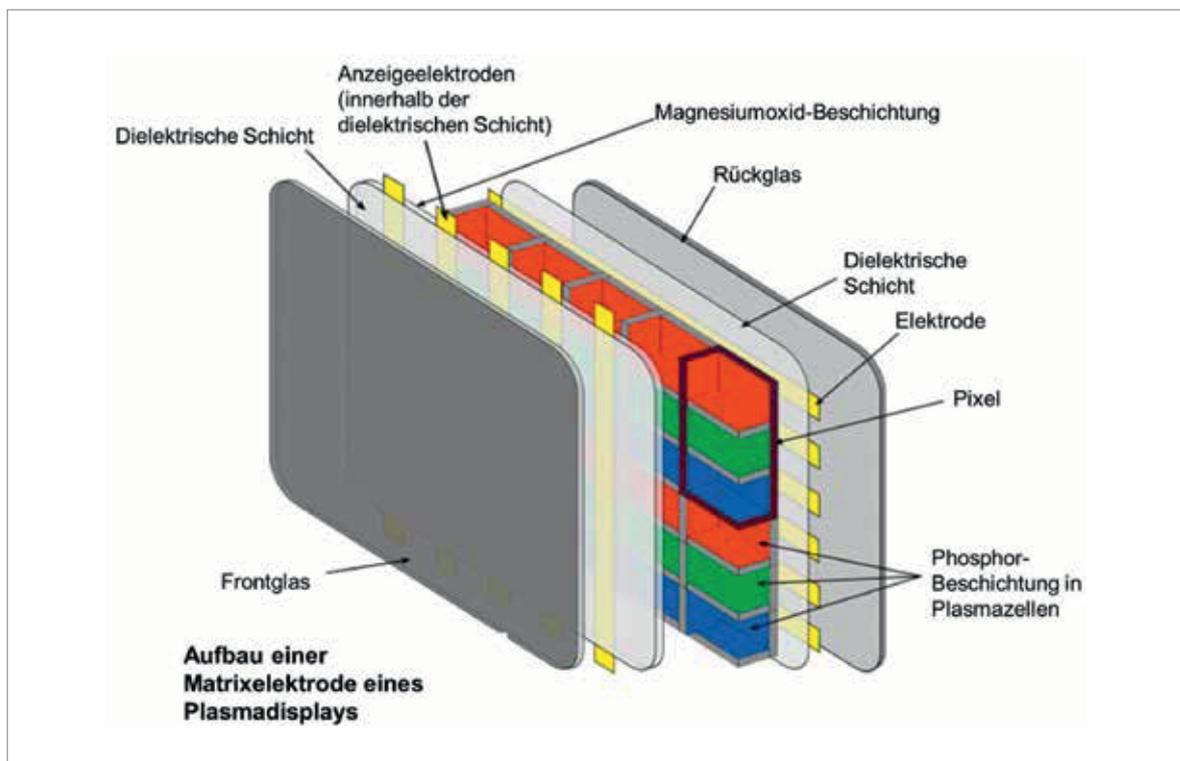


Abb. 4.26: Schematischer Aufbau eines PDPs

(Quelle: J. J. Laamanen, WIKIMEDIA, Free Art License 1.3 (FAL 1.3))

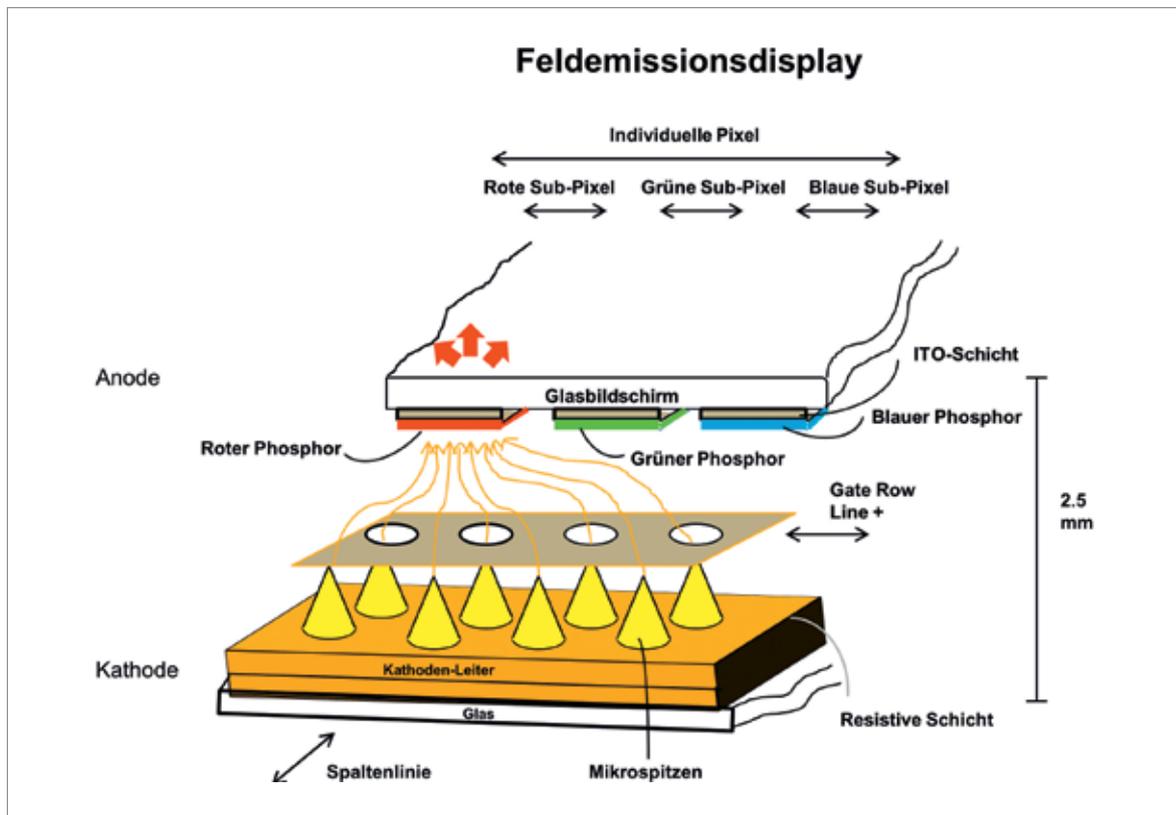


Abb. 4.27: Schematischer Aufbau eines Field Emitter Displays
(Quelle: eigene Darstellung angelehnt an Pix Tech Inc)

zwei Glasplatten, auf denen die Elektroden aufgedampft sind. Die Anode besteht aus einer ITO-Schicht. Drei dieser Zellen bilden ein Pixel, die sich in ihrer Wandbeschichtung unterscheiden. Der Unterschied liegt in der Leuchtstoffmischung. Wenn eine Spannung zwischen den beiden Elektroden angelegt ist, bildet das Gas ein schwach ionisiertes Plasma, welches UV-Licht aussendet. Die UV-Strahlung aktiviert die Leuchtstoffe und sichtbares Licht wird von jedem Pixel ausgesendet.

Field Emitter Displays

Ein Field Emitter Display (FED) wendet das Prinzip der Kathodenstrahlröhre auf jeden einzelnen Pixel an. Ein Field Emitter emittiert Elektronen, welche eine Leuchtstoffbeschichtung anregen. Ein FED besteht aus einer rückwärtigen Platte mit der Kathodenschicht, einer Vakuumlücke und einer Frontplatte aus Glas mit einer auf der Innenseite gelegenen ITO-Schicht als Anode. Die Technik wurde bis jetzt jedoch nicht auf den Markt gebracht.

4.10.2 Rohstoffinhalt

Der Indiumgehalt von LCD-Bildschirmen aus den unterschiedlichen Anwendungen stammt aus chemischen Analysen von LCD-Panelen (ROTTER et al. 2013), ergänzt um die Analyse von LCDs aus Tablets, bei denen mit dem gleichen Verfahren der Indiumgehalt bestimmt wurde (UEBERSCHAAR 2008). Die Schichtdicke von ITO im OLED-Display beträgt 100–150 nm (HAUSDORF 2014). Hier wird angenommen, dass die ITO-Schicht 125 nm dick ist bei einer Dichte von $7,14 \text{ g/cm}^3$ (UMICORE o. J.). Typischerweise setzt sich Indium-Zinn-Oxid aus 90 % In_2O_3 und 10 % SnO_2 zusammen (UMICORE o. J.). Werden die Atommassen der Elemente beachtet, besteht demnach ITO zu 74 % aus Indium.

Der Indiumgehalt in mg/m^2 wurde zur Abschätzung des Indiumbedarfs für den Gesamtdisplaymarkt auf Displays unterschiedlicher Größe umgerechnet. Für Smartphones, Monitore und Fernseher wird ein Seitenverhältnis von 16 zu 9, für Tablets und Laptops von 3 zu 4 und für Mobiltelefone von 2

Tab. 4.25: Indiumgehalt der Displays unterschiedlicher Technologien und Größen

| | Indium/g/Gerät | | Indium/g/Gerät |
|-----------------------|----------------|------------------------|----------------|
| LCD-TV (36") | 0,23 | OLED-TV (36") | 0,24 |
| LCD-PC-Monitor (21") | 0,08 | OLED-PC-Monitor (21") | 0,08 |
| LCD-Laptops (12") | 0,04 | OLED-Laptops (12") | 0,03 |
| LCD-Tablet (10") | 0,01 | OLED-Tablet (10") | 0,02 |
| LCD-Mobiltelefon (2") | 0,001 | OLED-Mobiltelefon (2") | 0,001 |
| LCD-Smartphone (4,5") | 0,005 | OLED-Smartphone (4,5") | 0,004 |
| PDP-TV (48") | 0,34 | | |

zu 3 angenommen. Der berechnete Indiumgehalt der Displays unterschiedlicher Technologien und Größen findet sich in Tab. 4.25.

4.10.3 Foresight industrielle Nutzung

Die Prognose der Displayverkäufe stützt sich auf Marktprognosen für weltweite Verkäufe von Flachbild-Fernsehern und -Monitoren, Laptops, Tablets, Smartphones und Mobiltelefonen (IDC o. J., JEFFE-

RIES & COMPANY o. J., IDC o. J. b, GARTNER 2009, DISPLAYSEARCH 2012, IC INSIGHTS o. J., MCKINSEY 2011). Die Entwicklung der Marktanteile bis 2020 der jeweiligen Displaytechnologie (OLED, LCD) wurden von MCKINSEY (2011) übernommen. Das Verschwinden der LCD-Technologie bis 2035 wurde s-kurvenförmig modelliert, genauso wie das Wachstum der OLED-Technologie in den verschiedenen Marktsegmenten. Dabei bleibt der Marktanteil jedes Marktsegmentes am Gesamtmarkt über die Zeit ungefähr gleich; nur Mobiltelefone werden fast vollständig von Smartphones

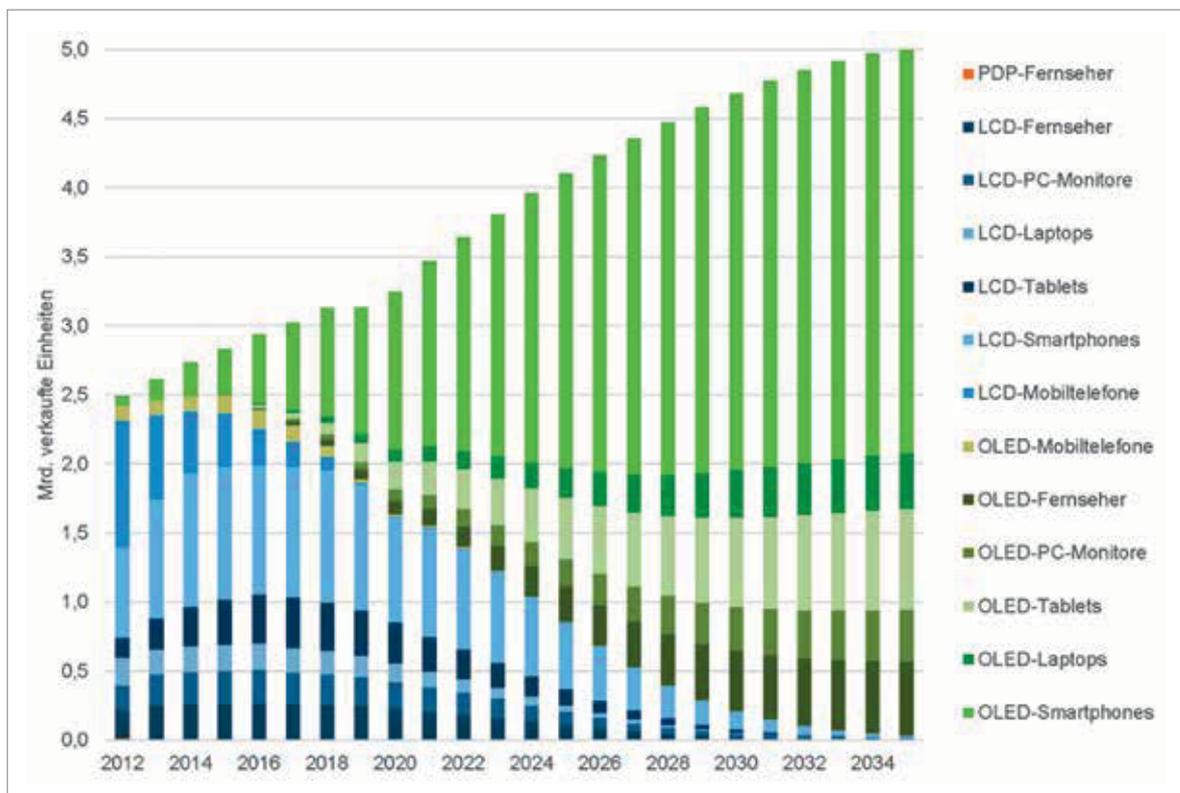


Abb. 4.28: Marktentwicklung von Displaygeräten

verdrängt. Nachdem die Hersteller die Produktion von Plasmabildschirmen in den Jahren 2013 und 2014 eingestellt haben (KATZMAIER 2014), wurden PDP-Fernseher nur noch bis 2015 verkauft. Die angekündigte Produktion von FEDs ist nie angegangen, so dass diese Technologie in der Marktprognose nicht weiter betrachtet wird. Abb. 4.28 zeigt die Marktentwicklung in der Zeit 2012 bis 2035, in der nach hier angenommener Modellierung LCDs fast vollständig von OLEDs verdrängt werden. Die Anzahl der verkauften Endgeräte im Jahr 2035 ist mit ca. 0,6 Geräten/Erdbewohner realistisch, wenn angenommen wird, dass das weltweite Bruttozialprodukt jährlich um 3 % wächst und sich somit bis 2035 verdoppelt (2012: 0,35 Geräte/Erdbewohner, WORLDOMETERS (o. J.)).

4.10.4 Foresight Rohstoffbedarf

Der Rohstoffbedarf für Displays (Tab. 4.26) ergibt sich aus den Marktzahlen (Abb. 4.28) und den Rohstoffgehalten (Tab. 4.25). Laut MARWEDE & RELLER (2014) landen beim Sputtern, dem Prozess um ITO auf die Glasfläche aufzubringen, ca. 20 % bis 80 % auf dem Substrat; ein Rest bleibt am Sputter-Target bzw. beschichtet die Sputter-Kammer. Sowohl Reste des Targets als auch Kammerbeschichtungen können zum Teil recycelt werden. Nach den Szenarien aus MARWEDE & RELLER (2014) gehen bei dem Sputterprozess inklusive Recycling 10–40 % des Indiums „verloren“, d. h. es wird weder recycelt noch landet es in dem Display. Der Rohstoffbedarf für die Produktion wurde mit Hilfe der eben genannten Verluste abgeschätzt.

Der produktionspezifische Netto-Rohstoffbedarf liegt je nach Materialnutzung zwischen 13 % und 16 % der Indiumproduktion. Die Indium Corporation geht davon aus, dass im Jahr 2011 sogar 56 % des jährlich primär produzierten Indiums in die Displayindustrie geht (EUROPEAN COMMISSION 2014a), also ca. 280 t. Es ist anzunehmen, dass hier von dem Bruttobedarf gesprochen wird – also

das Recycling unberücksichtigt bleibt. Zudem wird der Indiumbedarf für die Displayindustrie in dieser Studie eher unterschätzt, weil andere Einsatzfelder von LCDs z. B. in weiteren Kleingeräten wie Kameras, Spielekonsolen oder Navigationsgeräten hier nicht beachtet werden. Im Jahr 2035 könnten zwischen 27 % und 34 % der aktuellen Indiumproduktion für die Displayindustrie benötigt werden. Im Vergleich zu ANGERER et. al. (2009) fällt der zukünftige Rohstoffbedarf niedriger aus, da der produktspezifische Bedarf nach aktuellen Messwerten ungefähr um einen Faktor 10 niedriger ist als in ANGERER et. al. (2009) angenommen und der Gesamtmarkt im Vergleich zu ANGERER et. al. (2009) kleiner ist, da nicht alle Einsatzfelder von Displays betrachtet werden. Da der Verbrauch mittels dieser Vorschau eher unterschätzt wird, wird hier das obere Ende des produktionspezifischen Bedarfs als die realistischere Vorschau eingeschätzt.

Flachdisplays sind eine Querschnittstechnologie, die in vielen Bereichen und in unterschiedlichen Größen Verwendung findet. Die Anwendungen reichen von einem wenig Zoll messendem OLED-Display für einen MP3-Player bis zu einem LCD-Fernseher mit einer 75 Zoll Diagonale. Die groben Abschätzungen des ITO-Bedarfs für Displays beruhen auf einer Reihe von Annahmen, z. B. über die Größen. Neben den Größen besteht eine große Unsicherheit über die zukünftigen relativen Marktanteile der Displaytechnologien. Es ist zum Beispiel unklar, ob OLED das LCD-Segment wirklich auf breiter Front vereinnahmt wird. Zudem kann der Trend zu Displaynutzung im öffentlichen Raum sowie im kommerziellen und privaten Gebrauch noch viel stärker ausfallen. Deswegen kann man hier eher von einer konservativen Abschätzung sprechen.

Tab. 4.26: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf von Indium für Displays in t

| Rohstoff | Produktion 2013 Raffinadeproduktion | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|----------|--|---|--|
| Indium | 790 | 93 (in Produkten), 102–130 (in Produktion) | 196 (in Produkten), 215–274 (in Produktion) |

4.10.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Der Flachbildschirmindustrie ist die Kritikalität und die damit assoziierte Preisfluktuationen von Indium bekannt. Deshalb fokussiert die Forschung und Entwicklung darauf, Alternativen zu ITO zu finden. Andere TCOs (transparent conductive oxides) sind insbesondere Aluminium dotiertes Zinkoxid (AZO) oder Fluorine dotiertes Zinnoxid (FTO). Beide werden industriell zu günstigeren Kosten als ITO gefertigt, sind jedoch nicht genauso geeignet. Neue amorphe TCOs wie Gallium-Indium-Zinkoxide (IGZO/IZGO), Indium-Zinkoxide (IZO) und Zink-Zinnoxide haben ähnliche oder sogar bessere Eigenschaften als ITO, brauchen allerdings noch mindestens fünf Jahre zur Marktreife und verwenden zum Teil immer noch Indium. Neben TCOs werden eine Reihe weiterer transparenter und leitender Dünnschichttechnologien entwickelt, die aber voraussichtlich erst in 5–10 Jahren marktreif sind:

- Ultradünne Metallfolien und Zink-Metal-Oxid-Multilayer
- Kohlenstoffnanoröhrchen und Metal-Nanodrahtfolien
- Graphen-Folien
- Organische transparente Leiter (PEDOT:PSS)
- Gedruckte Metallgitter

Die Suche nach Alternativen zu ITO ging vom neuen Feld der flexiblen Elektronik (z. B. OLEDs auf Folien) aus. Die niedrige mechanische Stabilität von ITO schränkt die Display-Flexibilität ein. Ein organisches transparentes und leitendes PEDOT:PSS mit gedruckten Silberkontakten ersetzt ITO in einem Prototyp eines flexiblen OLED-Display. Die starren OLED-Displays auf Glas, die derzeit schon für Mobiltelefone verwendet werden, nutzen nach wie vor ITO. Alternativen zu ITO-freien Displays sind LED-Displays für Schilder oder große „Leinwände“. Allerdings wird für die blaue bzw. weiße Diode InGaN verwendet. Schlussfolgernd lässt sich sagen, dass es derzeit keine Alternative zu ITO für die Flachdisplay-Industrie gibt (TERCERO ESPINOZA et al. 2014).

Das Recycling von Displays mit anschließender Wiedergewinnung des Indiums ist in obigen Betrachtungen nicht berücksichtigt. Die zu erwartende kürzere Produktlebenszeit und die wachsende Verbreitung von LCD-TVs wird zu mehreren

10.000 Tonnen von ausrangierten LCD-Fernsehern und -Monitoren allein in Deutschland in den nächsten Jahren führen (CHANCEREL et al. 2012). Verschiedene Forschungsprojekte haben die technische Machbarkeit des Recyclings von Indium aus LCDs bewiesen (CHANCEREL et al. 2012); großtechnisch wird das Recycling von Indium aus Displays wegen fehlender Wirtschaftlichkeit jedoch nicht umgesetzt. Da in der Zukunft die Rücklaufmengen weiter ansteigen werden, könnten Skaleneffekte ein Recycling des Indiums aus Displays evtl. in Kombination mit anderen indiumhaltigen Abfallströmen wie CIGS-Solarzellen oder Produktionsabfällen wirtschaftlich werden lassen.

Abfälle aus der Beschichtung werden schon heute recycelt. In Zukunft kann die Rohstoffeffizienz durch zwei Technologiefortschritte deutlich erhöht werden. Zum einen wird durch die Verwendung von rotierenden statt planaren Sputtertargets erreicht, dass mehr Material abgetragen wird. Zum anderen ermöglicht eine optimierte Prozessführung, dass mehr Material auf dem Substrat landet.

4.11 Infrarot-Detektoren in Nachtsichtgeräten

4.11.1 Technologiebeschreibung

Infrarot(IR)-Detektoren werden in gekühlte und ungekühlte Detektoren eingeteilt. Innerhalb der ungekühlten IR-Detektoren kommen hauptsächlich so genannte Mikrobolometer und pyroelektrische Detektoren zum Einsatz. Dagegen basieren die gekühlten Detektoren vorwiegend auf Photodioden.

Ungekühlte Infrarotdetektoren

Ungekühlte Detektoren arbeiten nach dem Prinzip der Änderung von Widerstand, Spannung und oder Stromstärke bei Aufheizung des Detektors durch Infrarotstrahlung. Ungekühlte Detektoren verwenden **pyroelektrische Arrays** oder **Mikrobolometer-Arrays**.

In **pyroelektrischen** (polaren) Kristallen tritt ohne äußeres elektrisches Feld eine Ladungstrennung auf. Pyroelektrische Ladung entsteht in den gegenüberliegenden Seiten von asymmetrischen

Kristallen. Ob ein Material polar ist, hängt von seiner Kristallstruktur ab. Sehr kleine Temperaturänderungen können wegen der Pyroelektrizität eine elektrische Spannung erzeugen. Passive Infrarotsensoren werden oft mit pyroelektrischen Kristallen hergestellt. Für pyroelektrische Systeme wird hauptsächlich Barium-Strontium-Titanit (BST) benutzt. Es wurden auch künstliche pyroelektrische Materialien (normalerweise als Dünnschichten) aus Galliumnitrid (GaN), Caesiumnitrat (Cs_3NO_3) oder Lithiumtantalat (LiTaO_3) entwickelt (GAUTSCHI 2002, LANG 2005).

Die Detektorzelle eines **Mikrobolometer-Arrays** besteht aus einer nur wenige Mikrometer dicken, strahlungsempfindlichen Scheibe, welche über so genannte Mikrobrücken thermisch vom Schaltkreis zum Auslesen isoliert ist. Die Scheiben bestehen aus einem Material mit stark temperaturabhängigem Widerstand (siehe Abb. 4.29). Viele unterschiedliche Materialien werden als Detektorelement in Mikrobolometern verwendet. Die meistverwendeten sind jedoch amorphes Silizium (a-Si) und Vanadiumoxide (VO_x , V_2O_5 , VO_2) (YOLE 2013a).

Der wichtigste Produzent FLIR bietet Mikrobolometer-Kameras in den Arraygrößen, 640×512 , 336×256 und 324×256 bei einer Pixelgröße von $17 \mu\text{m}$ oder niedrigauflösend mit 160×128 Zellen mit 25, 34 oder $50 \mu\text{m}$ Zellgröße an (FLIR o. J.). Es können Zellen bis zu Größe 1024×768 hergestellt werden. Die aktuelle Standardpixelgröße beträgt $17 \mu\text{m}$ (vorher $25 \mu\text{m}$). Der Trend geht Richtung $12 \mu\text{m}$ Pixelgröße, wobei hiermit die physikalische

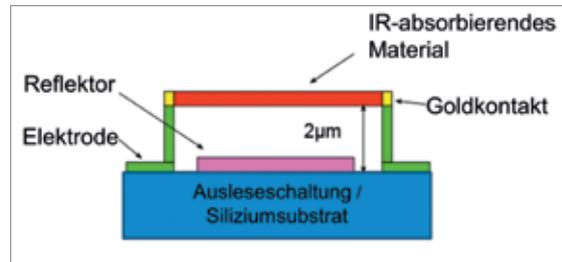


Abb. 4.29: Mikrobolometer-Zelle
(Quelle: FeuRenard, WIKIMEDIA, CC BY-SA 4.0)

Grenze erreicht ist, da die Wärmestrahlung ab dann gebeugt wird.

Gekühlte Infrarotdetektoren

Gekühlte Infrarotdetektoren bestehen aus einem Array aus Photodioden. Hunderte oder tausende (bis zu 2.048) Photodioden mit einer typischen Größe von $0,025 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ werden zusammengeschaltet. Die Detektoren sind in einem vakuumversiegeltem Gehäuse untergebracht und werden kryogenisch gekühlt. Die Arbeitstemperatur liegt dabei zwischen 4 und 110 K, normalerweise jedoch bei 80 K (etwas über der Siedetemperatur von Stickstoff). Damit sind die Detektoren wesentlich kälter als die zu beobachtenden Objekte, wodurch sich die thermische Empfindlichkeit des Thermografiesystems gegenüber den ungekühlten Detektoren wesentlich erhöht. Nachteile der Methode sind „Systemblindheit“ bei Kühlaufschlag, lange

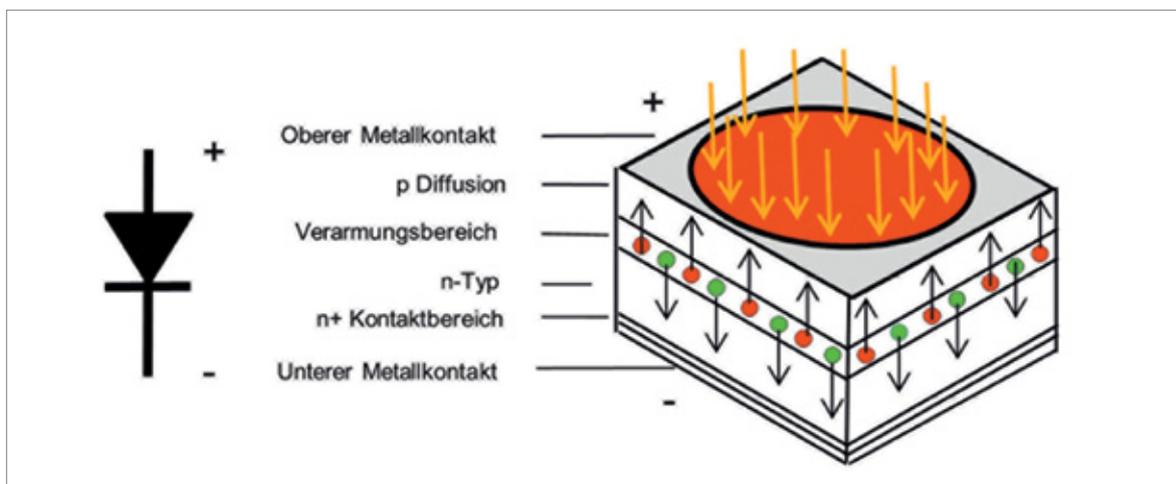


Abb. 4.30: pn-Photodiode (eigene Darstellung angelehnt an KUPHALDT 2000)

Anlaufzeiten bis das System auf Betriebstemperatur runtergekühlt ist sowie erhöhte Anschaffungs- und Betriebskosten (WIKIPEDIA 2008a).

In einer Infrarot-Photodiode wird über eine p-n-Schicht Strom erzeugt, wenn Photonen mit genügend Energie in der aktiven Schicht absorbiert werden. Wird ein p- mit einem n-Halbleiter in Kontakt gebracht, entsteht eine Raumladungszone. Treffen Photonen auf das Material, so werden Ladungsträger (Elektronen-Loch-Paare) in der Raumladungszone erzeugt, was zu einem Stromfluss führt, da die Ladungsträger durch die Diffusionsspannung in die jeweils entgegengesetzt dotierten Zonen wandern (Abb. 4.30). Nur ein Photon mit einer höheren oder gleich hohen Energie als die Bandlücke kann diesen Effekt hervorrufen. Die Energie des Photons ist umgekehrt proportional zur Wellenlänge. Die Änderung des Stromes oder der Spannung kann gemessen werden. Die Wahl des Materials bestimmt die Bandlücke, d. h. die Energie, die ein Photon benötigt, um ein Elektronen-Loch-Paar zu erzeugen.

Darüber hinaus gibt es noch Sonderfunktionsweisen von Photodioden, darunter photoleitende Detektoren, photovoltaischer Detektor und pin-Photodioden und Lawinenphotodioden.

Tab. 4.27: Materialien für IR-Photodioden
(Quelle: WIKIPEDIA 2008a)

| Material | Spektralbereich [μm] |
|---|-----------------------------------|
| Indium-Gallium-Arsenid (InGaAs) Photodiode | 0,7–2,6 |
| Germanium (Ge) Photodiode | 0,8–1,7 |
| Bleisulfid (PbS) photoleitender Detektor | 1,0–3,2 |
| Bleiselenid (PbSe) photoleitender Detektor | 1,5–5,2 |
| Indiumarsen (InAs) photovoltaischer Detektor | 1,0–3,8 |
| Platinsilizid (PtSi) photoleitender Detektor | 1,0–5,0 |
| Indiumantimonid (InSb) Photodiode | 1,0–6,7 |
| Indiumantimonid (InSb) photoleitender Detektor | 1,0–5,5 |
| Quecksilber-Kadmium-Tellurid (HgCdTe) photoleitender Detektor | 0,8–25,0 |

Unterschiedliche Materialien für Infrarot-Photodioden sind in Tab. 4.27 dargestellt.

Thermografiekameras arbeiten entweder mit gekühlten oder mit ungekühlten Infrarotdetektoren. Ungekühlte Mikrobolometer sind für hochauflösende Infrarotdetektoren derzeit die beste Lösung (YOLE 2013a). IR-Detektoren kommen in einer Vielzahl von Anwendungsbereichen zum Einsatz, darunter insbesondere (USGS 2008a, WIKIPEDIA 2008a):

- Militärische Anwendungen (Navigationssysteme, Nachtsichtgeräte, optische Bildgebung, thermografische Geländeaufnahmen und Zielevaluierungen),
- Automobilbau (Nachtsichtsysteme) und
- Facility Management (Bewegungsmelder, thermografische Gebäudeaufnahmen zur Isolationsüberprüfung von Gebäuden).

Im Folgenden soll der schnell wachsende Zukunftsmarkt für ungekühlte Mikrobolometer-Infrarot-Kameras näher untersucht werden.

4.11.2 Rohstoffinhalt

Bei der Berechnung des Materialverbrauchs einer Mikrobolometer-Infrarot-Kamera wird hier angenommen, dass Vanadiumpentoxid (V_2O_5) zum Einsatz kommt. Der Rohstoffinhalt wird auf Basis eines Zellvolumens mit $17 \mu\text{m}$ Seitenlänge und $0,1 \mu\text{m}$ Höhe berechnet – bei einem Array von 320×240 Zellen. Es wird angenommen, dass die Standardzellgröße im Jahr 2035 $12 \mu\text{m}$ bei einer Auflösung von 1024×768 Zellen ist. Bei einer Vanadiumpentoxidichte von $3,357 \text{ g/cm}^3$ unter Beachtung der molaren Massen von Vanadium und Sauerstoff ergeben sich die in Tab. 4.28 angegebenen Materialverbrauchswerte.

Tab. 4.28: Verbrauch von Vanadium für eine Mikrobolometer-Infrarot-Kamera

| | 2013 | 2035 |
|----------|-----------------|------------------|
| | [Array 320x240] | [Array 1024x768] |
| Vanadium | 4,7E-9 kg | 2,1E-8 kg |

4.11.3 Foresight industrielle Nutzung

Mikrobolometer-Infrarotsysteme können neben den klassischen (militärischen) Nachtsichtsystemen und Überwachungskameras auch für viele andere Anwendungen genutzt werden. Die Feuerwehr kann „hot spots“ oder Menschen in leeren Gebäuden finden oder Energieberater können Wärmebrücken identifizieren. Außerdem werden sie als Nachtsichtsysteme für Autos genutzt. Zukünftige Anwendungen mit niedriger Auflösung (32 x 32 oder 80 x 80 Pixel) gehen in Richtung „smart building automation“ (Personenerkennung und -verortung für Licht- und Wärmesteuerung, Branderkennung). Mikrobolometer sind allerdings für diese Anwendung derzeit noch um einen Faktor 2–3 zu teuer (YOLE 2013a).

Fahrzeug-Nachtsichtsysteme sind im Jahr 2000 als erstes von Cadillac (FIR) und danach von Lexus/Toyota im Jahr 2002 (NIR) eingeführt worden. Im Jahr 2006 kamen dann Nachtsichtsysteme für den Honda Legend – jetzt Acura (FIR), für die

BMW 5er bis 7er Serie (FIR) und der Mercedes S-Klasse raus (KÄLLHAMMER 2006). Der Marktführer AutoLiv wird die dritte Generation ihrer Nachtsichtgeräte für weitere Modelle anbieten. Neue Sicherheitstests (EuroNCAP), die Lösungen für die Vermeidung von Personenkollisionen fordern, könnten den Markt für Infrarotsysteme ab 2018 ankurbeln, wenn die Kosten für diese bis dahin deutlich gesunken sind (YOLE 2013a).

Im Jahr 2011 wurden 251.000 Vanadiumoxidbasierte Infrarot-Kameras verkauft (YOLE 2013a). Die Anzahl der verkauften Mikrobolometer-Systeme (a-Si und VOx) stieg im Jahr 2013 um 15%. Bis 2019 werden Wachstumsraten von bis zu 25% erwartet, so dass 1,4 Mio. Geräte im Jahr 2019 verkauft werden (I-MICRONEWS o. J.). Geht man davon aus, dass der Marktanteil an verkauften VOx-basierten Mikrobolometer-Infrarot-Kameras mit 70% konstant bleibt (YOLE 2013a), werden knapp 1.000.000 VOx-basierte Infrarot-Kameras im Jahr 2019 verkauft. Diese Randbedingungen wurden zugrunde gelegt, um den Markt s-kurvenförmig bis 2035 zu modellieren (Abb. 4.31).

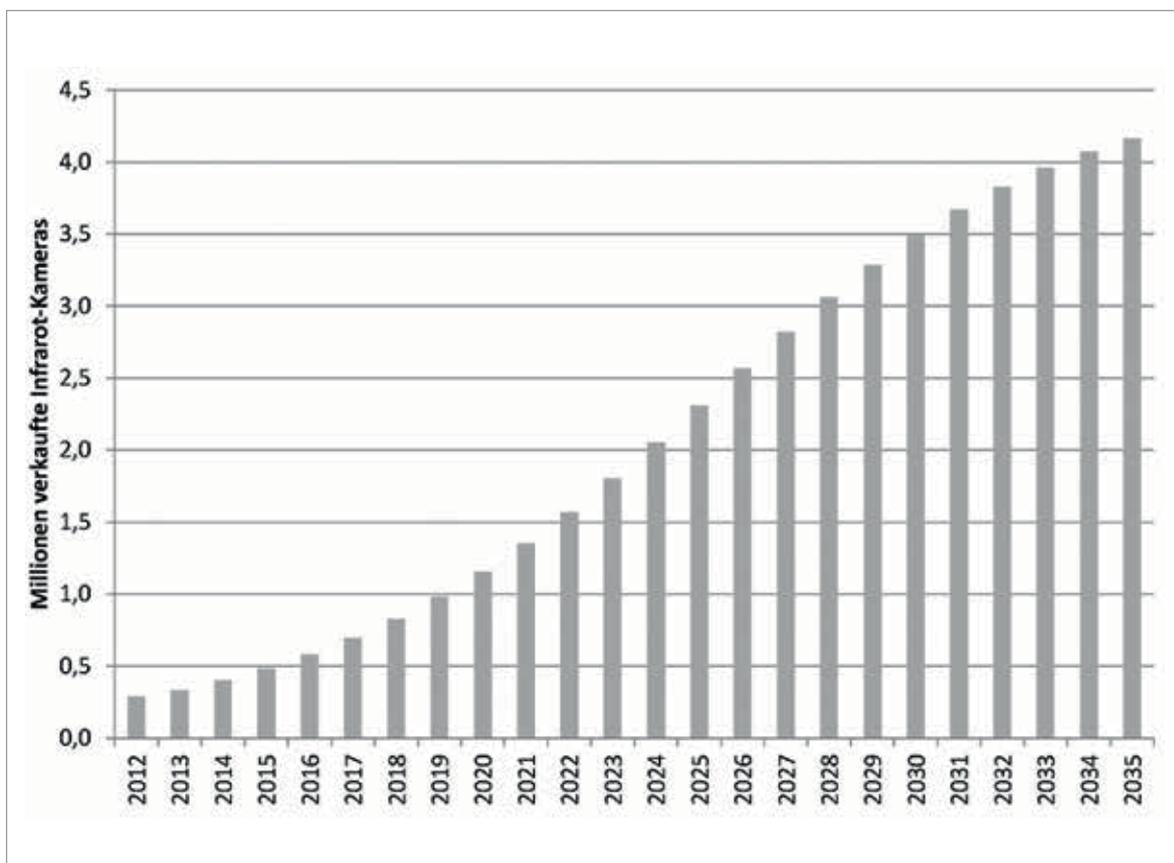


Abb. 4.31: Anzahl jährlich verkaufter VO_x-basierter Mikrobolometer-Infrarot-Kameras

Tab. 4.29: Globale Produktion und Bedarf von Vanadium für VO_x-basierte Mikrobolometer-Infrarot-Kameras in t

| Rohstoff | Produktion 2013 (Bergwerksförderung) | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|----------|---|-------------|----------------------|
| Vanadium | 77.573 | 1,6 g | 89 g |

4.11.4 Foresight Rohstoffbedarf

Tab. 4.29 zeigt das Ergebnis der Abschätzung für Vanadium.

Die weltweite Bergwerksförderung an Vanadium im Jahr 2013 lag bei 77.573 t. Nach dieser Abschätzung ist der Vanadiumverbrauch von 89 g im Jahr 2035 für Mikrobolometer-Array-Wärmebildkameras zu vernachlässigen.

4.11.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Amorphes Silizium dient als Substitut für Vanadium im Mikrobolometer. Als neues Material wird Si/SiGe verwendet. Pyroelektrische Arrays, die auf anderen Materialien basieren, haben eine geringere Auflösung als Mikrobolometer-Arrays (YOLE 2013a).

4.12 Weiße LED

4.12.1 Technologiebeschreibung

Eine Leuchtdiode (LED – light emitting diode) besteht aus dotierten Halbleitermaterialien: einer n-leitenden Schicht mit einem Überschuss an

Elektronen und einer p-leitenden Schicht mit einem Mangel an Elektronen. Dazwischen liegt der Übergangsbereich (aktive Schicht, Sperrschicht). Wird eine Spannung angelegt, besitzen die Elektronen im n-Bereich genug Energie, um die Sperrschicht zu überwinden. Im p-Bereich rekombinieren sie mit den Löchern und Energie wird in Form elektromagnetischer Strahlung freigesetzt.

Die Entstehung des weißen Lichts geschieht durch Lumineszenzkonversion. Mittels der Kombination einer blauen (UV-Licht emittierenden) LED und einem Lumineszenzfarbstoff (Konverter) entsteht weißes Licht. Ein Teil des kurzwelligeren blauen Lichtes wird durch die Farbstoffschicht absorbiert und zum Leuchten angeregt. Es wird ein gelb-oranges (langwelligeres und energieärmeres) Licht emittiert. Die Überlagerung der verschiedenen Spektralfarben wird als weißes Licht wahrgenommen (siehe Abb. 4.32).

Je nach Halbleitermaterial wird Licht in einer bestimmten Farbe abgegeben. Für blaue (und grüne) Dioden werden die Halbleitermaterialien auf Basis von (Indium-)Galliumnitrid (InAlGaN) hergestellt. Auf einem einkristallinen Grundmaterial (Wafer aus Saphir, Siliziumcarbid, Silizium oder Galliumnitrid) werden unterschiedliche Halbleiterschichten aufgetragen. Eine moderne blaue Leuchtdiode besteht aus einer Vielzahl verschiedener Materialien wie Galliumnitrid als Basisma-

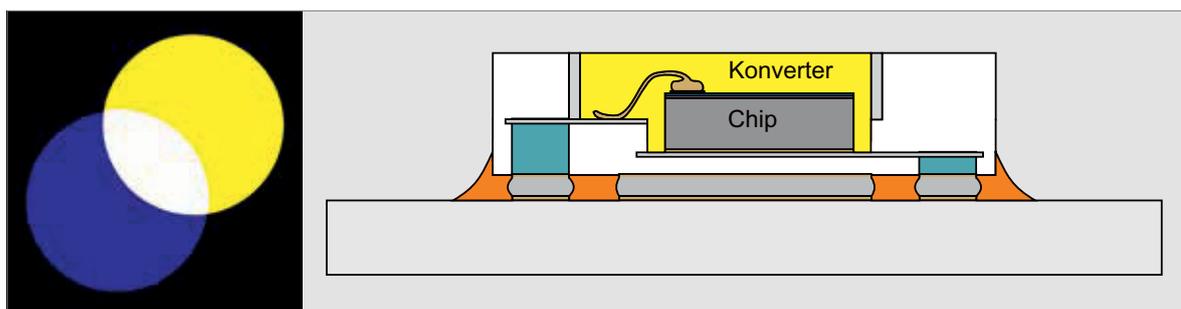


Abb. 4.32: Funktionsweise und Aufbau einer Leuchtdiode (LED)
(Quelle: eigene Darstellung)

Tab. 4.30: Materialinhalt der aktiven pn-Schicht eines InGaN-Chips

| Element | Dicke | Massenanteil | Dichte | Masse pro 1 mm ² Chip | Produktionsbedarf |
|-----------------|-------|--------------|----------------------|----------------------------------|-----------------------|
| | [µm] | [%vol] | [g/cm ³] | [µg/mm ²] | [µg/mm ²] |
| Ga | 5 | 25 | 5,904 | 7 | 12 |
| In ¹ | 0,06 | 25 | 7,31 | 0,1 | 0,17 |

¹ Indium ist nur im sehr dünnen Halbleiterübergang (~60 nm) zu finden.

terial, Indium-Galliumnitrid als leuchtende Schicht und Aluminium-Gallium-Nitrid zur Effizienzsteigerung.

Weißer LEDs werden hauptsächlich für die Beleuchtung sowie als LC-Display-Hintergrundbeleuchtung für mobile elektronische Geräte und Fernseher/Monitore verwendet. Die Bedeutung des Displaymarktes nimmt in Zukunft ab, da angenommen wird, dass LCDs insbesondere bei kleineren Geräten (Tablets, Smartphones) durch selbstleuchtende OLED-Displays ersetzt werden. Ein wachsender Markt ist der Einsatz von LEDs für Autoscheinwerfer (YOLE 2013b).

4.12.2 Rohstoffinhalt

Der Materialbedarf pro InGaN-LED-Chip wurde mit Hilfe der in Tab. 4.30 genannten Zahlen berechnet. Der Rohstoffbedarf für die Produktion ergibt sich aus einer Materialflussanalyse, die innerhalb des europäischen Projektes CycLED durchgeführt wurde (DEUBZER et al. 2012). Für die LED-Chip Produktion werden dünne Schichten der Materialien auf einem Sapphire Wafer mit Hilfe der metallorganischen chemischen Gasphasenabscheidung (MOCVD) epitaxial abgeschieden. Die Schnelligkeit und Effizienz der Abscheidung kann gesteuert werden, so dass bei den teuren Halbleitermaterialien Indium und Gallium bis zu 80 % des eingesetzten Materials auf dem Saphirsubstrat landet. Weitere Prozesse, die die Materialausbeute während der Produktion bestimmen, sind:

- Oberflächenstrukturierung, bei der etwa ein Fünftel des zuvor abgeschiedenen Materials abgeätzt wird.
- Die Prozessausbeute, welche bestimmt, wie viele Wafer fertig prozessiert werden, variiert abhängig vom Hersteller zwischen 60 % und größer 90 %.

Für die Materialflussanalyse wurde angenommen, dass 70 % des eingesetzten Materials auf dem Substrat abgeschieden und 85 % der Wafer fertig prozessiert werden, bevor sie für das Vereinzeln und die LED-Package Produktion in die „Back-End“ Prozesse gehen. Das heißt, die Prozessverluste durch das Vereinzeln der Wafer in Chips und der Verwurf von LED-Packages oder LED-Chips im Back-End werden hier nicht betrachtet.

4.12.3 Foresight industrielle Nutzung

LEDs werden in der Beleuchtung, für Automobil-scheinwerfer, als Hintergrundbeleuchtung für LCDs, für Signale und Schilder und für weitere kleine Anwendungen wie Kamerablitz, Signaldioden und Spielzeug verwendet. Die wichtigsten Märkte sind Beleuchtung und Displayhintergrundbeleuchtung (YOLE 2013b).

Um die für die Produktion benötigten Rohstoffbedarf zu berechnen, wird die derzeit verwendeten MOCVD-Reaktorkapazität verwendet, die in TIE (two inch wafer equivalents) angegeben wird. (Es werden derzeit nur etwa 70 % der bestehenden Reaktorkapazität benötigt, um die Nachfrage zu decken, YOLE 2013b). Die benötigte Reaktorkapazität wird von YOLE (2013b) in einem Basisszenario abhängig von der Nachfrage bis 2015 fortgeführt. Für die Prognose wurden über die Werte der Jahre 2010 bis 2015 eine Potenzfunktion gelegt und diese bis 2035 fortgeführt (Tab. 4.31).

Tab. 4.31: Projektionen der prozessierten Waferfläche (eigene Berechnungen basierend auf YOLE 2013b)

| | [Mio. mm ²] | |
|-------------------|-------------------------|-----------|
| MOCVD Reaktor | 2013 | 2035 |
| Durchsatz (InGaN) | 461.620 | 1.615.451 |

4.12.4 Foresight Rohstoffbedarf

Tab. 4.32 gibt den Indium- und Galliumbedarf für WLEDs wieder, der auf Basis der Rohstoffangaben in Tab. 4.30 und der Projektion in Tab. 4.31 berechnet worden ist.

Im Jahr 2013 wurden etwa 0,1 t Indium für die Herstellung von InGaN-LEDs benötigt. Das ist wenig im Vergleich zu der Gesamtproduktion im Jahr 2013 von 790 t. Wächst der Markt wie in den Projektionen angenommen, steigt der Rohstoffbedarf für WLEDs auf das 3-fache (0,3 t Indium).

Der Galliumbedarf für WLED betrug im Jahr 2013 5 t, ca. 1 % der jährlichen Galliumproduktion. Laut Projektion steigt der Bedarf auf 19 t Gallium, also ca. 7 % der weltweiten Galliumproduktion im Jahr 2013. Die deutlich niedrigere Nachfrage nach Gallium von weißen LEDs im Vergleich zu ANGERER et al. (2009) kommt hauptsächlich dadurch zustande, dass der aktuelle produktionsspezifische Bedarf deutlich niedriger ist als in ANGERER et al. (2009) angenommen. Der produktionsspezifische Bedarf in ANGERER et al. (2009) basiert auf dem Verbrauch einer Beschichtungsanlage in der Forschung, der aktuelle produktionsspezifische Bedarf basiert auf Annahmen zu relativ hohen Ausbeuten in großtechnischen Beschichtungsanlagen bei aktuellen Schichtdicken.

Die spezifischen Rohstoffmengen pro Diode können je nach Hersteller und Geometrie der LEDs variieren. Hohe Unsicherheiten ergeben sich auch durch Unterschiede in den Material- und Prozessausbeuten je nach Hersteller. Zum Beispiel kann die Rohstoffnutzung bei der Beschichtung (Epitaxie) auch unter 40 % liegen. Zudem kommen noch die Rohstoffverluste durch die Vereinzelung und den Verwurf von LED-Chips oder LED-Packages hinzu. Auf der anderen Seite könnte sein, dass aufgrund der längeren Lebensdauern der LED-Leuchten sowie der Verdrängung der LCD durch die

OLED-Technologie der derzeit stark wachsende LED-Markt mittelfristig gedämpft wird und somit die Produktionskapazität nicht so schnell wächst wie hier angenommen. Ob sich diese beiden Einflüsse auf die Rohstoffnutzung die Waage halten, kann hier nicht abgeschätzt werden.

Zudem werden rote und gelbe LEDs, deren Halbleiterschicht auf (Al/P/In)GaAs basiert, die als Epitaxischicht auf GaAs-Wafern statt auf Saphir Wafern gezüchtet wird, nicht beachtet. Nach Entstehung werden die GaAs-Wafer bis auf die wenige Mikrometer dicke Epitaxieschicht runtergeschliffen. Zusätzlich entstehen auch große Abfallmengen bei der Waferfertigung (siehe auch Kapitel 4.15).

4.12.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Ein Recycling von Halbleitermaterialien aus weißen LEDs wäre aufgrund der geringen Konzentrationen schwierig und aufwändig. Abschätzungen im europäischen Projekt CycLED haben ergeben, dass die In- und Ga-Konzentrationen im LED-Package sehr niedrig sind (Abb. 4.33). Schaut man sich die Geräte an, in denen LEDs als Leuchtmittel oder LCD-Rückbeleuchtung eingesetzt werden, sinkt die Konzentration deutlich.

Eine Abschätzung der Ressourcenflüsse innerhalb Europas hat gezeigt, dass der Indium- und Gallium-Inhalt in LED-Produkten (Leuchten, Displays), die im Jahr 2020 am Ende ihrer Nutzungsdauer sind, nur wenige Kilogramm beträgt (DEUBZER et al. 2012). (Die Gehalte von Indium-Zinn-Oxid in LCDs werden in Kapitel 4.10 behandelt.) Da es sich für diese geringen Mengen wahrscheinlich nicht lohnt, ein getrenntes Recyclingsystem aufzubauen, besteht der derzeit effektivste Ressourcenschutz darin, möglichst die Nutzungsdauer der Produkte an die lange technische Lebensdauer der LEDs (100.000 h und mehr) anzupassen. Typische

Tab. 4.32: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf für InGaN-LEDs in t

| Rohstoff | Produktion 2013 (Raffinadeproduktion) | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|----------|--|-------------|----------------------|
| Indium | 790 | 0,1 | 0,3 |
| Gallium | 350 ¹ | 6 | 19 |

¹ Quelle: USGS 2015a, Primärproduktion

| Gerät/Baugruppe/Bauteil | Σ SE [Gew.-%] | Ga [Gew.-%] | In [Gew.-%] |
|---|---------------------------|----------------------|----------------------|
| Tablet/TV | $\leq 5 \times 10^{-4}$ % | sehr niedrig | sehr niedrig |
| Retrofit LED Lampe/ Display-Hintergrundbeleuchtung | $\leq 4 \times 10^{-3}$ % | 6×10^{-5} % | 1×10^{-6} % |
| LED-Packages auf PCB | $\leq 4 \times 10^{-2}$ % | 7×10^{-4} % | 1×10^{-5} % |
| LED-Package | $\leq 0,2$ % | 7×10^{-3} % | 1×10^{-4} % |
| Konverter | $\sim 1-2$ % | – | – |
| Leuchtstoff | ~ 30 % | – | – |

Abb. 4.33: Konzentration von In, Ga und Seltenen Erden (REMs) in Produkten und Komponenten
(Quelle: DEUBZER et al. 2014)

Konsummuster, z. B. Ersatz eines relativ jungen Flachbildschirms wegen technischer Obsoleszenz oder regelmäßige Erneuerung des Lichtsystems im kommerziellen Bereich, setzen diesem Ansatz Grenzen.

Deutlich sinnvoller ist es, die relativ reinen Abfälle der Beschichtungsprozesse (Epitaxie, Sputtering) zu recyceln. Wie viel der Prozessverluste recycelt wird, obliegt den Herstellern, wenige Informationen zu Prozessausbeuten und Produktionsrecycling sind hier vorhanden. Da die meisten LED-Hersteller außerhalb Europas sitzen, ist der Einfluss auf diese Ressourcenflüsse innerhalb Europas allerdings gering.

Als Alternative zu GaN in LEDs wird Zinnoxid, eine II-VI Halbleiterverbindung, untersucht. Allerdings ist das p-dotierte ZnO noch nicht stabil genug. Ähnliches gilt für andere II-VI Halbleiterverbindungen wie MgSe oder ZnSe. Auf Komponentenebene können Kompaktleuchtstofflampen oder Glühbirnen verwendet werden. Allerdings sind Glühbirnen aus Effizienzgründen in Europa verboten und Kompaktleuchtstofflampen sind quecksilberhaltig und benötigen deutlich mehr Seltene Erden für den Leuchtstoff. Diese können bei Energiesparlampen aus den Leuchtstoffen zurückgewonnen werden (WALTER 2011), wofür bei LEDs noch kein Prozess existiert. Organische Leuchtdioden (OLEDs) gelten als alternative „Zukunftstechnologie“ (siehe Kapitel 4.10 Indium-Zinn-Oxid (ITO) in der Displaytechnik) zur LED-Technologie, allerdings sind sie wegen Kosten und Zuverlässigkeit zu LEDs derzeit noch nicht konkurrenzfähig (TERCERO ESPINOZA et al. 2014).

4.13 Glasfaserkabel

4.13.1 Technologiebeschreibung

Wie in Abb. 4.34 veranschaulicht, sind Glasfaserkabel Lichtwellenleiter, welche Licht über längere Strecken übertragen können.

Licht ist elektromagnetische Strahlung, besteht also aus elektrischen und magnetischen Feldern. Nach räumlichem Verlauf der elektrischen und magnetischen Feldstärke lassen sich Schwingungsmoden unterscheiden. Welche dieser Schwingungsmoden ein Wellenleiter transportiert, hängt von seiner Geometrie und Beschaffenheit ab. Bei Glasfaserkabeln unterscheidet man Mono- und Multimodekabel. Monomodekabel übertragen nur eine einzige Lichtmode und können ohne Signalverstärkung Strecken bis zu mehreren 100 km überbrücken. Dagegen übertragen Multimodekabel mehrere Lichtmoden, was bei längeren Strecken zur Signalverfälschung aufgrund von Überlagerungen führt. Sie sind allerdings kostengünstiger als Monomodekabel und werden daher bevorzugt für kürzere Übertragungstrecken eingesetzt. Die Signalverfälschung der Multimodenfasern lässt sich zudem durch den Einsatz von Gradientenfasern mildern. Anders als die in Abb. 4.34 dargestellten Stufenfasern mit abruptem, stufenförmigem Übergang der Brechungsindices ändert sich der Brechungsindex bei Gradientenfasern allmählich.

Lichtstrahlung im Wellenlängenbereich zwischen 350–2.500 nm (IR–UV) kann übertragen werden. Als Lichtquellen dienen LEDs oder Laser.

Glasfaserkabel sind die derzeit technisch bedeutendsten Lichtwellenleiter. Daneben gibt es Lichtwellenleiter, die zum Teil oder vollkommen auf polymeren Kunststoffen basieren. Diese werden v. a. für die Kurzstreckenübertragung eingesetzt und spielen insgesamt eher eine untergeordnete Rolle.

Äußerlich umgibt die Lichtwellenleiter eine Schutzbeschichtung, z. B. aus Polyamid-, Silikon- oder Acryllack und eine Hülle (Abb. 4.34). Ein Glasfaserkabel kann dabei mehrere (bis zu 1.000) Glasfasern enthalten. Daher ist bei Mengenangaben zwischen Kabel- und Faserkilometern zu unterscheiden.

Herstellung

Bei der Herstellung von Glasfasern fertigt man zunächst eine Vorform (*engl.* Preform), aus der anschließend Fasern gezogen werden. Die Vorform aus hochreinem Silicaglas (SiO_2) wird durch chemische Gasphasenabscheidung (*engl.* Chemical Vapour Deposition CVD) von Tetrachlorsilan (SiCl_4) und Sauerstoff geschaffen. Dotierungen

werden über einen analogen Abscheidungsprozess eingebracht. Dabei erhält die Preform bereits das gewünschte Brechungsindexprofil, welches beim anschließenden Ziehen der Fasern in einem Faserziehturm unverändert bleibt. Unmittelbar nach dem Ziehen werden die äußeren Schutzschichten aufgetragen und ausgehärtet (PETERMANN 2015).

Anwendung

Glasfaserkabel werden vorrangig als Übertragungsmedium in der Nachrichtentechnik eingesetzt. Vorteile gegenüber herkömmlichen Kupferkabeln bestehen in der höheren Reichweite (bis zu mehreren 100 km ohne Zwischenverstärker) und der größeren Übertragungsrate (Giga- bis Tera-bit/s) der Glasfaserkabel.

Moderne Kommunikationsnetze bestehen daher in Kernbereichen (so genannten Backbones), in denen hohe Übertragungsraten benötigt werden, fast ausschließlich aus Glasfaserkabeln. Zu diesen Backbones zählen Kernbereichsnetzwerke von Telekommunikationsunternehmen, Kabel-

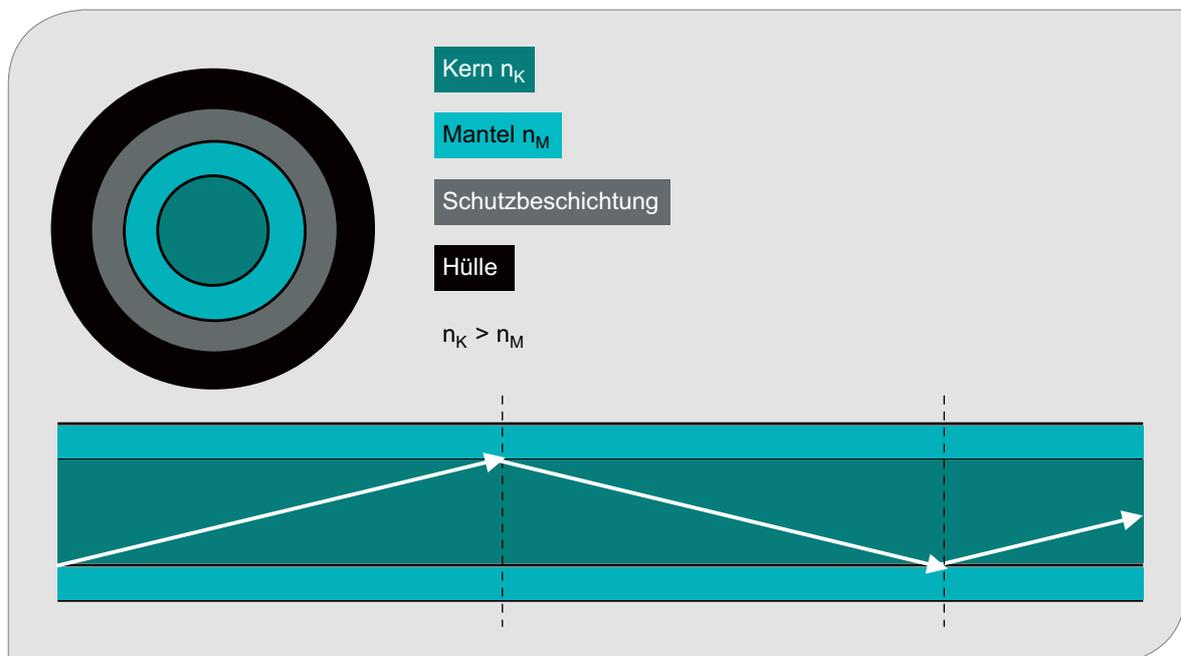


Abb. 4.34: Aufbau und Funktion eines Glasfaserkabels. Der Brechungsindex des Kerns ist größer als der Brechungsindex des Mantels ($n_K > n_M$), so dass es an der Grenzfläche zur Totalreflexion kommt, sobald Lichtstrahlen flach genug einfallen. Daher kann das Licht durch den Kern über weite Strecken geführt werden (Quelle: eigene Darstellung)

fernsehnetsbetreibern und Energieversorgern. Letztere verlegen Glasfaserkabel gemeinsam mit anderen Leitungen und betreiben diese zur Überwachung ihrer Leitungen und zur Vermietung an Telekommunikationsunternehmen und Kabelfernsehnetsbetreiber.

Der Anschluss einzelner Endabnehmer an die Netzwerke erfolgt hingegen meist noch nicht über Glasfaserkabel. Der Ausbau solcher Glasfaserkabelanschlüsse erfolgt aber seit einigen Jahren, v. a. in Japan, Europa und den USA. Je nach Zielpunkt unterscheidet man dabei verschiedene so genannte FTTx-Anschlüsse, z. B. FTTN (Fibre To The Neighborhood/Node), FTTH (Fibre To The Home), FTTB (Fibre To The Building), FiTH (Fibre In The Home), FTTD (Fibre To The Desk). Größtes Hindernis für solche Anschlüsse ist die Biegeempfindlichkeit der Glasfaserkabel, welche einen größeren Aufwand bei der Verlegung erfordert und bei unsachgemäßem Gebrauch (Biegen, Drücken) zu höheren Ausfallquoten führen kann. Außerdem sind Glasfaserkabel empfindlicher gegen Wasser und Staub. Durch Biegung verringert sich auch die Übertragungsrate der Glasfasern. Für FTTx-Anwendungen wurden daher spezielle Glasfasern mit geringerem Biegeverlust entwickelt, welcher z. B. durch eine fluordotierte Schicht am Übergang Kern-Mantel oder durch Nanostrukturen erreicht wird (Li et al. 2008).

Neben der Nachrichtentechnik werden Glasfasern z. B. in der Mess- und Medizintechnik sowie für Hochleistungslaser eingesetzt.

Konkurrenztechnologien

Insbesondere in abgelegenen Regionen kann die Datenübertragung auch via Satellit erfolgen. Dies eignet sich nur, wenn die Nachfrage und somit die Datenmenge relativ gering ist. Für die Internetversorgung in abgelegenen Regionen werden derzeit Ballons, welche in der Stratosphäre fliegen, entwickelt. Damit wären Kosteneinsparungen gegenüber der Satellitentechnologie möglich.

4.13.2 Rohstoffinhalt

Glasfaserkabel bestehen in der Regel aus amorphem Siliziumdioxid (SiO_2), genannt Silikaglas oder Quarzglas. Die Einstellung des Brechungsindex

erfolgt durch Dotierung. Es ist möglich, den Kern der Faser mit Germaniumdioxid (GeO_2) oder Phosphorpentoxid (P_2O_5) zu dotieren, um den Brechungsindex dort zu erhöhen. Ebenso kann der Mantel mit Bor oder Fluor dotiert werden, um seinen Brechungsindex zu verringern (PETERMANN 2015). In der Regel wird entweder der Kern oder der Mantel dotiert, der jeweils andere Teil der Faser besteht aus reinem SiO_2 . Unter Dotierungen versteht man im Allgemeinen sehr geringe Konzentrationen von 100 ppm (parts per million), d. h. weniger als einem Dotierungsatom unter 10.000 Grundstoffatomen.

Der Einsatz unterschiedlicher Materialien und Dotierungen sowie die variierende Anzahl Fasern pro Kabel (100–1.000) erschwert die Angabe von durchschnittlichen Stoffgehalten pro km verlegtem Kabel.

4.13.3 Foresight industrielle Nutzung

Abb. 4.35 und Abb. 4.36 zeigen die Entwicklung des Glasfasermarkts in den vergangenen Jahren und eine aktuelle Marktprognose.

Tab. 4.33 veranschaulicht, dass die jährlichen prozentualen Wachstumsraten des Glasfaserzubaues stark schwanken. Dennoch zeichnet sich ein Abflachen des 5-Jahresdurchschnitts ab, wie auch in Abb. 4.35 zu erkennen ist. Eine ähnliche Abflachung ist in den Wachstumsprognosen zu beobachten.

2011 prognostizierte TRANSPARENCY MARKET RESEARCH (2011) der Glasfaserkomponentenbranche für 2011 bis 2017 eine durchschnittliche Wachstumsrate von 9,5 %. Der USGS ging 2012 davon aus, dass der Glasfasermarkt bis 2015 um jährlich 5–7 % wachsen wird (USGS 2012a). 2014 prognostizierte MARKETS AND MARKETS (2014) dem Glasfaseroptikmarkt eine durchschnittliche jährliche Wachstumsrate von 5,1 % bis 2019. Hierbei werden neben den reinen Glasfasern auch andere Komponenten (z. B. Sender, Empfänger, Signalverstärker) berücksichtigt. Dem größten Sektor „Telekommunikation und Breitband“ wird eine Wachstumsrate von 5,9 % bis 2019 vorhergesagt, der zweitgrößte Sektor „Öl und Gas“ wird dagegen nur um 4,2 % wachsen. Insgesamt erwartet

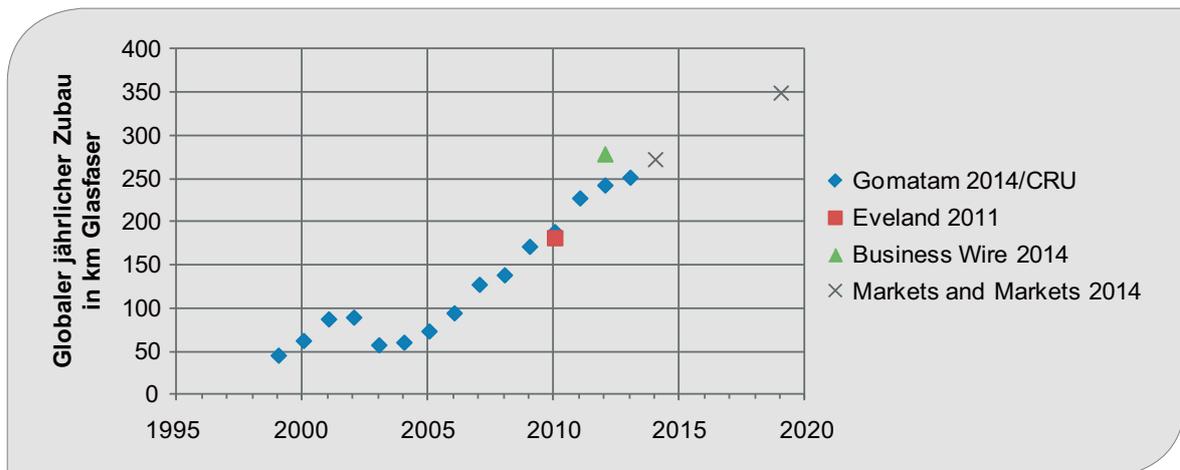


Abb. 4.35: Jährlicher Zubau an Glasfasern in Faser-km (weltweit) gemäß Daten bzw. Schätzungen für 1999 bis 2013 (GOMATAM 2014, Eveland 2011, BUSINESS WIRE 2014) sowie einer Marktvorausschau bis 2019 (MARKETS AND MARKETS 2014)

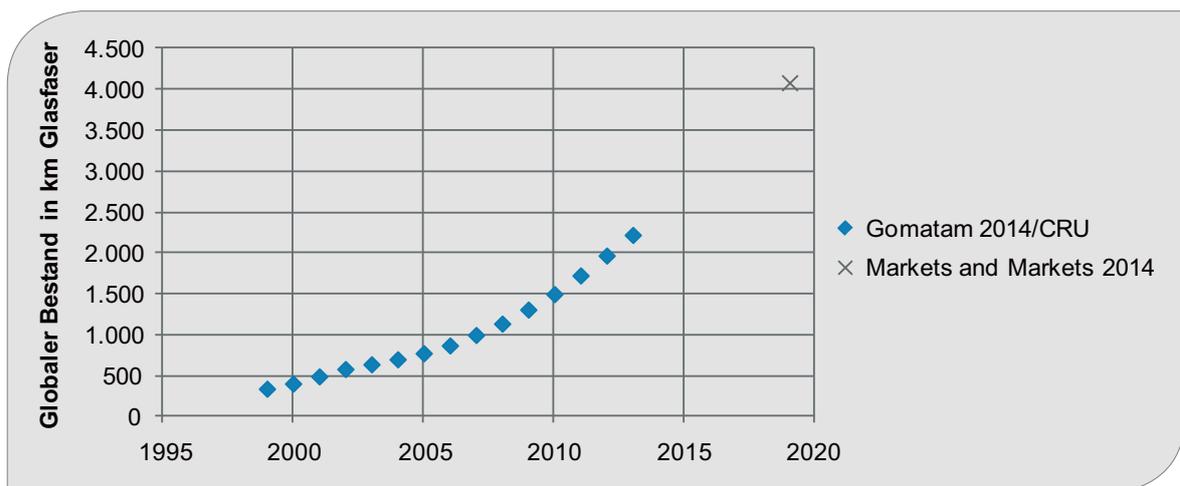


Abb. 4.36: Weltweiter Bestand verlegter Glasfasern in Faser-km, geschätzt nach Angaben in GOMATAM (2014) und MARKETS AND MARKETS (2014)

MARKETS AND MARKETS (2014), dass im Jahr 2019 ca. 350 Mio. Glasfaserkilometer benötigt werden.

2013 wurden ca. 252 Mio. Glasfaserkilometer verlegt (GOMATAM 2014), s. Abb. 4.35. Bei einer Wachstumsrate von 5,1 % bis 2019 ergeben sich 340 Mio. km. Aus dieser Übereinstimmung lässt sich schlussfolgern, dass für die Glasfaserkilometer die gleiche Wachstumsrate wie für den Gesamtmarkt angenommen wird.

Hauptursache für das Abflachen des globalen Wachstums ist ein langsames Wachstum des Glasfaserzubaues in China, welcher aufgrund sei-

nes großen Anteils am weltweiten Gesamtzubau die Entwicklung der letzten Jahre bestimmt hat. Die USA, Europa und Japan haben dagegen aufgrund ihres geringen Anteils am weltweiten Zubau nur geringen Einfluss auf den globalen Trend. Die hohen globalen Wachstumsraten und der aktuelle Zubau sind also hauptsächlich bedingt durch das ungewöhnlich starke Wachstum bzw. die schnelle Angleichung an informationstechnologische Möglichkeiten eines sehr bevölkerungsreichen Landes.

Als derzeit größte Wachstumsmärkte werden in GOMATAM (2014) Mexiko, die Staaten des ASEAN, Lateinamerika und der Mittlere Osten genannt.

Tab. 4.33: Prozentuale Wachstumsrate des jährlichen Zubaus von Glasfaserkabeln und Durchschnittswerte für verschiedene Zeitspannen berechnet anhand von Daten aus GOMATAM (2014)

| Jahr | Prozentuale Wachstumsrate des jährlichen Zubaus | | |
|------|---|-----------|----------|
| | jährlich | 4–5 Jahre | 13 Jahre |
| 2000 | 37,0 | | |
| 2001 | 39,7 | | |
| 2002 | 2,3 | | |
| 2003 | -35,6 | | |
| 2004 | 5,2 | 9,7 | |
| 2005 | 21,3 | | |
| 2006 | 28,4 | | |
| 2007 | 34,7 | | |
| 2008 | 8,6 | | |
| 2009 | 23,7 | 23,4 | |
| 2010 | 9,9 | | |
| 2011 | 20,6 | | |
| 2012 | 6,6 | | |
| 2013 | 3,7 | 10,0 | 14,7 |

Dies stimmt mit den Ländern überein, für die laut HAWKSWORTH et al. (2015) ein starkes Wirtschaftswachstum (GDP) erwartet wird, z. B. Mexiko, Vietnam.

Der wesentliche Wachstumstreiber für den Zubau von Glasfaserkabeln liegt also in einer Ausbreitung auf noch nicht ausreichend mit Glasfaserkabeln erschlossene Länder oder auch abgelegene Regionen. Insbesondere bei letzteren steht die Glasfasertechnologie in starker Konkurrenz zur Satellitenübertragung und der derzeit erprobten Übertragung via Ballons in der Stratosphäre. Aufgrund der langen Lebensdauer von Glasfaserkabeln wäre für die Erschließung eines Landes ein Verlauf gemäß Abb. 2.1 denkbar. Die weltweiten Zubauraten würden sich entsprechend aus den einzelnen Ländertrends ergeben und nicht zwangsläufig exponentiell ansteigen.

Ein weiterer Treiber ist jedoch die Anpassung bereits erschlossener Länder an immer weiter steigende Datenübertragungsanforderungen. Ein Beispiel ist der derzeitige FTTx-Ausbau. Auch transatlantische Unterseekabel werden aktuell ausgebaut (TERABIT CONSULTING 2014). Steigende Übertragungsansprüche können allerdings auch durch Fortschritte in der Übertragungstechnologie oder der Leistungsfähigkeit der Fasern erreicht werden. Diese Entwicklungen wirken dem Trend

stärkerer Nachfrage entgegen. Steigende Übertragungsansprüche bedeuten für ein Land einen kontinuierlichen Zuwachs des Bestandes, allerdings nicht unbedingt eine Erhöhung des jährlichen Zubaus (vgl. Abb. 2.1). So hatte der jährliche Zubau in Nordamerika und Westeuropa 2013 den gleichen Wert wie 2000 (GOMATAM 2014). Die entsprechende durchschnittliche jährliche Wachstumsrate ist Null (CAGR = 0).

Insgesamt ist aus der Erschließung von immer mehr Ländern und Regionen und der Steigerung der Übertragungsansprüche jedoch ein weltweites Wachstum des jährlichen Bedarfs an Glasfaserkabeln zu erwarten. Wir nehmen nach 2019 ein Wachstum entsprechend des von HAWKSWORTH et al. (2015) prognostizierten Weltwirtschaftswachstums an, weil dieses mit dem technologischen Fortschritt in Entwicklungsländern einen wesentlichen Treiber mit dem Glasfaserzubau gemeinsam hat. Bis 2019 wird das in MARKETS AND MARKETS (2014) prognostizierte Wachstum des Glasfasermarkts mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von CAGR = 5,1 % übernommen.

4.13.4 Foresight Rohstoffbedarf

Aus Sicht der vorliegenden Studie ist vor allem der Bedarf an Germanium für Glasfaserkabel interes-

Tab. 4.34: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Bedarf von Germanium für Glasfaserkabel in t

| Rohstoff | Produktion 2013 (Raffinadeproduktion) | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|-----------|--|-------------|----------------------|
| Germanium | 145 | 56 | 118 |

sant. 2013 betrug laut einer Studie von MERCHANT RESEARCH & CONSULTING (2014) der weltweite Bedarf an Germanium 143 t, wovon 39 % (also 56 t) auf die Herstellung von Glasfaserkabeln entfielen (AMBERLY 2014, MERCHANT RESEARCH & CONSULTING 2014).

Geht man davon aus, dass der Bedarf an Germanium für Glasfaserkabel entsprechend der jährlichen Wachstumsrate des Gesamtmarkts zunimmt, ergibt sich aus den im „Foresight industrielle Nutzung“ getroffenen Annahmen für 2035 ein Gesamtbedarf von 118 t. Die Substitution von Germaniumdioxid durch andere Dotierungen (Fluor, Bor, Phosphorpentoxid) ist grundsätzlich möglich und würde den prognostizierten Bedarf noch verringern.

4.13.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Aufgrund der sehr geringen Konzentration von Germaniumdioxid als Dotierung im Silikaglas ist eine Rückgewinnung von Germanium aus Glasfaserkabeln sehr unwahrscheinlich. Auch die sehr langen Lebensdauern sprechen nicht für eine aussichtsreiche Sekundärrohstoffquelle. Insgesamt gibt der USGS für Germanium eine seit Jahren konstante Recyclingrate von 30 % an, wobei bei der Herstellung von Elektronik 60 % des verwendeten Germaniums als Produktionsausschuss (*engl. new scrap*) anfallen und direkt wiederverwendet werden (USGS 2013a).

4.14 Mikroelektrische Kondensatoren

4.14.1 Technologiebeschreibung

Kondensatoren dienen der Speicherung von elektrischer Ladung und werden u. a. zur Aufrechterhaltung eines gleichmäßigen Stromes in Integrier-

ten Schaltkreisen (ICs) verwendet. Der Trend zur Miniaturisierung in der Mikroelektronik begünstigt kompakte Bauformen und damit indirekt Dielektrika in Kondensatoren mit einer hohen Dielektrizitätszahl.

Eine wichtige Unterscheidungslinie sind elektrolyt- und keramikbasierte Kondensatorstechnologien. Elektrolytkondensatoren mit Ta_2O_5 als Dielektrikum sind zwar schon 30–40 Jahre auf dem Markt, ihre überragenden Eigenschaften waren jedoch bis vor Kurzem eine Voraussetzung für miniaturisierte Mikroelektronik wie z. B. in Mobiltelefonen. Die hohe Nachfrage nach Tantal für diese Anwendung und die damit verbundenen hohen Preise haben zur Suche nach alternativen Lösungen geführt. Abb. 4.37 zeigt Applikationsbeispiele verschiedener Kondensatorstechnologien in Abhängigkeit von der Spannung und Kapazität.

Im Leistungsbereich von tantalbasierten Elektrolytkondensatoren, also Niederspannung mit mittlerer Kapazität, gibt es insbesondere Überlappungen mit niobbasierten Elektrolytkondensatoren, aber auch mit aluminiumbasierten Elektrolytkondensatoren und Keramik Kondensatoren. Die Hochpreisphase für Tantal um die Jahrtausendwende hat zwei zentrale Substitutionsbemühungen hervorgerufen: in Richtung von niobbasierten Elektrolytkondensatoren und keramischen Vielschicht-Kondensatoren (MULTI LAYER CERAMIC CAPACITORS MLCC).

Im Folgenden sind Aufbau und Funktionsweise der beiden Haupttypen, tantal-/niobbasierte Elektrolytkondensatoren und MLCC, beschrieben (Abb. 4.38, 4.39).

Beim Tantal-Elektrolytkondensator besteht die Anode aus Tantal, auf dem durch anodische Oxidation eine gleichmäßige, dielektrische Schicht aus Tantalpentoxid erzeugt wurde. Ein flüssiger oder fester Elektrolyt wie Braunstein (Mangandioxid) bildet die Kathode. Sie zeichnen sich durch einen

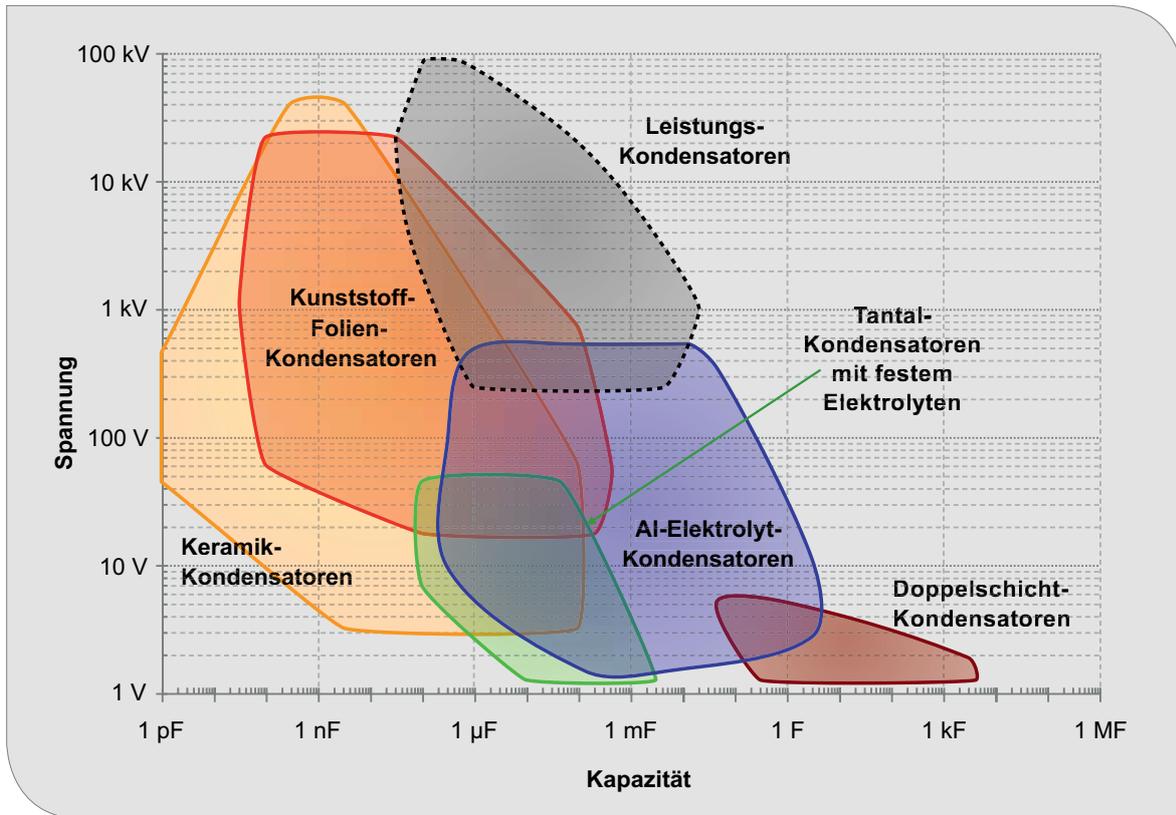


Abb. 4.37: Applikationsbeispiele verschiedener Kondensatorstechnologien
 (Quelle: ELCAP, CEPHEIDEN, WIKIMEDIA)

niedrigen Widerstand und eine hohe Kapazität bei gegebenem Volumen aus (WIKIPEDIA 2015a).

Ein MLCC-Kondensator besteht aus einer Vielzahl von einzelnen Keramikkondensatoren, die überei-

einander geschichtet und über die Anschlussflächen kontaktiert werden. Ausgangsmaterial aller MLCCs ist ein feingemahlenes Gemisch ferroelektrischer Grundstoffe wie Bariumtitanat ($BaTiO_3$), modifiziert durch Beimengungen von Zirkonium, Niob, Mag-

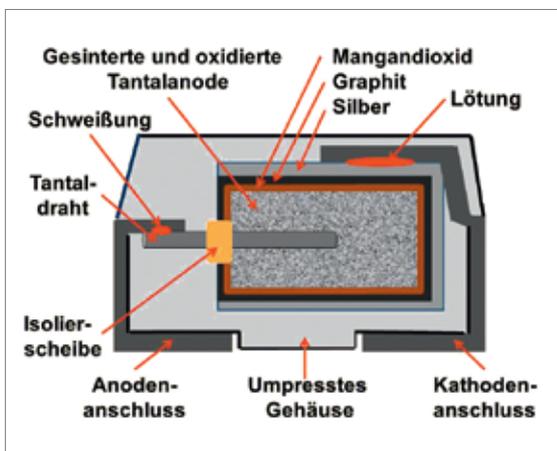


Abb. 4.38: Aufbau eines tantal-/niobbasierten Elektrolytkondensators
 (Quelle: ELCAP, WIKIMEDIA)

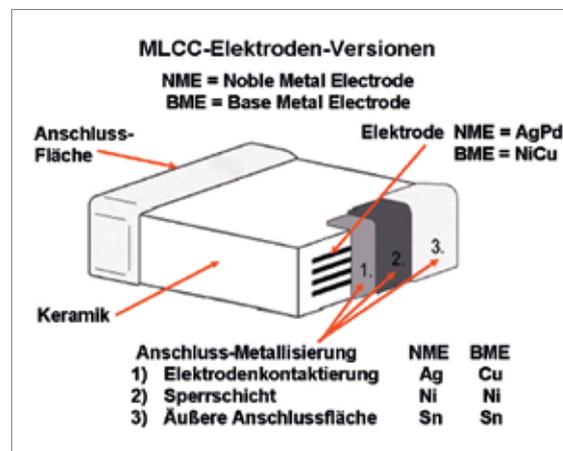


Abb. 4.39: Aufbau eines Keramischen Vielschichtkondensators MLCC
 (Quelle: ELCAP, J. BOTH, WIKIMEDIA)

nesium, Kobalt und Strontium, aus denen Folien hergestellt werden. Diese werden dann durch Elektrodendruck, Laminieren, Sintern usw. weiterverarbeitet. Dabei stellen die Zusammensetzung und Größe der Pulverpartikel ein wichtiges Know-how der Hersteller von Keramik-Kondensatoren dar (WIKIPEDIA 2015a).

Im Vergleich von Tantal- mit Niobkondensatoren zeigen sich folgende Eignungspräferenzen (ZED-NICEK 2006):

- Tantalkondensatoren mit MnO₂-Elektrode sind für Anwendungen bei hohen Temperaturen (bis 175 °C), hohen Spannungen (bis 50 V) und Zuverlässigkeitsanforderungen geeignet.
- Tantalkondensatoren mit Polymerelektrode eignen sich für Anwendungen mit geringeren elektrischen Anforderungen wie DC/DC-Konvertoren in Notebooks, PDA, Telekommunikation und anderen Anwendungen.
- Nioboxidkondensatoren sind eine Alternative zu Tantal-Kondensatoren mit gutem Preis-Leistungsverhältnis. Die Zuverlässigkeit im Ruhezustand macht sie nicht nur im Consumer-, sondern auch im High-End-Segment wie Automobil, Computer und gewerblichen Anwendungen zur ersten Wahl.

Als Vorteile von MLCC gegenüber Tantal-Kondensatoren werden u. a. geringere dielektrische Verluste, geringere Impedanz, sehr hohe Zuverlässigkeit des Dielektrikums, kleinere Abmessungen und

Kostenvorteile mit weiteren Reduktionspotenzialen genannt (MURATA 2007, WISCHNAT 2006).

Hinsichtlich des Elektrodenmaterials von MLCCs haben Silber-Palladium-Elektroden gegenüber Nickelelektroden und in geringerem Maße auch Kupferelektroden an Marktanteilen eingebüßt. Aufgrund ihrer Vorteile – u. a. nicht-magnetisch und gute Kompatibilität mit dem Dielektrikum – werden sie aber einige Anwendungsbereiche behalten (STEPHENSON et al. 2004).

Mit der Firma H.C. Starck in Goslar ist der Weltmarktführer in Aufbereitung und Vermarktung von Tantal in Deutschland angesiedelt. Der Markt für Kondensatoren mit hoher Kapazität wird von acht Herstellern dominiert.

4.14.2 Rohstoffinhalt

Hinsichtlich des Rohstoffbedarfs sind bei Elektrolytkondensatoren die Ta- bzw. Nb-Pentoxide als Dielektrika und bei MLCC die Elektroden aus Silber/Palladium oder Cu-Ni-Sn von besonderer Relevanz.

Ein Elektrolytkondensator besteht aus den aktiven Komponenten, der Einkapselung und dem Anschluss. Tabelle 4.35 zeigt die Zusammensetzung von Tantalkondensatoren gemäß ZVEI-„Umbrella-Spezifikation“ (ZVEI 2003).

Tab. 4.35: Zusammensetzung von Tantal-Kondensatoren gemäß ZVEI-„Umbrella-Spezifikation“ (Quelle: ZVEI 2003)

| Bauteil | Material | min [Gew.-%] | max [Gew.-%] | typisch [Gew.-%] |
|--------------------|--------------------------------|--------------|--------------|------------------|
| Aktive Komponenten | Ag-Paste | 1,8 | 3,8 | 2,6 |
| | MnO ₂ | 3,7 | 9,0 | 5,7 |
| | Tantal | 24,4 | 42,6 | 36,7 |
| | PTFE | 0,1 | 1,2 | 0,5 |
| Einkapselung | Epoxid (brominiert) | 0,1 | 1,6 | 1,0 |
| | Epoxy Resin | 36,0 | 54,0 | 40,0 |
| | Sb ₂ O ₃ | 0,9 | 1,3 | 1,1 |
| Anschluss | Fe(58)/Ni(42) Legierung | 6,8 | 13,9 | 10,1 |
| | Sn (Lötzinn) | 0,1 | 5,0 | 2,3 |
| Summe | | | | 100,0 |

Tab. 4.36: Zusammensetzung von MLCC gemäß ZVEI-„Umbrella-Spezifikation“
(Quelle: ZVEI 2003)

| Bauteil | Material | min [Gew.-%] | max [Gew.-%] | typisch [Gew.-%] |
|--------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| Aktive Komponenten | AgPd- oder Nickel-Elektrode | 1 | 8 | 4 |
| | BaTiO ₃ | 60 | 95 | 72 |
| | Bleiverbindungen | 0 | 10 | 0 |
| Anschluss | Cu(75-84)Ni(8-19)Sn(8-15) | 2 | 28 | 24 |
| | Ag(75-84)Ni(8-19)Sn(8-15) | | | |
| | Ni(85)/Sn(15) | 0 | 3 | 0 |
| | Blei (Bleilot) | | | |
| Summe | | | | 100 |

Bei 100 µF 6V Kondensatoren gelang von 1985 bis 2005 bei Tantal mit MnO₂-Elektrode eine Volumenreduktion von 100 mm³ auf 10 mm³, und bei den jüngeren Nioboxid-Kondensatoren eine Verkleinerung von 100 mm³ auf gut 50 mm³ zwischen 2002 und 2004 (ZEDNICEK 2006). Die relative Dielektrizitätskonstante von Ta₂O₅ liegt bei 27, die von Nb₂O₅ bei 41. Die größere Dielektrizitätskonstante von Nb₂O₅ wird allerdings durch die größere Dicke der Oxidschicht mehr als kompensiert, so dass die Bauformen mit Tantal kompakter ausgelegt werden können. Der flachste und leichteste Tantalkondensator mit 1,2 mm Bauhöhe wiegt gerade einmal 0,008 g, der schwerste mit 4,1 mm Bauhöhe wiegt 0,5 g (ZVEI 2003).

Ein MLCC-Kondensator besteht aus den aktiven Komponenten und dem Anschluss. Tabelle 4.36 zeigt die Zusammensetzung von MLCC-Kondensatoren gemäß ZVEI-„Umbrella-Spezifikation“ (ZVEI 2003).

In den MLCC-Kondensatoren ist das Dielektrikum BaTiO₃ bei manchen Modellen durch das aus Ressourcensicht weitgehend unkritische CaTiO₃ ersetzt. Beim Dielektrikum wird bei den sehr kleinen und leichten Baugrößen auch TiBaO₃, CaMgTiO₃ oder CaZrO₃ verwendet (TDK und Venkel Ltd). Bei den stark miniaturisierten Kondensatoren kommt anstelle des Kupfers im Keramik-Kontakt auch Silber mit typischerweise 4 Gew.-% zu Einsatz. Die typische Zusammensetzung von AgPd-Elektroden in MLCC-Kondensatoren liegt bei 70:30 bzw. 95:5 (STEPHENSON et al. 2004). MLCC-Kondensatoren wiegen zwischen 0,00017 g und 0,45 g (ZVEI 2003).

4.14.3 Foresight industrielle Nutzung

Das starke Nachfragewachstum bei Tantalkondensatoren kam vor allem aus dem Bereich der Mobiltelefone, Handhelds und Spiele. Inzwischen kommt immer mehr Nachfrage aus den Bereichen mit hohen Zuverlässigkeitsanforderungen wie Militär, Medizin und Automobil. Im Automobil gehören dazu Bereiche mit hohen Temperaturen wie die Motorsteuerung, Benzineinspritzung, Steer-by-Wire, Dieselmotorensteuerung und Übertragungssteuerung, aber auch im Betrieb mit Reifensensoren für Druck und Temperatur (EE TIMES ASIA 2008).

Es gibt derzeit keine öffentlich zugängliche Marktstudie zur Entwicklung des Marktes von miniaturisierten Kondensatoren. Aus einer Studie für das Jahr 2008 geht hervor, dass der Markt sich zwischen keramischen Kondensatoren (49 %), Aluminium- (29,5 %), Tantal- (16,9 %) und Filmkondensatoren (4,6 %) aufteilt (FROST & SULLIVAN 2009). Eine Voraussage bis 2035 in einem sich derart dynamisch entwickelnden Feld ist mit großen Unsicherheiten behaftet, wie auch ein Blick in die Vergangenheit illustriert:

- Für die ersten Pentium-Rechner brauchte man rund 50 Kondensatoren insgesamt; im Jahr 2001 waren es bereits 200–300 (WERNER & WEISS 2001).
- Alleine von 2003 auf 2005 stieg die Anzahl an Kondensatoren in einem Notebook (Tantal-MnO₂, Tantal-Polymer, Aluminium-Polymer und Nioboxid) von 19 auf 28 (ZEDNICEK 2006).

Dieser Wert dürfte heute deutlich höher liegen.

2006 haben die Verkäufe an Kondensatoren 8,2 Mrd. Stück erreicht (FROST & SULLIVAN 2009). Die größte Nachfrage kommt aus Asien und dort insbesondere aus China (Roos 2007).

Wachstum bei Tantalkondensatoren ist insbesondere bei geringeren elektrischen Anforderungen und bei geringer Bauhöhe (1–1,2 mm) sowie bei Anwendungen mit hohen Zuverlässigkeitsanforderungen wie Automobil und Militär zu erwarten. Insgesamt ist davon auszugehen, dass Tantalkondensatoren durch die MLCCs in Zukunft noch stärker unter Druck geraten (Roos 2007). Wo dies nicht der Fall ist, sind Niobkondensatoren aufgrund ihrer geringeren Kosten oft erste Wahl.

4.14.4 Foresight Rohstoffbedarf

Die Einstufung von Tantal als kritischer Rohstoff durch die EU im Jahr 2010 hat die Kondensatorhersteller zu starken Substitutionsbemühungen veranlasst. Die hohe Innovationsdynamik der

Branche hat vermutlich bereits zu einer hohen Ausschöpfung des Substitutionspotenzials geführt. Die fehlenden Angaben zum Gesamtmarkt und zur Zukunft des Kondensatormarktes lassen lediglich eine grobe Quantifizierung der Stoffströme zu.

Hinsichtlich des Gesamtmarktes wird angenommen, dass im Jahr 2006 die Tantal-/Niobkondensatoren mit 1,4 Mrd. Stück rund 17 % des gesamten Teilmarktes ausmachten. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass die oben genannten 49 % Keramikkondensatoren allesamt MLCCs sind. Die Tantal- und die Niobkondensatoren werden gemäß ZVEI-Umbrella-Spezifikation bilanziert; wobei die Tantalmenge vereinfacht 1:1 durch Niob ersetzt wird. Als Stückgewicht werden durchschnittlich 0,25 g angenommen. Bei den MLCC-Kondensatoren werden ebenfalls gemäß ZVEI-Umbrella-Spezifikation 0,2 g Gewicht angesetzt. Zur Hälfte haben die Kondensatoren silberhaltige Elektroden und Anschlüsse, zur anderen Hälfte nickel-zinnhaltige Elektroden und Anschlüsse.

Bis 2035 gibt es in der Simulation folgende Entwicklungen (Tab. 4.37):

Tab. 4.37: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf für miniaturisierte Kondensatoren in t

| Rohstoff | Produktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 | |
|-----------|----------------------------------|-------------|----------------------|--------------|
| | | | Projektion A | Projektion B |
| Tantal | 1.300 (B) | 128 | 360 | 1070 |
| Niob | 56.915 (B) | 102 | 250 | 710 |
| Barium | 5.431.156 ¹ | 347 | 812 | 2.300 |
| Titan | 235.700 (R) | 122 | 280 | 800 |
| Silber | 26.241 (B) | 70 | 170 | 480 |
| Mangan | 16.900.000 ² | 13 | 35 | 105 |
| Nickel | 2.601.745 (B) 1.955.132 (R) | 100 | 250 | 700 |
| Zinn | 289.790 (B) 362.996 (R) | 30 | 70 | 210 |
| Antimon | 160.865 (B) | 3 | 10 | 27 |
| Palladium | 205 (B) | 8 | 19 | 55 |
| Kupfer | 18.365.341 (B) 21.446.333 (R) | 52 | 120 | 350 |

B: Bergwerksförderung

R: Raffinadeproduktion

¹ Quelle: USGS 2015b berechnet

² Quelle: USGS 2015c

- Projektion A: Wachstum des Gesamtmarktes um 4 %/a bis 2035, Beibehaltung der heutigen Marktanteile mit einer Annahme von Materialeffizienzen: bei Elektrolytkondensatoren 10 % bzw. bei MLCC 25 %.
- Projektion B: Wachstum des Gesamtmarktes um 7 %/a, der Anteil der Tantal- und Niobkondensatoren wächst kontinuierlich bis 2035 auf 20 % auf Kosten des MLCC Anteils. Keine Materialeffizienzeffekte.

Die Zahl der Kondensatoren wächst in diesen Projektionen von rund 8 Mrd. Stück im Jahr 2006 auf 25–58 Mrd. Stück im Jahr 2035. Aufbauend auf diesen Annahmen ergeben sich folgende zukünftige Rohstoffbedarfe:

Tantal wird in beiden Projektionen im Jahr 2035 deutlich mehr nachgefragt werden als 2013. Heute gehen laut Literatur rund 60 % der Tantalproduktion in die Kondensatorfertigung (WILTS et al. 2014). Das Wachstum des Gesamtmarktes bis 2035 überkompensiert Materialeinsparungen und den sinkenden Marktanteil. Der gesamte Bedarf an Tantal 2035 liegt in der Größenordnung der heutigen globalen Tantalproduktion. Die äquivalenten Niobmengen heute und in Zukunft fallen angesichts der Jahresproduktion 2013 von 59.400 t kaum ins Gewicht.

Ein Wechsel hin zu MLCCs induziert eine überschaubare zusätzliche Nachfrage nach Barium- und Titan-Metall. Das Ausmaß dieser Marktverschiebung bestimmt erheblich die Entlastung des Tantalmarktes.

Obwohl der Marktanteil von Silber und Palladium in Elektroden von Kondensatoren in Zukunft wahrscheinlich deutlich sinkt, wächst die Rohstoffnachfrage durch die Marktausweitung in Zukunft weiter. Der Marktverschiebung beim Elektrodenmaterial von MLCCs hin zu Nickel und Zinn beeinflusst die entsprechenden Rohstoffmärkte für Nickel und Zinn nur wenig.

Auch die zusätzliche Rohstoffnachfrage nach Mangan und Antimon wie auch nach den nicht dargestellten Massenmetallen Eisen und Kupfer ist vernachlässigbar.

Die Berechnung geht davon aus, dass wesentliche Anwendungsbereiche von Tantal durch Niobkondensatoren bereits substituiert worden sind. Die eingeleiteten Marktverschiebungen von Elektrolyt-

zu Keramik Kondensatoren und von Ag/Pd-Elektroden hin zu nickel- oder kupferbasierten Elektroden entlasten die Rohstoffnachfrage nach Tantal, das Mengenwachstum wird aber voraussichtlich diesen Effekt überkompensieren, auch da Tantal katalysatoren in einigen Anwendungen essenziell sind und weder durch Niob- noch durch Keramik Kondensatoren ersetzt werden können.

4.14.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Ein Recycling von Tantal aus Endverbraucherabfällen findet kaum statt und liegt weltweit bei unter 1 %. Tantal wird dabei in Form von Superlegierungen oder als Hartmetall zurückgewonnen. Ein Recycling von Kondensatoren von Tantal wird nicht praktiziert. Das Recycling von Produktionsabfällen hingegen gehört zu den gängigen Verfahren, womit etwa 10 bis 25 % des Primärrohstoffes ersetzt werden können (WILTS et al. 2014).

4.15 Hochleistungs-Mikrochips

4.15.1 Technologiebeschreibung

Die meisten integrierten Schaltkreise basieren auf der Silizium-Technologie. Für besondere Leistungsanforderungen wird jedoch zunehmend auf Galliumarsenid (GaAs) und Silizium-Germanium (SiGe) als Halbleitermaterial zurückgegriffen.

Integrierte Schaltkreise werden in und auf Waferoberflächen hergestellt. Die Fläche auf dem Wafer, die das Halbleiterbauteil oder der integrierte Schaltkreis einnimmt, heißt „chip“, „microchip“, „die“ oder „bar“. Am Anfang der Produktion (front end of the line – FEOL) werden die Transistoren und andere elektronische Bauteile auf der Waferoberfläche hergestellt. Unternehmen wenden in einer Vielzahl von Abfolgen und Variationen vier Basisoperationen an, um Mikrochips zu produzieren. Diese sind: Beschichten („layering“), Musterung („patterning“), Dotierung („doping“) und Hitzebehandlung („heat treatment“).

Beim Beschichten werden dünne Schichten auf die Waferoberfläche aufgebracht. Diese Schichten können Isolatoren, Halbleiter oder Leiter sein. Verschiedene Materialien (z. B. Siliziumdioxid,

polykristallines Silizium, Germanium) werden mit unterschiedlichen Prozessen (Thermische Oxidation, chemische Dampfabcheidung, Verdampfung, Sputtern, Galvanisierung) auf den Wafer (z. B. Silizium oder GaAs) abgeschieden.

Die Musterung besteht aus einer Serie von Schritten, um ausgewählte Teile der aufgetragenen Schicht wieder zu entfernen. Folgende Prozesse existieren: Photomaskierung, Maskierung, Photolithographie, Oxidentfernung, Metallentfernung und Mikrolithographie. Die verschiedenen Teile der Transistoren, Dioden, Widerstände und Kondensatoren werden auf der Waferoberfläche – Schicht pro Schicht – herausgearbeitet. Das Ziel des Prozesses ist, die gewünschten Formen in der exakten Größe für den Schaltkreis zu erzeugen und diese am richtigen Ort in Relation zu den anderen elektrischen Bauelementen zu platzieren. Für einen typischen IC werden 20–40 Musterungsschritte benötigt.

Für die Dotierung werden genaue Mengen von elektrischem Dotiermaterial in die Waferoberfläche eingebracht. Zwei Techniken kommen zur Anwendung: thermische Diffusion und Ionen-Implantation. Ziel der Dotierung ist es, Bereiche in der Waferoberfläche zu schaffen, die entweder reich an Elektronen (n-Typ) oder reich an Löchern (p-Typ) sind. Diese sind elektrisch aktiv und bilden p-n-Übergänge, die für das Funktionieren von Dioden, Transistoren, Kondensatoren und Widerständen in den Schaltkreisen nötig sind.

Die Hitzebehandlung findet statt, um bestimmte Eigenschaften hervorzurufen. Es wird kein zusätzliches Material hinzugefügt oder entfernt.

Die vier Operationen werden dazu benutzt, um eine bestimmte Transistorstruktur zu bauen. Transistoren sind Halbleiterbauelemente, die als bipolare Ausführung als Stromverstärker arbeiten. Feldeffekttransistoren sind dagegen spannungsgeregelte Widerstände. Transistoren existieren als Einzelelemente oder werden in integrierten Schaltkreisen zu Tausenden auf kleiner Fläche zusammengeschlossen. Die anderen Komponenten, die für den Schaltkreis benötigt werden, werden während der Entstehung der Transistoren in anderen Bereichen des Wafers hergestellt.

Moderne Chipstrukturen sind um einiges komplizierter als die eben beschriebenen Prozesse. Sie

besitzen viele Schichten und Dotierbereiche. Die Komponenten der hochdichten Schaltkreise sind so schmal, dass sie selbst auf einem Photomikroskop vom gesamten Chip nicht erkannt werden können.

Galliumarsenid

Einige elektrische Eigenschaften von Galliumarsenid (GaAs) sind besser als die von Silizium. Die Elektronengeschwindigkeit und die Elektronenmobilität sind höher, was dazu führt, dass Transistoren hergestellt werden können, die bei mehreren hundert GHz arbeiten. Außerdem haben sie bei diesen hohen Frequenzen weniger Rauschen als Silizium-Bauteile und können bei höheren Leistungsstufen arbeiten, da sie eine höhere Durchschlagsspannung besitzen. Bauteile aus Galliumarsenid sind zehnmal schneller als Silizium Bauteile. Außerdem sind sie weniger stör anfällig und haben einen geringeren Energiebedarf. Wegen dieser Eigenschaften sind GaAs-Schaltkreise (GaAs-ICs) für Hochfrequenzleistungsanwendungen in Mobil-

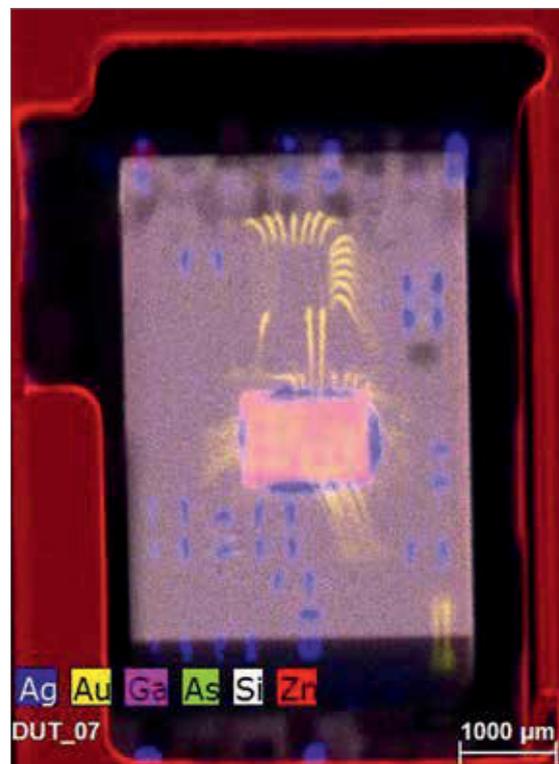


Abb. 4.40: Röntgenfluoreszenzaufnahme einer GaAs-basierten Halbleiterchips im Bauteil (Quelle: FRAUNHOFER IWKS 2014)

telefonen, für drahtlose lokale Netze (WLAN) und GPS besonders geeignet (HISCHIER et al. 2007, WIKIPEDIA 2008b). GaAs-ICs werden zudem in der Mikrowellenelektronik, in Kabelfernsehempfänger, in Telekommunikationsgeräten, beim Militär und in der Raumfahrt angewendet (YOLE 2012). Abb. 4.40 zeigt eine Röntgenfluoreszenzanalyse eines Bauteils, welches einen GaAs-basierten Halbleiterchip beinhaltet.

Germanium

Reine Germaniumwafer werden hauptsächlich als Substrat für III-V-Solarzellen benutzt. Ge-Wafer des Durchmessers von 300 mm können mit Hilfe des Czochralski-Kristallzuchtverfahrens hergestellt werden. Wird Germanium epitaxial auf Siliziumwafern gezüchtet, spricht man von epitaxialen Ge-Wafern (Ge – Germanium-on-Insulator). Ge bzw SiGe wird mittels chemischer Beschichtung aus der Gasphase (chemical vapour deposition) auf einem Siliziumsubstrat abgeschieden (siehe Abb. 4.41). Mit Siliziumgermanium (SiGe) wird die Legierung $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ bezeichnet, welche aus einem molaren Verhältnis von Silizium und Germanium besteht.

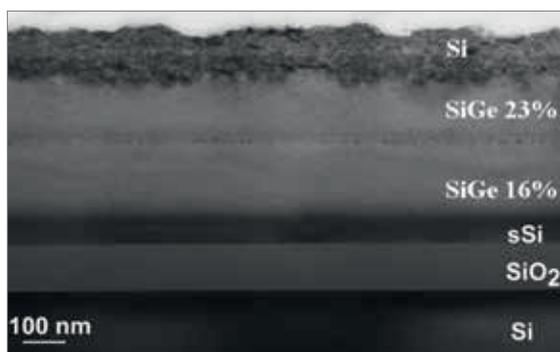


Abb. 4.41: Querschnittsansicht von SiGe-Schichten unterschiedlicher molarer Verhältnisse auf einem Siliziumwafer (Quelle: REICHE et al. 2008)

SiGe-Bauteile werden für drahtlose Geräte, drahtlose lokale Netzwerke (WLANS), optische Kommunikationssysteme, Festplatten, Automobilchips und Global Positioning Systeme (GPS) benutzt. SiGe-Transistoren sind kleiner, rauschen weniger und sind energieeffizienter, so dass sie die Batterielaufzeiten von mobilen Geräten verlängern. Sie arbeiten stabiler bei hohen Temperaturen und im ultra-hochfrequenten Bereich. Sehr schnelle SiGe-Chips können mit bekannten Produktionstechnologien der Siliziumchipindustrie hergestellt werden. SiGe-Prozesse sind ähnlich teuer wie die zur Silizium-CMOS-Herstellung, sind jedoch billiger als andere Heteroübergangstechnologien wie GaAs. Günstigere Materialkombinationen wie SiGe werden derzeit schon in bestimmten Bluetooth- und WLAN-Anwendungen verwendet und in Zukunft für „langsamere“ Hochfrequenzchips vermehrt verwendet werden und so die Bedeutung von GaAs verringern (YOLE 2012).

Galiumnitrid

Die Kristallzucht von Galiumnitrid (GaN) steht derzeit noch am Anfang. Als Substrat für Halbleiterelektronik ist GaN noch nicht verfügbar. Deswegen kann derzeit mit vernachlässigbaren Verbräuchen gerechnet werden. In Zukunft könnte GaN jedoch wegen seiner Eigenschaften ein Schlüsselmaterial werden (FREIBERGER 2008, SPLETTSTÖSSER 2008).

4.15.2 Rohstoffinhalt

Für die Herstellung der hochfrequenten Halbleiterchips werden so genannte halbisolierende GaAs-Substrate benötigt. Ein 6 Zoll Wafer hat nach Angaben von Waferherstellern eine Schichtdicke von 675 μm , 4 und 3 Zoll Wafer liegen bei 625 μm und 2 Zoll Wafer bei 350 μm (AXT o. J., FCM o. J.). Die Dichte beträgt 5,33 g/cm^3 (FCM o. J.). Beachtet man die unterschiedlichen Molmassen der Elemente Gallium und Arsen erhält man die in Tab. 4.38 angegebenen Mengen pro Wafer.

Tab. 4.38: Rohstoffbedarf für GaAs-Wafer (Quelle: eigene Berechnungen)

| Verbrauch | [kg/6" Wafer] | [kg/4" Wafer] | [kg/3" Wafer] | [kg/2" Wafer] |
|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Ga | 0,032 | 0,013 | 0,007 | 0,002 |
| As | 0,034 | 0,014 | 0,008 | 0,002 |

Hier ist anzumerken, dass nur mit dem reinen Rohstoffinhalt der Wafer gerechnet wird. Der Verbrauch von GaAs als dünne Epitaxieschicht 1 bis 5 Mikrometer ist vernachlässigt worden, weil diese Menge im Vergleich zum Materialverbrauch für die Substrate nicht ins Gewicht fällt (FREIBERGER 2008, SPLETTSTÖSSER 2008). Nach der Chipherstellung wird das GaAs-Substrat für die GaAs-Beschichtung weggeschliffen und das abgeschliffene Material je nach Hersteller einem Recycling zugeführt, bei dem Gallium zurückgewonnen wird (FREIBERGER 2008, SPLETTSTÖSSER 2008, USGS 2006).

4.15.3 Foresight industrielle Nutzung

Semi-insulating Gallium Arsenid Wafer

Der Mobiltelefonmarkt ist der Haupttreiber für basierte Hochfrequenzbauteile. Die Nachfrage nach Mobiltelefonen wird auch weiterhin der Wachstumstreiber für die GaAs-Industrie sein, während WLAN an Bedeutung zunehmen wird, da

immer mehr Geräte mit WLAN-Chips ausgerüstet werden (YOLE 2012).

YOLE (2012) prognostiziert den Markt für halbisolierende GaAs-Wafern unterschiedlicher Größe bis 2017. Dabei gewinnen 6 Zoll Wafer an Bedeutung, während das Wachstum von 3 und 4 Zoll Wafern negativ ist. Die Zahl der produzierten 2 Zoll Wafer nimmt nur langsam zu. Diese Trends wurden bis 2035 fortgeführt (Abb. 4.42).

Siliziumgermanium (SiGe)

Wegen der unterschiedlichen Nutzung von SiGe als Epitaxieschicht für Halbleiterbauelemente ist es sehr schwierig, den Germaniumbedarf für integrierte Schaltkreise abzuschätzen. Reine Germanium-Wafer werden hauptsächlich für Solarzellen genutzt. Bei epitaxialen (Si)Ge-Wafern sind die Schichten sehr dünn (0,2–2,5 Mikrometer). Der Germaniumbedarf für einen Wafer ist deshalb sehr gering. Da aber die Gesamtproduktion an SiGe-Wafern nicht bekannt ist, kann der Rohstoffbedarf hier nicht abgeschätzt werden.

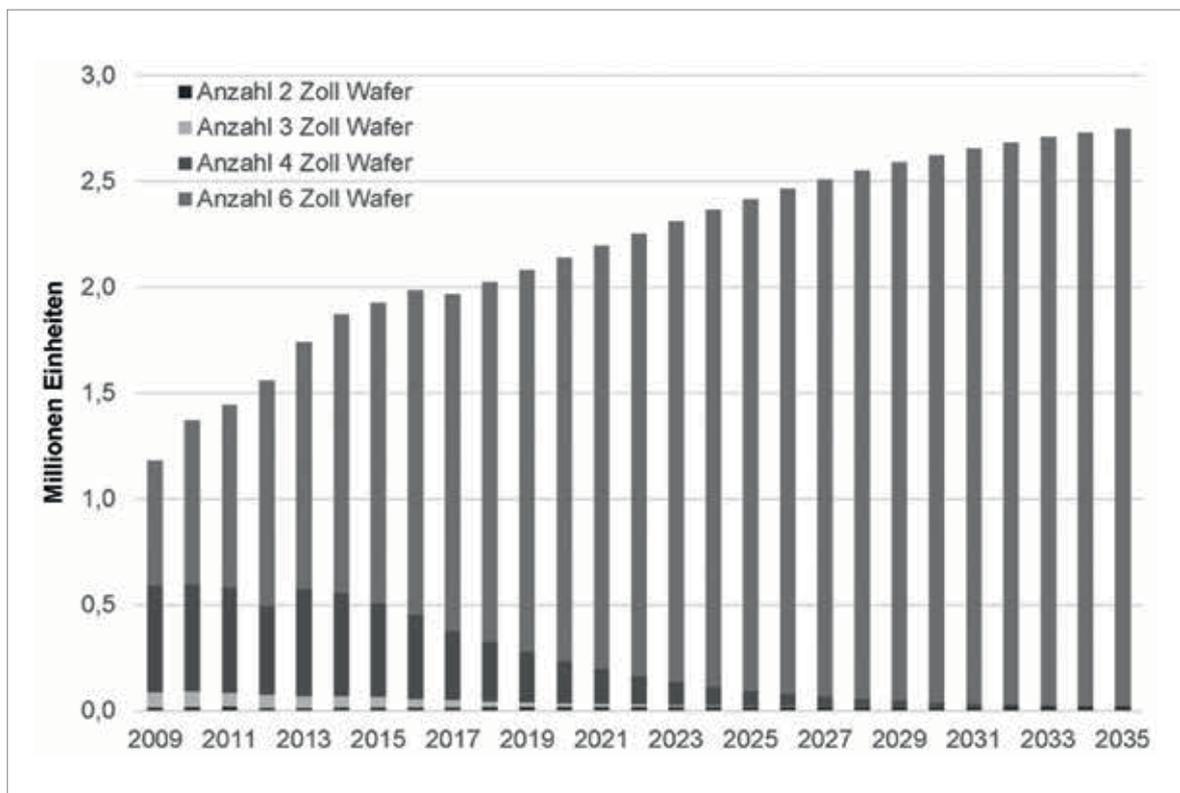


Abb. 4.42: Markt für halbisolierende GaAs-Wafer in Millionen verkaufter Einheiten

Tab. 4.39: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf für GaAs-Wafer in t

| Rohstoff | Produktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|----------|----------------------|-------------|----------------------|
| Gallium | 350 (P) ¹ | 38 | 86 |
| Arsen | 35.331 (H) | 47 | 93 |

H: Hüttenproduktion

P: Primärproduktion

¹ Quelle: USGS 2015a

4.15.4 Foresight Rohstoffbedarf

Mit den Daten aus Tab. 4.38 und Abb. 4.42 wurde der Bedarf an Gallium und Arsen im Jahr 2013 und 2035 berechnet (siehe Tab. 4.39).

Nach dieser Abschätzung befinden sich im Jahr 2013 ca. 14 % der Galliumproduktion in GaAs-Substraten, die für die Produktion von Hochfrequenz-Halbleiterchips benötigt werden. Laut Indium Corporation wurden 2010 ca. 40 % der Jahresproduktion für GaAs-ICs benötigt (ca. 165 t) (European Commission 2014a), was ca. der zehnfachen Menge des Substratinhaltes von 2010 entspricht. Die 165 t umfassen allerdings neben den „Verlusten“ für die Ingot- und Waferproduktion noch den Materialbedarf für die Beschichtungsprozesse der Chipfertigung.

Im Jahr 2035 ist der Galliumbedarf für GaAs-Wafer etwa doppelt so hoch wie im Jahr 2013. Legt man hier den gleichen Faktor wie im Jahr 2012 für den eigentlichen produktionsspezifischen Rohstoffbedarf zugrunde und geht man davon aus, dass 90 % des Produktionsabfalls recycelt wird, werden im Jahr 2035 etwa 120 t Gallium für die Produktion benötigt. Der Arsenbedarf fällt weder im Jahr 2013 noch im Jahr 2035 im Vergleich zu Jahresproduktion ins Gewicht.

Die deutlich geringere zukünftige Gallium-Nachfrage im Vergleich zu ANGERER et al. 2009 ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass die Wachstumsraten bis 2035 deutlich niedriger ausfallen als damals angenommen.

Aufgrund der dynamischen Entwicklung der Halbleiterbauelemente und möglichen Halbleitermaterialien ist der Bedarf an Gallium auf lange Zeiträume schwer abzuschätzen. Einige Epitaxieschichten wie SiGe oder GaN mit ihren oben genannten Vorteilen stehen am Anfang der Entwicklung. Hoch-

frequenzbauteilhersteller suchen nach anderen Materialien, die die Materialkosten senken können. Während GaAs die wichtigste Technologie für „mainstream“ Hochfrequenzanwendungen bleiben wird, werden andere Materialien wie SiGe bei manchen Anwendungen wie z. B. W-LAN verstärkt eingesetzt werden (YOLE 2012).

4.15.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Es gibt bisher wenige Informationen zu den Mengen, die für die GaAs-Substratherstellung benötigt werden. Unveröffentlichte Datenerhebungen eines Substratherstellers ergeben, dass ca. ein Drittel des GaAs für die GaAs-Kristallzüchtung und die Substratherstellung am Ende im fertigen Substrat landet, der Rest des Materials fällt als Produktionsausschuss an. Ein großer Teil der Verluste (u. a. Köpfe, Füße, Tiegelreste) kann aufgrund ihrer Reinheit intern im Kreislauf geführt werden. Aus Sägeschlämmen kann Gallium extern zurückgewonnen werden. Der USGS (2012b) gibt die weltweite Recyclingkapazität für Gallium-Produktionsausschuss mit 200 t an, was dafür spricht, dass ein großer Teil des Produktionsausschusses recycelt wird. Eine genaue Berechnung des Nettobedarfs für die Produktion des Substrats war hier jedoch nicht möglich.

Ein Recycling von Gallium aus Elektronikprodukten nach ihrer Nutzung findet derzeit nicht statt; unter anderem weil der ökonomische Anreiz größer ist, die in den Komponenten enthaltenen Edelmetalle pyrometallurgisch zu recyceln, wobei das Gallium in der Schlacke landet. Das hydrometallurgische Recycling von Gallium aus Produktionsabfällen der Photovoltaikproduktion ist technisch möglich (MARWEDE 2013). Bisher existieren jedoch keine Versuche, ob eine Extraktion auch aus Bauteilen möglich ist. Die Vielzahl der chemischen Elemente

im Bauteil, die geringe Konzentration von Gallium im Bauteil und die vorher notwendige Detektion und Trennung der Bauteile aus dem Elektronikschrott stellt die ökonomische Machbarkeit in Frage. Die Feinverteilung des Galliums in unterschiedlichen Produkten und Komponenten macht zudem die Sammlung ausreichender Mengen für das Recycling schwierig.

Auch die Möglichkeit der Substitution von Gallium in ICs ist begrenzt, da die GaAs-basierte ICs extra für die Applikationen entwickelt wurden, für die siliziumbasierte Halbleiter nicht ausreichen, so dass die Substitution dieser Komponenten ohne Funktions- oder Leistungsverlust nicht möglich ist (TERCERO ESPINOZA et al. 2014). Auch SiGe kann GaAs nur in manchen Anwendungen ersetzen.

Energie-, Elektro- und Antriebstechnik

4.16 Ultraeffiziente industrielle Elektromotoren

4.16.1 Technologiebeschreibung

Elektromotoren sind die zentralen Antriebsaggregate für Pumpen, Ventilatoren, Kompressoren, Maschinen, Geräte, Elektrowerkzeuge, Schienenfahrzeuge usw. In industriellen Anwendungen sind Asynchronmotoren (s. Abb. 4.43) die am weitesten verbreitete Motortechnologie, da sie kostengünstig, robust und wartungsarm sind. In der Regel arbeiten sie mit einem Kurzschlussläuferrotor. Dieser Rotor besteht aus Stäben eines Nichteisenmetalls, die an beiden Enden kurzgeschlossen sind und auch als „Läufer“ oder „Käfig“ bezeichnet werden. Sie sind in ein Eisenblechpaket eingebettet. Ein magnetisches Drehfeld am Stator induziert in den Metallstäben Läuferströme, welche ein eigenes Magnetfeld erzeugen. Aus der Wechselwirkung der beiden Magnetfelder resultiert die Drehbewegung des Rotors.

Für spezielle Anwendungen (z. B. Servomotoren) kommen auch permanenterregte Synchronmotoren zum Einsatz. Bei der Entwicklung neuer ultraeffizienter Motorkonzepte finden Reluktanzmotoren vermehrt Beachtung (BROSCH 2013).

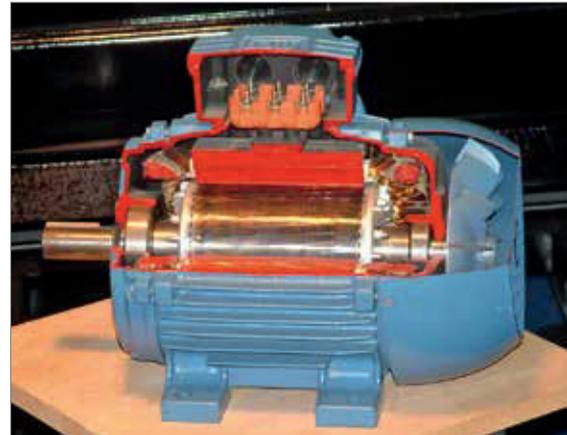


Abb. 4.43: Aufbau eines Asynchronmotors mit Kurzschlussläuferrotor
(Quelle: S.J. DE WAARD, CC BY 2.5)

Mindestenergieeffizienzstandards

Weltweit gibt es einen Trend zur Etablierung bzw. Erhöhung von Mindestenergieeffizianzorderungen (MEPS) an industrielle Motoren. Länder mit solchen Mindestenergieeffizianzorderungen hatten 2015 ca. 70 % Anteil am globalen Stromverbrauch (KULTERER 2014). Zur Vereinheitlichung verschiedener Standardsysteme wurden die internationalen Effizienzklassen geschaffen. Sie gelten für Drei-Phasen-Käfigläufer-Asynchronmotoren und sollen auf andere Motortypen erweitert werden (CEMEP 2011, KULTERER 2014). Tab. 4.40 gibt

Tab. 4.40: Internationale Effizienzklassen (IEC) im Vergleich zu vorangegangenen Standardsystemen. Motoren der Klasse IE5 sind derzeit noch nicht verfügbar

| Internationale Effizienzklassen | Ehemalige Effizienzklassen | |
|---------------------------------|----------------------------|--------------|
| | EU | USA |
| IE5 Ultra Premium Efficiency | | |
| IE4 Super Premium Efficiency | | |
| IE3 Premium Efficiency | | NEMA Premium |
| IE2 High Efficiency | Eff 1 | EPact |
| IE1 Standard Efficiency | Eff 2 | |
| | Eff 3 | |

↑ Effizienz steigt

Tab. 4.41: Mindesteffizienz in % in den Effizienzklassen IE1–IE3 für beispielhaft ausgewählte Motorparameter

| 4 Pole, 50 Hz | IE1 | IE2 | IE3 |
|------------------|------|------|------|
| 1,1 kW | 75,0 | 81,4 | 84,1 |
| 11 kW | 87,6 | 89,8 | 91,4 |
| 110 kW | 93,3 | 94,5 | 95,4 |

eine Übersicht der Effizienzklassen im Vergleich zu einigen vorangegangenen Standardsystemen. Die geforderte Mindesteffizienz in den jeweiligen Klassen hängt von Motoreigenschaften wie Leistung und Anzahl der Pole ab. Tab. 4.41 zeigt dies für einige Beispiele. In der EU müssen ab 2015 alle neu zugelassenen Motoren mit einer Leistung über 7,5 kW und ab 2017 auch alle neu zugelassenen Motoren mit einer Leistung über 0,75 kW entweder die Effizienzklasse IE3 erreichen oder mit einem Frequenzumwandler zur elektronischen Drehzahlregelung ausgestattet sein und die Effizienzklasse IE2 erreichen (EU-Verordnung 640/2009).

Technologieentwicklung zur Erreichung der Mindestenergieeffizienzstandards

Die steigenden Effizianzforderungen erfordern technologische Weiterentwicklungen. Dabei bieten viele Motorhersteller gleich mehrere Konzepte bzw. Produktreihen für energieeffiziente Motoren an. Dies liegt v. a. daran, dass die am besten geeignete Technologie in Abhängigkeit von Motorparametern (z. B. Leistung, Drehzahl) und Anwendungskriterien (z. B. Auslastung) von Fall zu Fall unterschiedlich ist. Wichtig ist vielen Herstellern, die äußeren Abmessungen des Motors konstant zu halten, damit die neu entwickelten, energieeffizienten Motoren in bestehende industrielle Systeme integriert werden können (ELEKTROTECHNIK VOGEL 2010).

Eine Möglichkeit zur Effizienzsteigerung ist der Wechsel des Materials des Kurzschlussläufers am Rotor. Bei Motoren der Effizienzklassen IE1 und IE2 besteht der Kurzschlussläufer in der Regel aus Aluminium. Wird stattdessen Kupfer verwendet, sind je nach Motorparametern Steigerungen von ca. 2,5 % möglich (GRABNER 2013). Durch den Wechsel vom Aluminium- zum Kupfer-Kurz-

schlussläufer kann eine Steigerung von der IE2- zur IE3-Klasse mit geringen oder gar keinen Volumenvergrößerungen gelingen (ELEKTROTECHNIK VOGEL 2010). Weitere konstruktive Elemente zur Effizienzsteigerung können Bleche mit geringeren spezifischen Eisenverlusten, größere Leiterquerschnitte in der Wicklung oder flussoptimierte Windungszahlen und verkleinerte Wickelköpfe sein. Andere Lösungen sind eine Optimierung der Ansteuerung oder der Umstieg auf einen alternativen Motorentyp wie Synchronmotor oder Reluktanzmotor (ELEKTROTECHNIK VOGEL 2010).

Der Hersteller ATB geht davon aus, dass auch die für die Zukunft geplante Effizienzklasse IE5 mit Asynchronmotoren erreichbar sein wird. Allerdings wird ab IE5 ein Kupferläuferkäfig notwendig sein, während IE3 und IE4 noch mit Aluminiumläuferkäfigen erreicht werden können (GRABNER 2013).

SEW Eurodrive verwendet in IE3-Motoren bestimmter Größen Kupferläuferkäfige. Zur Erreichung der IE4-Standards wurden verstärkt permanenterregte Synchronmotoren und Kombinationslösungen der asynchronen und synchronen Technologie entwickelt (NOLTE 2012).

Siemens gibt ebenfalls an, die Klassen IE3 und IE4 mit Asynchronmotoren zu erreichen. Für die IE4-Klasse entwickelte der Konzern darüber hinaus Synchron-Reluktanzmotoren.

Auch die Unternehmen ABB und KSB bieten Synchron-Reluktanzmotoren in der Klasse IE4 an (ELEKTROTECHNIK VOGEL 2013, KSBAG 3/23/2012).

4.16.2 Rohstoffinhalt

Das EUROPEAN COMMITTEE OF MANUFACTURERS OF ELECTRICAL MACHINES AND POWER ELECTRONICS (2011) geht davon aus, dass der Materialbedarf mit den steigenden Effizienzklassen zunimmt. Tab. 4.42 gibt den durchschnittlichen Rohstoffgehalt für verschieden große Motoren der Klassen IE1 und IE2 gemäß CEMEP (2011) an. Für Motoren der Klassen IE3 und IE4 konnten keine entsprechenden Zahlen ermittelt werden.

Die Verwendung eines Kupferläuferkäfigs statt eines Aluminiumläuferkäfigs erhöht den Kupferbedarf eines Asynchronmotors deutlich, wie Tab. 4.43 an einem Beispiel belegt.

Tab. 4.42: Durchschnittlicher Rohstoffgehalt von Motoren der Effizienzklassen IE1 und IE2 in kg pro kW gemäß (CEMEP 2011)

| kg/kW | 1,1 kW, IE1 | 1,1 kW, IE2 | 11 kW, IE1 | 11 kW, IE2 | 110 kW, IE1 | 110 kW, IE2 |
|------------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|
| Weichmagn. Stahl | 5,40 | 8,00 | 3,60 | 4,80 | 3,10 | 3,60 |
| Anderer Stahl | 1,50 | 1,60 | 0,95 | 1,00 | 0,67 | 0,70 |
| Gusseisen | 2,50 | 2,50 | 1,30 | 1,30 | 3,00 | 3,00 |
| Aluminium | 1,70 | 2,00 | 0,90 | 1,00 | 0,18 | 0,20 |
| Kupfer | 1,24 | 1,90 | 0,64 | 0,90 | 0,54 | 0,60 |
| Isoliermaterial | 0,05 | 0,05 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 |
| Packmaterial | 1,00 | 1,00 | 0,90 | 0,90 | 0,50 | 0,50 |
| Imprägnierharz | 0,30 | 0,30 | 0,10 | 0,10 | 0,05 | 0,05 |
| Farbe | 0,10 | 0,10 | 0,05 | 0,05 | 0,01 | 0,01 |

Für die Alternativtechnologie permanenterregter Synchronmotoren werden permanentmagnetische Materialien benötigt, wobei Ferrite oder NdFeB-Magnete zum Einsatz kommen können (vgl. Kapitel 4.2, 4.38).

Der Rotor von Reluktanzmotoren besteht aus einem magnetisch hoch permeablen, weichmagnetischen Werkstoff. In der Regel kommen hier Elektrobleche zum Einsatz. Dabei handelt es sich um einen Stahlwerkstoff mit Silizium- und Aluminiumanteilen von bis zu 4 % und geringeren Mengen von Mangan, Schwefel und Stickstoff (STAHL-INFORMATIONEN-ZENTRUM 2005).

Tab. 4.43: Kupfergehalt von vierpoligen 5,5 und 11 kW Kurzschlussläufermotoren mit Aluminium- und Kupferrotoren (ANGERER et al. 2009)

| | Aluminiumrotor | | Kupferrotor | |
|--------------------------|----------------|-------|-------------|-------|
| | 5,5 kW | 11 kW | 5,5 kW | 11 kW |
| Kupfermasse Stator in kg | 7,3 | 10,2 | 4,4 | 8,7 |
| Kupfermasse Rotor in kg | 0,0 | 0,0 | 3,6 | 5,9 |
| Kupfermasse gesamt in kg | 7,3 | 10,2 | 8,0 | 14,6 |

4.16.3 Foresight industrielle Nutzung

Der weltweit anhaltende Trend zur Einführung und Erhöhung von Effizienzmindeststandards (MEPS) wird Hersteller weiter zur Entwicklung effizienter Technologien motivieren (RESEARCH AND MARKETS 2015). Im Fokus stehen dabei allerdings nicht nur die Motoren, sondern zunehmend effiziente Gesamtlösungen unter Berücksichtigung von Getrieben und anderen Komponenten.

4.16.4 Foresight Rohstoffbedarf

Da Kupfer ein vielfältig eingesetzter Massenrohstoff ist, wird die weltweite Gesamtnachfrage selbst bei flächendeckendem Einsatz von Kupferläuferkäfigen in industriellen Motoren nur um weniger als 10 % steigen (ANGERER et al. 2009). Ein vermehrter Einsatz von Synchron-Reluktanzmotoren würde dagegen eine geringere Nachfrage an Kupfer und Aluminium bedeuten (BROSCH 2013). Ein starker Zugewinn der permanenterregten Synchronmotoren mit seltenerdelementhaltigen Magneten über die bereits existierenden Anwendungen hinaus ist in der breiten industriellen Anwendung nicht anzunehmen, da sie mit wesentlich höheren Kosten verbunden sind und ihre Vorteile des geringeren Gewichts und Volumens in vielen industriellen Anwendungen nicht ausschlaggebend ist (vgl. Kapitel 4.2, 4.38). Insgesamt sind daher ausgehend von Technologien für ultraeffiziente industrielle Motoren keine ungewöhnlichen Impulse auf die Rohstoffnachfrage abzusehen.

4.16.5 Recycling, Ressourcen-effizienz und Substitution

Kupfer gehört wie Eisen und Aluminium zu den Metallen mit etablierten Massenrecyclingströmen. Beim Recycling von Motoren werden die Komponenten getrennt und den jeweiligen Recyclingströmen zugeordnet. Im Vergleich zu anderen Metallen erreichen die Massenrohstoffe Kupfer, Eisen und Aluminium hohe Recyclingquoten (GRAEDEL et al. 2011). Die weltweite Recyclingrate von Kupfer nach der Nutzungsphase der Produkte (End-of-Life-Recycling-Rate: EoL-RR) lag von 2000 bis 2010 bei $45\% \pm 5\%$ (GLÖSER et al. 2013). Ein Schlüssel zur Erhöhung der globalen Recyclingquote ist die Verbesserung der Sammlung von Industriemotoren am Ende ihrer Nutzungsphase.

4.17 Thermoelektrische Generatoren

4.17.1 Technologiebeschreibung

Bei vielen technischen Prozessen, insbesondere Verbrennungsprozessen, entsteht Abwärme. Kann diese nicht direkt verwertet werden, z. B. über Wärmetauscher zur Luftvorwärmung, bietet sich die Erzeugung von Elektrizität aus der Abwärme an. Dies lohnt sich v. a. für Kraftwerke und Transportmittel (Fahrzeuge, Flugzeuge, etc.), bei denen sich der erzeugte Strom in der Regel direkt nutzen lässt. Zur Umwandlung von Abwärme in Elektrizität eignen sich neben klassischen Dampfturbinen und ORC-Anlagen (Organic Rankine Cycle) auch Thermoelektrische Generatoren (TEG).

Funktionsweise und Kenngrößen

Die Umwandlung von Wärme zu Strom durch thermoelektrische Generatoren beruht auf dem Seebeck-Effekt: Zwischen zwei Stellen eines elektrisch leitenden Materials entsteht eine elektrische Potenzialdifferenz (Spannung), wenn diese unterschiedliche Temperaturen aufweisen. Im Bereich höherer Temperaturen bewegen sich die für die elektrische Leitung zuständigen Elektronen schneller als im Bereich niedrigerer Temperaturen. So kommt es zu einer Anreicherung der Elektronen im kälteren Bereich. Die entstehende Potenzialdifferenz bewirkt einen Rückfluss von Elektronen, der

die Anreicherung ausgleicht. Es entsteht eine für das spezifische Leitermaterial charakteristische Spannung:

$$(1) \quad U = \alpha \cdot \Delta T$$

U : Spannung in V

α : Seebeck-Konstante (Thermokraft) in V/K
 ΔT : Temperaturdifferenz zwischen der heißen und kalten Stelle in K

Für einen hohen Wirkungsgrad sollte ein thermoelektrisches Material bei einer bestimmten Temperaturdifferenz eine möglichst hohe Spannung liefern. Dafür sollte seine elektrische Leitfähigkeit möglichst hoch sein, um einen ausreichenden Elektronenfluss zu garantieren. Gleichzeitig sollte die thermische Leitfähigkeit möglichst gering sein, um die Temperaturdifferenz aufrecht zu erhalten. Dies ist auch aus dem elektrischen Wirkungsgrad eines thermoelektrischen Generators η_i ersichtlich, in den die elektrische Leitfähigkeit direkt proportional, die thermische Leitfähigkeit umgekehrt proportional eingeht.

$$(2) \quad P = \frac{A}{l} \cdot \sigma \cdot \alpha^2 \cdot (\Delta T)^2$$

$$(3) \quad Q = \frac{A}{l} \cdot \kappa \cdot \Delta T$$

$$(4) \quad \eta_i = \frac{P}{Q} = \alpha^2 \cdot \frac{\sigma}{\kappa} \cdot \Delta T$$

P : elektrische Leistung in W

Q : Wärmeleistung in W

A : Leiterquerschnitt in m^2

l : Leiterlänge in m

σ : elektrische Leitfähigkeit in $1/\Omega \cdot m$

κ : Wärmeleitfähigkeit in $W/m \cdot K$

η_i : (innerer) elektrischer Wirkungsgrad des TEG (dimensionslos)

Als Kennzahl für die thermoelektrische Leistungsfähigkeit eines Stoffes wird meist der dimensionslose „ZT-Wert“ angegeben, bei dem gegenüber dem inneren Wirkungsgrad die Temperaturdifferenz durch den Temperaturmittelwert ersetzt ist. Der ZT-Wert ist somit nicht nur materialabhängig, sondern auch temperaturabhängig.

$$(5) \quad ZT = \alpha^2 \cdot \frac{\sigma}{\kappa} \cdot \bar{T}$$

σ : elektrische Leitfähigkeit in $1/\Omega \cdot m$

κ : Wärmeleitfähigkeit in $W/m \cdot K$

\bar{T} Mittelwert der Temperaturen an der heißen und kalten Stelle in K (Lexikon der Physik 1970)

Der elektrische Wirkungsgrad η_i des thermoelektrischen Generators wird auch als innerer Wirkungsgrad bezeichnet, da er das Verhältnis von Leistung zu Wärme im Generator angibt, allerdings nicht den Grad der Ausnutzung der Wärmequelle (bspw. eines Abgasstroms) beinhaltet. Diese Effizienz der Wärmeauskoppelung gibt der äußere Wirkungsgrad η_a wieder:

$$(6) \quad \eta_a = 1 - \frac{T_{out}}{T_{in}}$$

- η_a : Wirkungsgrad der Wärmeauskoppelung
- T_{in} : Temperatur des Wärmestroms vor dem TEG
- T_{out} : Temperatur des Wärmestroms nach dem TEG

Der Gesamtwirkungsgrad der thermoelektrischen Anwendung ist das Produkt aus den Teilwirkungsgraden. Er gibt an, welcher Anteil des Wärmeangebots in Elektrizität umgewandelt wird.

$$\eta = \eta_i \cdot \eta_a$$

Für thermoelektrische Generatoren geeignete Materialien mit hoher elektrischer, aber geringer Wärmeleitfähigkeit, sind selten, da eine gute Elektronenleitung in der Regel mit einer guten Phononenleitung und somit Wärmeleitung einhergeht. So sind bei Metallen Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit hoch, bei Isolatoren sind beide gering. Halbleiter haben bei beiden Größen mittlere Werte und erreichen die besten ZT-Werte, wie aus Tab. 4.44 hervorgeht. Zur Maximierung von ZT-Werten wird derzeit intensive Materialforschung betrieben (Details s. Kapitel 4.17.2).

Im thermoelektrischen Generator sind n- und p-leitende Halbleiterschichten über Drähte verbunden und elektrisch in Reihe geschaltet, wodurch ein kontinuierlicher Stromfluss ermöglicht wird. Der Stromkreis ist senkrecht zum Temperaturgefälle angeordnet (s. Abb. 4.44). Über Wärmetauscher wird an der heißen Seite des Generators Wärme antransportiert, an der kalten Seite gekühlt bzw. Wärme abtransportiert. Die thermoelektrischen Module müssen große Temperaturgradienten und entsprechende Belastungen und Verformungen über viele Erwärmungs- und Abkühlungsdurchgänge aushalten.

Neben den Eigenschaften der thermoelektrischen Materialien (s. Kapitel 4.17.2) muss deshalb auch das gesamte Moduldesign optimiert werden. Dazu zählen elektrische Verbindungselemente („Drähte“), Wärmetauscher und der Wechselrichter zur Umwandlung des erzeugten Gleichstroms in Wechselstrom.

Anforderungen an thermoelektrische Materialien bzw. Generatoren

Neben einem möglichst hohen ZT-Wert des thermoelektrischen Materials und weitergehend einem hohen Wirkungsgrad des Generators insgesamt gibt es noch zahlreiche weitere Anforderungen an TEG:

- Langzeitstabilität (chemische, mechanische, thermische Stabilität)
- Leistungsdichte in W/cm² (je höher die Leistungsdichte, desto weniger Gewicht hat der thermoelektrische Generator)
- Kosten in Euro/Watt
- Verfügbarkeit der eingesetzten Materialien
- Umweltverträglichkeit

Tab. 4.44: Thermoelektrische Eigenschaften von Isolatoren, Metallen und Halbleitern bei Raumtemperatur nach (FLEURIAL 1993)

| | | Isolatoren | Metalle | Halbleiter |
|------------------------------------|----------------------|-------------------|------------------|-----------------|
| Seebeck-Konstante α | 10 ⁻⁶ V/K | 1.000 | 5 | 200 |
| Elektrische Leitfähigkeit σ | 1/Ω m | 10 ⁻¹⁰ | 10 ⁸ | 10 ⁵ |
| Wärmeleitfähigkeit κ | W/m K | 0,1–1 | 10–1.000 | 1–100 |
| Kennzahl ZT | 1 | 10 ⁻¹⁴ | 10 ⁻³ | 0,1–2,2 |

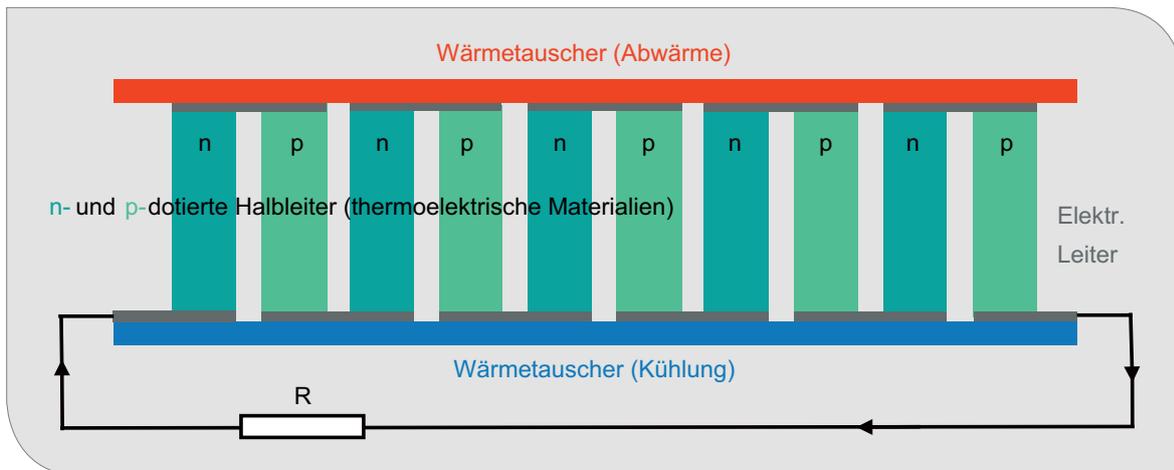


Abb. 4.44: Aufbau eines thermoelektrischen Generators
(Quelle: eigene Darstellung)

Für konkrete Anwendungen ist außerdem wichtig, dass der temperaturabhängige ZT-Wert des Materials auch im relevanten Temperaturbereich hoch ist.

Vor- und Nachteile gegenüber Konkurrenztechnologien und resultierende Anwendungsfelder

Gegenüber anderen Technologien zur Umwandlung von Abwärme in Elektrizität, v. a. ORC-Anlagen, haben thermoelektrische Generatoren einen geringeren Wirkungsgrad. Vorteilhaft ist jedoch der einfache Aufbau der thermoelektrischen Generatoren, aus dem sich eine hohe Verlässlichkeit und Lebensdauer sowie ein geringer Wartungsaufwand ergibt. Zudem sind thermoelektrische Generatoren skalierbar und können dezentral an die jeweilige Anwendung angepasst eingesetzt werden. Sie eignen sich außerdem für Anwendungen, bei denen bewegliche Teile ausgeschlossen sind und arbeiten geräuschlos. Im Temperaturbereich unter 100 °C wären thermoelektrische Generatoren konkurrenzlos, es existieren aber noch keine marktreifen Lösungen (WIETSCHEL et al. 2010).

Bisher kamen thermoelektrische Generatoren daher v. a. in Nischenanwendungen (z. B. energieautarke Sensoren, Herzschrittmacher, Campingzubehör) zum Einsatz. In der Raumfahrt und beim Militär finden thermoelektrische Generatoren Anwendung, da dort die Verlässlichkeit im Vordergrund steht und Kosten eine geringe Rolle spielen.

In der Raumfahrt garantieren Thermoelektrika die Stromversorgung, wenn Solarzellen aufgrund großer Entfernung zu Lichtquellen ungeeignet sind.

4.17.2 Rohstoffinhalt

Verschiedene Materialien, die als Thermoelektrika angedacht sind, haben jeweils Vor- und Nachteile bezüglich der in Kapitel 4.17.1 aufgezählten Eignungskriterien. Bereits kommerziell eingesetzt werden:

- PbTe
- Bi₂Te₃
- BiSb
- SiGe

Um den ZT-Wert eines Materials zu steigern, wird seine Kristallstruktur zur Störung der Wärmeleitung gezielt so beeinflusst, dass Phononen gestreut werden. Gleichzeitig soll der Elektronenfluss bzw. die elektrische Leitung durch die Strukturänderungen möglichst wenig beeinträchtigt werden. Solche Strukturmodifikationen können zum einen durch Nanostrukturierung realisiert werden, zum anderen durch schwach gebundene Atome oder Moleküle in sogenannten PGEC-Strukturen (Phonon Glass Electron Crystal), welche phononenstreuende Schwingungen verursachen. Letzteres führt zu komplexen chemischen Zusammensetzungen, wie bspw. bei Skutteruditen (s. u.). In der Erforschung und Entwicklung befinden sich folgende Materialien (die Schreibweise [X,Y,Z], bedeutet,

dass X, Y, und Z sich gegenseitig substituieren und daher in variablen Mengen enthalten sein können):

- Oxide, z. B. $Zn_{0,96}Al_{0,02}Ga_{0,02}O$, $NaCo_2O_4$
- Silizide, z. B. $FeSi_2$, $Mg_2[Si,Ge,Sn]$;
 $Ru_{0,1}Mn_{0,9}Si_y$; $MnSi_{1,73}$
- Skutterudite, $X_yCo_4Sb_{12}$, X: Sr, Ba, La, Yb, Ce, Nd, Er, In; $Yb_{12}Ca_2MnSb_{11}$
- Half-Heusler-Materialien, $[Hf,Zr][Co,Ni,Fe][Sn,Sb]$
- Sulfosalze, z. B. $Cu_{12}[S](SbS_3)_4$
- Nanostrukturiertes Silizium
- Polymere

In kommerziell umgesetzten thermoelektrischen Generatoren werden ZT-Werte von ca. 1 erreicht, was u. a. auch aufgrund verbesserungswürdiger Kontaktsysteme zu Gesamtwirkungsgraden von 2–8 % führt. In der Forschung wurden bereits ZT-Werte von bis zu 2,4 erreicht.

Für Thermoelektrische Generatoren kommen zurzeit sehr unterschiedliche Materialien in Betracht, in welchen wiederum viele verschiedene Elemente enthalten sein können. Zusätzlich befindet sich die Mehrzahl der oben genannten Werkstoffe in einem frühen Entwicklungsstadium, so dass nicht abgeschätzt werden kann, welche Rohstoffe für TEG in Zukunft wichtig sein werden. Einige der oben aufgezählten Werkstoffe enthalten Elemente, die als potenziell rohstoffkritisch angesehen werden (Te, Sn, Co, In, Ga, Er, Ru, Hf).

4.17.3 Foresight industrielle Nutzung

Momentan kommerziell eingesetzte Thermoelektrika (Bi_2Te_3 , $PbTe$, $SiGe$, $BiSb$ oder $FeSi_2$) erreichen reale Wirkungsgrade von 2–8 %. Daraus ergeben sich Kosten von ca. 3–8 Euro/W. Als konkurrenzfähig werden die thermoelektrischen Generatoren ab Kosten von 1 Euro/W eingeschätzt (WIETSCHEL et al. 2010). Laut (KÖNIG et al. 1025) kann der Preis für TEG-erzeugten Strom durch Skaleneffekte und Leistungssteigerungen (Material-, Modul und Generatorverbesserungen, Materialeinsparungen) auf ca. 0,5 \$/W gesenkt werden. Die Kosten für das thermoelektrische Material betragen z. B. bei einem Skutterudit-TEG ca. 25 % der gesamten Generatorkosten.

Um für zukünftige Massenwendungen tauglich zu sein, müssen die vielversprechenden ZT-Werte der momentan im Labor untersuchten thermoelektrischen Materialien auch in der Praxis realisiert werden. Neben diesen Materialien gilt es auch, den gesamten Modul- und Generatorkaufbau zu optimieren.

Half-Heusler- und Skutterudit-Materialien werden bereits im kg-Maßstab hergestellt, für einen Einsatz in Massenwendungen sind aber größere Maßstäbe erforderlich. Daneben müssen auch die Produktionskapazitäten vom Labormaßstab auf 100–1.000 TEG monatlich gesteigert werden (KÖNIG et al. 2015).

Als erste Breitenanwendung ist der Einsatz in Blockheizkraftwerken (BHKW) und Kraftfahrzeugen angedacht. In Blockheizkraftwerken können TEG den Anteil der produzierten Elektrizität gegenüber der erzeugten Wärme um 3–5 % erhöhen. Gegenüber den konkurrierenden ORC-Anlagen haben sie kürzere Amortisationszeiten (KÖNIG et al. 2015).

In Kraftfahrzeugen kann aus der Wärme des Abgasstroms Elektrizität für das Bordnetz gewonnen werden. Das Bordnetz versorgt eine wachsende Anzahl elektronischer Komponenten (z. B. Ventile) und erfüllt stetig mehr Funktionen. Momentan benötigt es 300–400 W. In der Vorlaufforschung wurde mit einem Bi_2Te_3 -TEG (Leistung ca. 500 W) in einem Kleintransporter eine Treibstoffeinsparung von ca. 2,2 % (nach „Neuem Europäischen Fahrzyklus“) bis 3,9 % (nach „Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure“) erzielt. Je nach Quelle werden zukünftige Treibgaseinsparungen von 7–15 % und maximale TEG-Auslegungsgrößen von 600–1.200 W als wahrscheinlich angenommen, z. B. (ZERVOS 2014, BRÜNGLINGHAUS 2013). Für 2017/18 sind Vorserien mit TEG-Ausstattung geplant, 2020 soll die Technologie bei Premiumfahrzeugen in Serie gehen. Dazu muss allerdings noch die ausreichende Langzeitstabilität der TEG bewiesen werden, insbesondere unter zyklischen Temperaturänderungen konventioneller PKW-Motoren. Ein gut geeigneter Anwendungsfall sind daher Range-Extender-Motoren in Hybridfahrzeugen, deren Temperatur weniger schwankt. Darüber hinaus kann in Hybridfahrzeugen neben dem Bordnetz auch die Antriebsbatterie mit dem gewonnenen Strom gespeist werden. In LKW ist aufgrund des konstanteren Betriebspunktes eine bessere

Auslegung als in PKW möglich. Als Konkurrenz sind ORC-Anlagen in der Entwicklung. 2020 soll ein erstes ORC-System in LKW eingesetzt werden, welches anschließend auch für Hybrid-PKW produziert werden soll (FAURECIA 2015).

Daneben können thermoelektrische Generatoren in Kraftwerken, Fertigungseinrichtungen und Rechenzentren Verwendung finden. Entscheidend ist dabei, ob es zum Temperaturniveau der jeweiligen Anlage passende TEG gibt. Bei vielen Industrieanlagen ist eine großflächige Anordnung der TEG gut zur Abwärmenutzung geeignet. Liegt allerdings ein gebündelter Wärmestrom vor, eignen sich ORC-Anlagen besser.

Bei Schiffen sind je nach Leistungsklassen ORC-Anlagen oder Thermoelektrische Generatoren im Vorteil, wobei für ORC-Anlagen bereits Demonstratoren existieren. Bei Flugzeugen sind TEG aufgrund ihres geringeren Gewichts von Vorteil, bisher gibt es aber nur vereinzelt Anwendungsbeispiele, z. B. die elektrische Versorgung von Sensoren in der Flugzeughülle.

Generell stellt die elektrische Versorgung von Sensoren laut ZERVOS (2014) den größten Wachstumsmarkt für TEG dar. Insbesondere für Sensoren an abgelegenen Orten stellen die Unabhängigkeit von Stromnetzanschluss und Batteriewechsel sowie die hohe Verlässlichkeit und der geringe Wartungsbedarf der TEG einen entscheidenden Vorteil dar. Beispiele sind Messstationen an Gas- und Öl-Pipelines und Offshore-Plattformen.

Auch Endverbraucheranwendungen (TEG-angedriebene Kochsensoren zur Energieeinsparung, körperwärmeangetriebene Uhren und Smartphones, Kleidung mit Sensoren zur Überwachung von Körperfunktionen, etc.) werden als zukünftige Einsatzgebiete von TEG diskutiert (ZERVOS 2014). Flexible Substrate werden derzeit erforscht.

Insgesamt soll der TEG-Markt zwischen 2014 und 2024 von 40 Mio. Dollar auf 950 Mio. Dollar anwachsen, wobei Militär und Raumfahrt die größten Märkte bleiben sollen (ZERVOS 2014).

4.17.4 Foresight Rohstoffbedarf

Thermoelektrische Generatoren haben großes Potenzial in verschiedenen Anwendungssegmen-

ten, insbesondere im Kraftfahrzeugbereich. Aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums der Technologie und der konkurrierenden Materialsysteme kann der Rohstoffbedarfs 2035 nicht seriös abgeschätzt werden.

4.17.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Je komplexer die chemische Zusammensetzung der thermoelektrischen Materialien ist, desto aufwendiger wird es sein, einzelne Elemente im Recycling zurückzugewinnen.

4.18 Farbstoffsolarzellen

4.18.1 Technologiebeschreibung

Farbstoffsolarzellen (FSZ) oder auch Grätzel-Zellen (nach dem Erfinder Michael Grätzel) wandeln elektromagnetische Strahlung im Spektralbereich des Sonnenlichts in elektrische Energie um, leisten also photovoltaische Energieumwandlungen. Im Gegensatz zu den weit verbreiteten Halbleitersolarzellen (z. B. Siliziumsolarzellen, Dünnschichtsolarzellen) nutzen sie zur Absorption des Lichts organische Farbstoffe.

Aufbau und Funktionsweise

Der Aufbau einer Grätzelzelle ist in Abb. 4.45 dargestellt.

Die Einfassung bzw. das Substrat besteht aus zwei parallelen, üblicherweise 3 mm starken Glasplatten im Abstand von 50 μm . Die Innenseiten der Glasplatten sind mit einem transparenten, elektrisch leitfähigen Material (TCO, transparent conducting oxide) beschichtet, üblicherweise Zinndioxid (SnO_2). Eine Seite, die Anode (auch als Arbeitselektrode bezeichnet), trägt eine nanoporöse, mikrometerstarke Schicht Titandioxid (TiO_2). Die nanoporöse Textur des TiO_2 erzeugt eine möglichst große Oberfläche, auf der eine monomolekulare Farbstoffschicht (häufig ein metallorganischer Rutheniumkomplex, s. Kapitel 4.18.2) adsorbiert ist. Auf der Kathode (sog. Gegenelektrode) ist eine katalytische Platinschicht (ca. 0,5 μm) aufgebracht. Zwischen den beiden Elektroden befindet

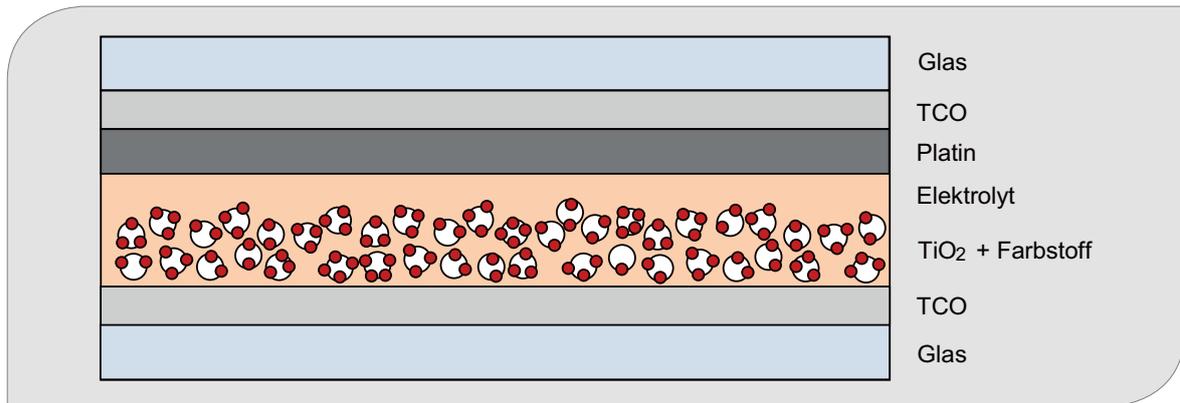


Abb. 4.45: Standardaufbau einer Farbstoffsolarzelle (Quelle: eigene Darstellung)

sich ein Elektrolyt (standardmäßig eine KI/I₂-Lösung).

Durch Lichteinstrahlung (Photonen) werden Elektronen der Farbstoffmoleküle energetisch angeregt und gehen direkt in das Leitungsband des benachbarten TiO₂ über, welches energetisch tiefer als das Leitungsband des Farbstoffes liegt. Die Elektronen diffundieren im Leitungsband des TiO₂ zur Anode. Die Farbstoffmoleküle kompensieren die abgegebenen Elektronen, indem sie dem Elektrolyten (KI/I₂) Elektronen entziehen, wodurch in der Elektrolytschicht I⁻-Ionen zu I₃⁻-Ionen oxidiert werden. Diese Reaktion verläuft gegenüber der Rekombination der Farbstoffmoleküle mit den angeregten Elektronen sehr schnell und verhindert somit diese Rekombination. Die I₃⁻-Ionen diffundieren zur Kathode und werden dort zu I⁻-Ionen reduziert. Durch einen externen Stromkreislauf fließen die Elektronen von der Anode zur Kathode. Dieser Stromfluss kann als elektrische Leistung gewonnen werden.

Herstellung

Farbstoffsolarzellen können durch einfache Siebdruck- und Glassintertechniken produziert werden. Die Produktion auf Glas eignet sich für Farbstoffsolarzellen sehr gut, da sie höhere Herstellungstemperaturen als die Produktion auf flexiblen Kunststoffsubstraten ermöglicht, was bessere Zelleigenschaften zur Folge hat. Außerdem eignet sich Glas sehr gut als Verkapselung, welche ein Austreten der zum Teil flüssigen Inhaltsstoffe verhindert. Entsprechende Barrierefolien für flexible Farbstoffsolarzellen werden ebenfalls entwickelt.

Anwendung, Vor- und Nachteile gegenüber kristallinen Siliziumsolarzellen

Bisher kamen Farbstoffsolarzellen hauptsächlich in tragbaren Innenraum- und Outdoor-Anwendungen (z. B. mobile Ladegeräte, Solarrucksäcke) zum Einsatz (ZERVOS 2013). Für Innenraum-Anwendungen eignen sie sich, da sie diffuses Licht besser als andere Solarzellen absorbieren können. So können Farbstoffsolarzellen unter Innenraumbedingungen Leistungen über 18 % erreichen (HINSCH et al. 2014).

Durch Semitransparenz bzw. verschiedene Farben (s. Abb. 4.46) bieten Farbstoffsolarmodule vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten in der Architektur, z. B. in der Fassadengestaltung und der



Abb. 4.46 Prototyp einer Farbstoffsolarzellen (Quelle: Fraunhofer ISE)

farbigen Fenstergestaltung. Durch dezentralisierte Produktion ergeben sich individuelle Gestaltungsmöglichkeiten (HINSCH et al. 2014). Einige Projekte an Häuserfassaden wurden bereits umgesetzt (EPFL 2013). Eine teilweise Transparenz ist dabei allerdings immer mit einer Verringerung der Lichtabsorption und somit des Wirkungsgrades verbunden. Für den Einsatz in der Architektur sind Langzeitstabilitäten von 20–25 Jahren Voraussetzung (HINSCH et al. 2014).

Als großer Vorteil der Farbstoffsolarzellen gilt, dass ihre Herstellung im Vergleich zu klassischen Siliziumsolarzellen weniger Energie benötigt und kostengünstiger ist. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die produzierten Farbstoffsolarzellen aufgrund des geringeren Wirkungsgrades auch weniger Strom erzeugen. Die Kosten pro Watt sowie die Gesamtenergiebilanz sind dadurch also nicht automatisch günstiger. Zusätzlich bedeutet ein geringerer Wirkungsgrad auch einen erhöhten Flächenbedarf, um die gleiche elektrische Leistung zu erzeugen, was einen ökonomischen wie ökologischen Faktor darstellt. Hinzu kommt, dass der Preis der letztendlich installierten Module nicht nur durch Komponenten der Solarzellen bestimmt wird, sondern Modulkomponenten (bspw. Kabel) einen erheblichen Anteil an den Gesamtkosten haben können (bei multikristallinen Siliziumsolarzellen derzeit ca. 50 %). Außerdem ist der Preis für Siliziumsolarzellen bzw. -Module durch den massiven Eintritt chinesischer Produzenten in den Photovoltaikmarkt insgesamt deutlich gesunken. Dies verringert den potenziellen Preisvorteil von Farbstoffsolarzellen.

Hauptproblem der Farbstoffsolarzellen ist jedoch ihre noch immer ungenügende Langzeitstabilität (EPIA & GREENPEACE 2011, ZERVOS 2013). Insbesondere die unter Laborbedingungen gemessenen Rekordwirkungsgrade (12 % Zelle, 9,9 % kleinere Module, HINSCH et al. 2014) konnten noch nicht anwendungsnah mit akzeptablen Langzeitstabilitäten umgesetzt werden. Der Wirkungsgrad kommerziell erhältlicher Farbstoffsolarzellen von 2–4 % (EPIA & GREENPEACE 2011) ist deutlich geringer. Hingegen garantieren Hersteller von kristallinen Silizium-Solarzellen einen Wirkungsgrad von 15–19 %, der über 20 Jahre hinweg nicht auf weniger als 80 % des Ausgangswerts abfällt.

Daneben stellen die flüssigen Elektrolyte der Farbstoffsolarzellen in der Handhabung eine Her-

ausforderung dar, weil sie bei niedrigen Temperaturen einfrieren können und bei hohen Temperaturen durch Ausdehnung die Versiegelung gefährden können (GRAND VIEW RESEARCH 2015a). Als Alternative wurden feste Elektrolyte, meist erstarrte Salzschnmelzen, entwickelt (FELLMAN 2012).

Insgesamt werden Farbstoffsolarzellen derzeit nicht als Konkurrenzprodukt zu Siliziumsolarzellen und anderen Solarzellen zur Stromerzeugung in größeren Kraftwerken gesehen (HINSCH et al. 2014).

Konkurrenztechnologie organische Solarzellen

Organische Solarzellen bieten ähnlich wie Farbstoffsolarzellen Gestaltungsmöglichkeiten durch Transparenz- und Farbeffekte. Mit Wirkungsgraden von ca. 12 % im Labor liegen die organischen Solarzellen leicht unter den mit Farbstoffzellen erreichbaren Werten. In der praktischen Anwendung können 4–6 % erbracht werden (EPIA & GREENPEACE 2011). Größter Optimierungsbedarf besteht wie bei den Farbstoffsolarzellen in der Langzeitstabilität. Die vollständig festen Bestandteile vereinfachen jedoch eine Verkapselung mit Kunststofffolien und somit eine kostengünstige Produktion sowie flexible Anwendungsoptionen (z. B. in Kleidung). Organische Solarmaterialien benötigen keine anorganischen Rohstoffe, was sie kostengünstig und im Sinne dieser Studie rohstoffunkritisch macht. Die Produktion von flexiblen organischen Solarzellen mit Kunststoffsubstrat bzw. -Verkapselung ist auch ohne das bei Dünnschichtsolarzellen übliche Indium-Zinn-Oxid (ITO) möglich (FRAUNHOFER ISE 2014).

Perowskitsolarzellen

Zunächst wurde Methylammoniumbleijodid ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$), eine Verbindung mit Perowskitstruktur, als Substitut für den rutheniumhaltigen metallorganischen Farbstoff in Farbstoffsolarzellen getestet (Abb. 4.47). Anschließend gelang es allerdings auch, Solarzellen mit Methylammoniumbleijodid als Halbleiter zu bauen. Perowskitsolarzellen konnten in ungewöhnlich kurzer Zeit hohe Labor-Wirkungsgrade erreichen (z. B. 14,1 % (HINSCH et al. 2014)). Dies brachte der Technologie großes Forschungsinteresse ein. Im Gegen-

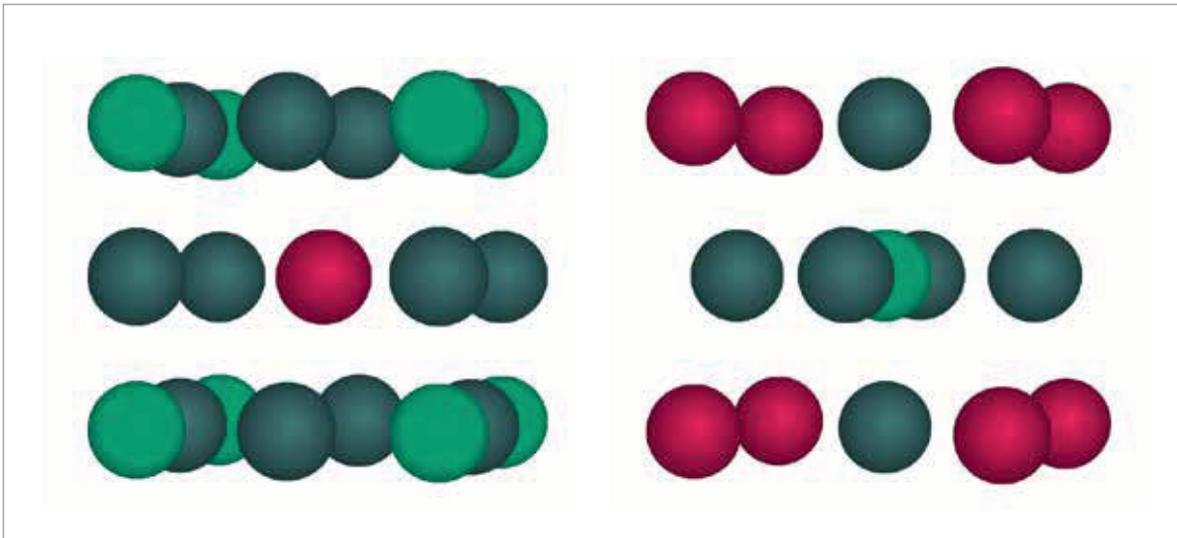


Abb. 4.47: Elementarzelle der Perowskitstruktur in zwei verschiedenen Aufstellungen.
Links: CH_3NH_3^+ (rot) in zentraler Position (wird von grauen I⁻-Ionen kuboktaedrisch koordiniert. Rechts: Pb^{2+} -Ionen (grün) in zentraler Position (werden von grauen I⁻-Ionen oktaedrisch koordiniert) (Quelle: eigene Darstellung)

satz zu anderen Solarzellen hängt der gemessene Wirkungsgrad bei Perowskitsolarzellen von Zellaufbau und Messsystematik ab, wofür mittlerweile jedoch Standardbedingungen definiert wurden. Welchen Wirkungsgrad Perowskitsolarmodule im praktischen Einsatz erreichen werden, lässt sich noch nicht abschätzen. Vorrang vor einer Erhöhung des Wirkungsgrades hat aber die Realisierung von Zellen und Modulen mit hoher Langzeitstabilität. Umwelt- bzw. genehmigungsproblematisch ist der Inhaltsstoff Blei. Daher wird nach geeigneten Substituten gesucht. Zinn wird als potenzielles Bleisubstitut gehandelt.

4.18.2 Rohstoffinhalt

Als rohstoffkritisch galt bei Farbstoffsolarzellen vordergründig die Verwendung des Platinmetalls Ruthenium für den metallorganischen Farbstoffkomplex. Die intensive Suche nach Substituten hat inzwischen einige Alternativen hervorgebracht. Metall-organische Ruthenium-Farbstoffe erreichen Wirkungsgrade von 10,7–11,9 %, organische Zink-Porphyrin-Farbstoffe 12,3 % und rein organische Farbstoffe 9,8 % (HINSCH et al. 2014). Entscheidender als diese Labor-Rekordwirkungsgrade dürften die in kommerziellen Anwendungen erreichten Werte und deren Langzeitstabilität sein. Die Möglichkeit langzeitstabiler Farbstoffsolarzel-

len mit rein organischen Farbstoffen wurde bereits demonstriert (HINSCH et al. 2014).

Der Einsatz von Platin an der Gegenelektrode der FSZ ist noch immer weit verbreitet, auch wenn Substitute (z. B. Kobaltsulfid CoS) intensiv erforscht werden (HINSCH et al. 2014). Als Elektrolyt kann neben KI/I_2 auch Kobalt-Bipyridin $[\text{Co}(\text{bpd})_3]^{2+/3+}$ Verwendung finden.

Laut (HINSCH et al. 2014) enthalten Farbstoffsolarzellen der ersten Generation $0,1 \text{ g/m}^2$ Ru, $0,02 \text{ g/m}^2$ Pt und $1\text{--}3 \text{ g/m}^2$ I_2 . Beim Einsatz von Kobalt-Bipyridin-Elektrolyten werden $0,5 \text{ g/m}^2$ Co benötigt. Der Bedarf für Perowskitsolarzellen beträgt weniger als $0,2 \text{ g/m}^2$ Pb (bzw. Sn, Bi, Fe) und $0,3 \text{ g/m}^2$ I_2 .

4.18.3 Foresight industrielle Nutzung

Ein wesentliches Anwendungsfeld für Farbstoffsolarzellen werden auch zukünftig tragbare Applikationen wie mobile Ladegeräte und Outdoor-Zubehör sein (ZERVOS 2013, EPIA, GREENPEACE 2011, GRAND VIEW RESEARCH 2015a). Weiterhin werden Farbstoffsolarzellen in der architektonischen Gestaltung Verwendung finden, wobei neben Häu- serfassaden und halbtransparenten Fenstern auch

Bushaltestellen ein interessantes Anwendungsfeld darstellen (ZERVOS 2013). Einen darüberhinausgehenden Einsatz zur Stromerzeugung in Kraftwerken schätzen wir aufgrund der unter 4.18.1 diskutierten Vor- und Nachteile der Farbstoffsolarzellen als unwahrscheinlich ein.

In allen potenziellen Anwendungen stehen Farbstoffsolarzellen in Konkurrenz zu organischen Solarzellen. Perowskitsolarzellen befinden sich noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium, könnten aber zu einer starken Konkurrenz heranwachsen (s. Kapitel 4.18.1).

Mehrere Pilotanlagen zur Produktion von Farbstoffsolarzellen wurden bzw. werden gebaut. Eine erste Produktionslinie besteht seit 2012 (HINSCH et al. 2014). Entscheidende Erfolgsfaktoren für den Durchbruch zur Massenproduktion, insbesondere in architektonischen Anwendungen, werden Fortschritte bei der Langzeitstabilität der Farbstoffsolarzellen sein.

4.18.4 Foresight Rohstoffbedarf

Für Farbstoffsolarzellen der zweiten Generation sind auch bei größeren Produktionsvolumen keine Rohstoffverfügbarkeitsprobleme abzusehen (HINSCH et al. 2014).

4.18.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Substitutionsmöglichkeiten existieren auf Technologieebene (Farbstoffsolarzellen/organische Solarzellen) und Materialebene (metallorganischer Rutheniumkomplex/organische Farbstoffe).

4.19 Dünnschicht-Photovoltaik

4.19.1 Technologiebeschreibung

Unter Dünnschichttechnologie wird das Auftragen von festen Stoffen im Mikro- bzw. Nanometerbereich bis hin zu monomolekularen Schich-

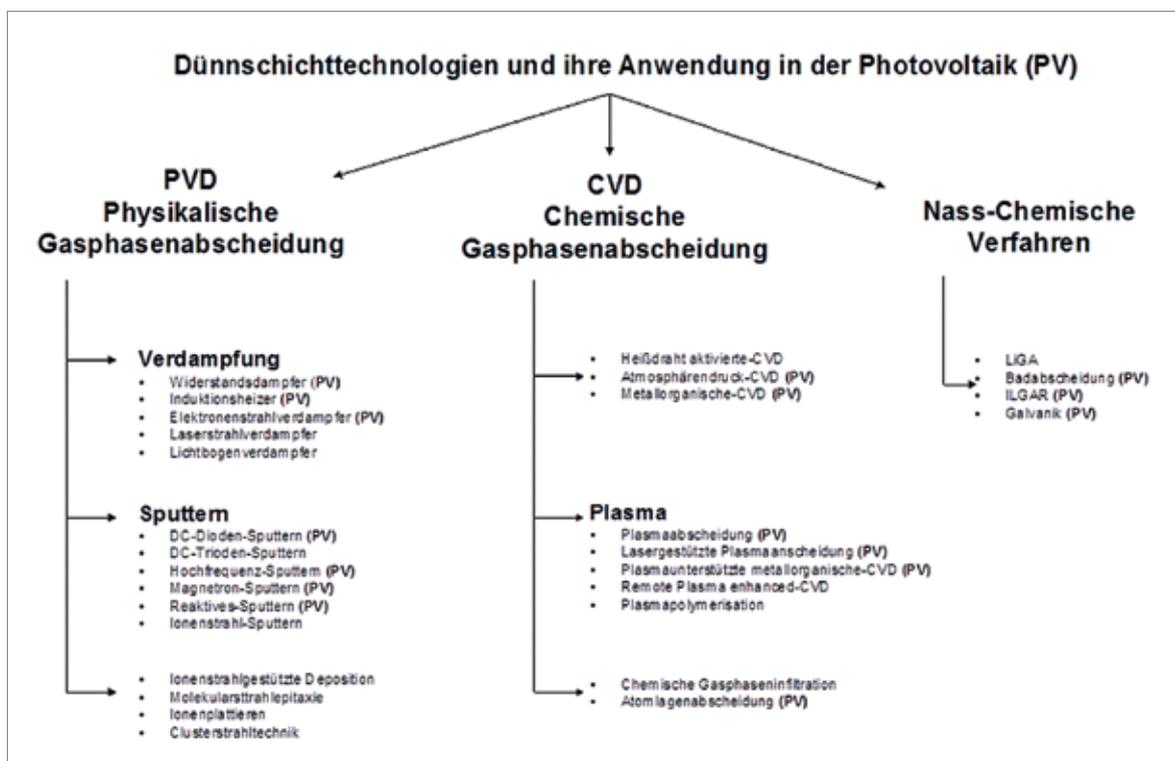


Abb. 4.48: Überblick über die verschiedenen Dünnschichttechnologien (eigene Darstellung basierend auf Chen 1996 und Kamalasanan 1996; PV – die bekanntesten in der Photovoltaik eingesetzten Dünnschichttechnologien)

ten verstanden, die ein physikalisches Verhalten (Festigkeit, optische Eigenschaften, elektrische Leitfähigkeit usw.) aufweisen, das vom massiven Körper aus demselben Material abweicht. Die Dünnschichttechnologie umfasst nicht nur das Auftragsverfahren selber, sondern auch die anschließende Bearbeitung bzw. Strukturierung der aufgetragenen Schichten.

Als Oberflächentechnik hat sich die Dünnschichttechnologie in vielen industriellen Bereichen zu einer zukunftsweisenden Schlüsseltechnologie entwickelt. Von daher ist die Dünnschichttechnik als Querschnittstechnologie aufzufassen. Abb. 4.48 gibt einen groben Überblick über die Differenzierung der verschiedenen Dünnschichttechnologien und ihre beispielhafte Anwendung in der Photovoltaik (PV).

In Abgrenzung zu den Massivzellen der kristallinen Silizium-Wafer-Technologie ist bei Dünnschicht-PV das photovoltaisch aktive Material auf einem Träger (Substrat) aufgebracht. Während das Substrat für die mechanische Stabilität sorgt, richtet sich die Dicke des photovoltaischen Materials danach, dass genügend Licht absorbiert wird. Der Aufbau einer Dünnschichtzelle besteht im einfachsten Falle aus: Substrat, Elektrode, Halbleiter I, Halbleiter II und Elektrode. Mindestens eine Elektrodenschicht muss dabei durchsichtig sein.

Bei Dünnschichtzellen gibt es eine Vielzahl von photovoltaisch aktiven Materialien. Zudem werden für die Ladungstrennung nicht nur p-n-Übergänge verwendet, sondern auch Heteroübergänge zwischen den verschiedenen Halbleitern. Als Heteroübergang (auch *Heterostruktur*, engl. Heterojunction) wird die Grenzschicht zweier unterschiedlicher nicht ideal leitender Materialien (Halbleitermaterialien) bezeichnet. Anders als bei einem p-n-Übergang ist hier nicht die Dotierungsart, sondern die Materialart verschieden. Die Halbleiter besitzen deshalb i. A. eine unterschiedliche Energie der Bandlücke. Heteroübergänge finden sich bei III-V-Halbleitern oder bei II-VI-Halbleitern. Folgende Varianten lassen sich unterscheiden:

- Amorphes Silizium (a-Si) mit p-n-Übergang oder mit Heteroübergang zu a-Si:C,
- Kristallines Si mit p-n-Übergang,
- CdTe mit Heteroübergang zu CdS,

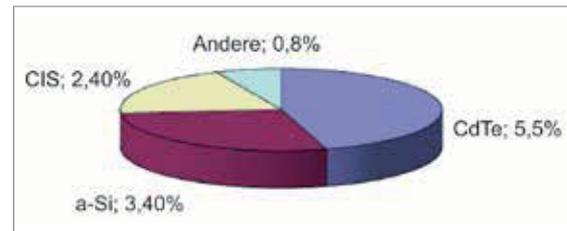


Abb. 4.49: Marktanteil der verschiedenen Dünnschicht-Zelltypen 2011 (HERING 2012)

- CuInSe_2 (In wird z. T. durch Ga und Se durch S ersetzt) mit Heteroübergang zu CdS (CIS) und
- GaAs mit p-n-Übergang oder mit Heteroübergang.

Daneben sind noch niedermolekulare organische Farbstoffe mit Übergang zu TiO_2 (Grätzel-Zelle, s. Kapitel 4.18) sowie leitfähige Polymere mit Übergang zu TiO_x prinzipiell PV-Zellen, welche den Dünnschicht-Zellen zuzurechnen sind, die aber hier nicht weiter behandelt werden.

Innerhalb der Photovoltaik wird der Dünnschichttechnologie ein besonderes Potenzial zugeschrieben. Zurzeit dominieren zwar Solarzellen aus Siliziumwafern mit fast 90 % der ausgelieferten Module den photovoltaischen Markt, allerdings besitzen Dünnschichtzellen technologische Vorteile. Zu den genuinen Vorteilen zählen insbesondere die geringen Material- und Energieintensitäten und die sich daraus ergebenden Kostenvorteile. Ein weiterer Vorteil ist die relativ beliebige Zellgröße. Während man bei Massivzellen bei der Größe auf die Wafergröße und damit auf ca. 20 cm beschränkt ist, hat man bei Dünnschichtsolarmodulen die Möglichkeit zur großflächigen Herstellung, die nur durch die Größe der Beschichtungseinrichtung limitiert ist. Vorteilhaft sind außerdem die vielfältigen Möglichkeiten im Bereich der Substratmaterialien bis hin zu Roll-to-Roll Verfahren sowie die Herstellung transparenter Zellen, die besonders für die Gebäudeintegration geeignet sind. Die Dünnschicht-Zelltypen CdTe, Cl(G)S und a-Si haben einen Marktanteil am gesamten PV-Markt von zusammen rund 11 % (HERING 2012, s. Abb. 4.49).

Im Folgenden werden die Technologien im Einzelnen beschrieben.

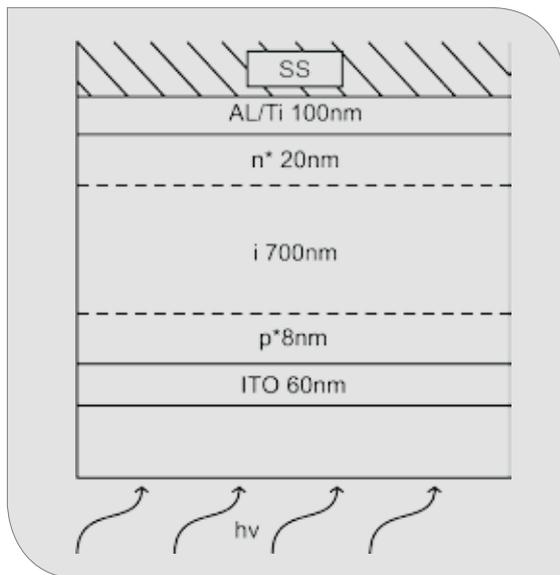


Abb. 4.50: Aufbau einer Solarzelle aus amorphem Silizium
(Quelle: eigene Darstellung angelehnt an FALK 2006)

4.19.1.1 Dünnschichtzellen aus amorphem Silizium (a-Si)

Der Aufbau einer klassischen Dünnschicht-PV-Zelle aus amorphem Silizium (a-Si) unterscheidet sich dahingehend von dem der kristallinen Solarzelle, dass die Siliziumschicht viel dünner ist und zwischen dem p- und dem n-leitenden Silizium eine intrinsische Siliziumschicht eingeschaltet ist, die als Absorber dient. Zellen aus amorphem Silizium können so dünn sein, weil der Absorptionskoeffizient für Licht viel größer als beim kristallinen Silizium ist. Als Substrat wird Glas verwendet, durch das auch die Beleuchtung erfolgt. Als TCO wird meist ITO eingesetzt und als Elektrode Aluminium. Abb. 4.50 zeigt den Aufbau einer a-Si Zelle.

Eine wesentliche Eigenart von a-Si-Zellen ist die Degradation unter Lichteinfluss („Staebler-Wronski-Effekt“). Demzufolge sinkt der Wirkungsgrad nach einigen Stunden bis Tagen Bestrahlung um absolut 2 bis 3 %. Der Wirkungsgrad von 1 cm² Laborzellen liegt unstabilisiert bei 12,7 % und stabilisiert bei 9,5 %. Kommerzielle Module erreichen stabilisiert ca. 6 % Wirkungsgrad.

Die ITO-Schicht wird meist durch Magnetronspütern auf das Glassubstrat aufgebracht.

Die Abscheidung des a-Si erfolgt durch PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition). Die Tendenz geht dahin, Tandem- oder Stapelzellen zu entwickeln, bei denen mehrere Zellen mit verschiedener Bandlücke hintereinander geschaltet werden.

Zellen aus amorphem Silizium werden insbesondere für kleinere Leistungen eingesetzt z. B. die Versorgung von Taschenrechnern. In diesem Leistungssegment beherrschen a-Si-Zellen den Markt völlig. Für höhere Leistungen werden sie dagegen kaum eingesetzt. Aufgrund des sehr geringen Energiebedarfs bei der Herstellung von a-Si-Zellen ist deren energetische Amortisationszeit trotz des geringen Wirkungsgrades mit ca. einem Jahr lediglich halb so groß wie bei kristallinen Zellen.

4.19.1.2 Dünnschichtzellen aus kristallinem Silizium

Mit der Entwicklung von Dünnschichtzellen aus kristallinen Zellen ist das Motiv verbunden, sie sowohl so kostengünstig herzustellen wie Zellen aus amorphem Silizium als auch die Wirkungsgrade der polykristallinen Massivzellen zu erreichen. Damit ließen sich die Vorteile der beiden konventionellen Zelltypen aus Silizium vereinigen und die jeweiligen Nachteile ausschließen.

Wesentliche Herausforderung dieser Technologie ist die Frage nach der richtigen Korngröße sowie der erforderlichen Schichtdicke. Dabei sind zwei Entwicklungsstrategien zu unterscheiden: Die eine versucht große Körner herzustellen, die andere die Rekombination an den Korngrenzen kleiner Körner durch Passivieren (meist durch Absättigen mit Wasserstoff) zu verringern.

Die richtige Bezeichnung von mikrokristallinen Dünnschichtzellen wäre eigentlich nanokristallin, da die Kristalle lediglich eine entsprechend geringe Größe aufweisen. Da die Zellen zum Teil aus einer Mischung bestehen, bei der Nanokristallite in eine amorphe Matrix eingebettet sind, werden diese Zellen gelegentlich auch mikromorph genannt. Für die Zellen wird Glas als Substrat eingesetzt. Sie haben meist einen Aufbau wie die Zellen aus amorphem Silizium. Als Elektrode wird auf der einen Seite TCO, auf der anderen eine Metallschicht, meist Aluminium, verwendet. Nanokristallines Silizium kann mittels PECVD abgeschieden werden.

Erfolgreich erprobt wurden auch die hot-wire-CVD sowie die Ionen-unterstützte Verdampfung (IAD). Die Schichtdicke ist mit einigen μm relativ gering, da der effektive Absorptionskoeffizient, insbesondere aufgrund des amorphen Materials zwischen den Körnern, in diesem Material hoch ist und die Streuung an den kleinen Körnern den Lichtweg verlängert. Zellen dieser Art wurden mit einem Wirkungsgrad von 8,5 % bis 10,1 % erzeugt.

4.19.1.3 Galliumarsenid-Zellen (GaAs)

Galliumarsenid ist ein ideales Material für Solarzellen. Seine Energielücke ist optimal für Sonnenlicht, und als direkter Halbleiter absorbiert GaAs das Licht schon in wenigen μm Schichtdicken vollständig. Allerdings ist die Kristallzucht insbesondere aufgrund der hohen Temperatur von 1.240 °C so teuer, dass sich dieser Zelltyp selbst für Weltraumanwendungen nicht durchgesetzt hat. Heutige GaAs-Zellen sind kristalline Dünnschichtzellen die im Labor auf 4 cm^2 Wirkungsgrade von 30 % und mehr erreichen. Polykristalline GaAs-Zellen sind deutlich schlechter, da sich die Korngrenzen von GaAs nicht so leicht passivieren lassen wie in Silizium und daher eine hohe Oberflächenrekombination auftritt.

Die günstigste Variante sind kristalline GaAs-Dünnschichten (Abb. 4.51) auf einkristallinem Germanium-Wafern, wo aufgrund der ähnlichen Gitterkonstanten Epitaxie möglich ist. Als Abscheideverfahren wird meist die MOCVD (metal organic chemical vapor deposition) eingesetzt. Die Dotierung erfolgt mit Zn(p) oder Te(n), die als Äthyl-Verbindungen gasförmig zugesetzt werden.

Neben den hier genannten Varianten gibt es noch zahlreiche weitere Kombinationen wie Galliumindiumphosphid (Ga, In), P/Galliumarsenid oder GaAs/Germanium.

4.19.1.4 Kadmiumtellurid-Zellen (CdTe)

Kadmiumtellurid ist ein direkter Halbleiter mit einer günstigen Bandlücke und einem hohen Absorptionskoeffizienten. Der Vorteil der CdTe-Zellen besteht in ihrer geringeren Temperaturempfindlichkeit sowie in ihrer hohen Empfindlichkeit gegenüber diffuser Solarstrahlung.

Bei den CdTe-Zellen wird ein Heteroübergang zu CdS genutzt. CdTe wirkt als Absorber. Da CdTe von sich aus ohne besondere Dotierung p-leitend ist, wird das von selbst n-leitende CdS als zweiter Halbleiter eingesetzt. Als Substrat kommt meist

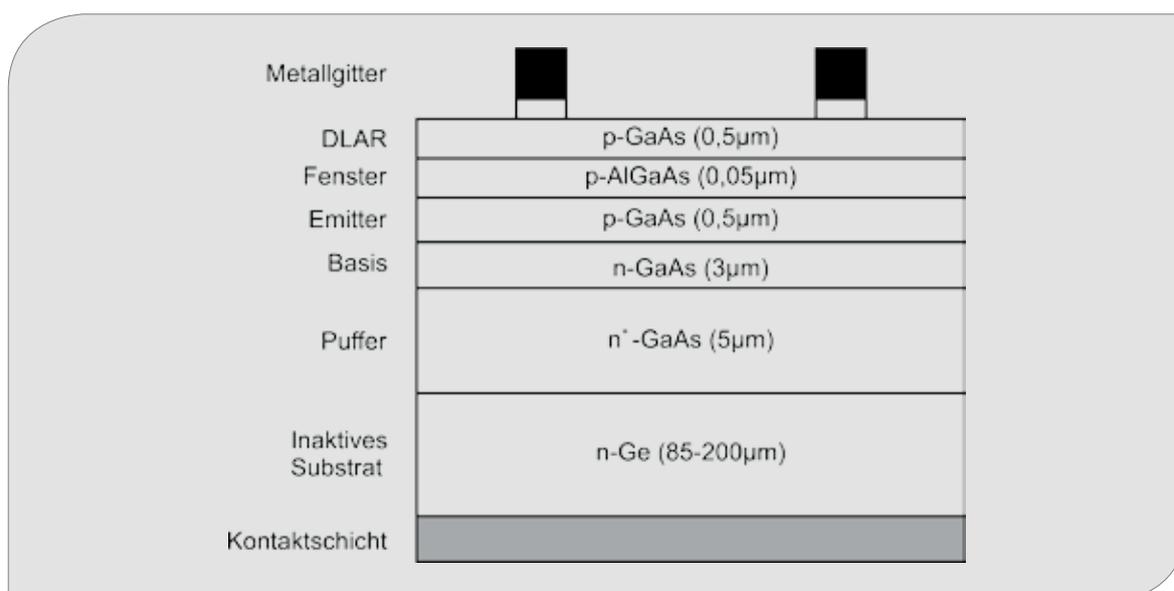


Abb. 4.51: Aufbau einer GaAs-Zelle (eigene Darstellung angelehnt an FALK 2006). DLAR sind Anti-Reflexionsschichten, die bei hocheffizienter multi-junction GaAs-Technologie zum Einsatz kommen, z. B. auf Basis von $\text{TiO}_2/\text{MgF}_2$ oder ZnS/MgF_2

gewöhnliches Kalknatronglas zum Einsatz, durch welches auch beleuchtet wird. Als TCO wird indiumdotiertes Zinnoxid ($\text{SnO}_2:\text{In}$) eingesetzt. Es wird durch Magnetronspütern aufgebracht. CdS und CdTe werden i. d. R. thermisch aufgedampft (CSS, close space sublimation). Alternativ sind auch MOCVD (metal organic CVD), Sputtern mit Ar-Ionen, galvanisch aus CdSO_4 - und Te_2O_3 -Lösungen, Aufsprühen wasserlöslicher Cd- und Te-haltiger Lösungen und Siebdruck mit einer Mischung von Cd und Te möglich. Auf einer Indiumdotierung der TCO muss an der CdS-Schicht verzichtet werden, da Indium die CdS-Schicht stört.

Für die Akzeptanz der CdTe-Zellen ist der Kadmiidgehalt ungünstig. Aufgrund der Toxizität von Kadmium ist dessen Substitution Gegenstand intensiver Forschung. Allerdings ist das Schwermetall Kadmium in einer CdTe-Zelle relativ immobil. Gleichwohl ist die Mobilisierung von Kadmium bei Extremsituationen wie einem Gebäudebrand möglich. Ferner liegen toxische Risiken bei der Modul-Herstellung und bei der Behandlung von Altmodulen vor.

Eine typische CdTe-Solarzelle besteht aus fünf Einzelschichten: einer ca. 2–3 μm dicken CdTe-Absorberschicht, einer ca. 100 nm dicken CdS-Zwischenschicht sowie zwei 20 bzw. 100 nm dicken Tellur- und Antimontellurid (Sb_2Te_3)-Schichten. Abb. 4.52 stellt den Aufbau einer CdTe-Zelle schematisch dar.

4.19.1.5 CIS PV

CIS (Kupfer-Indium-Diselenid bzw. Disulfid) oder auch CIGS (Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid bzw.

Disulfid) ist eine photovoltaische Dünnschichtzelle auf Basis von Chalcopyrit Verbindungen Halbleitern ($\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})(\text{Se}, \text{S})_2$). Der prinzipielle Aufbau einer klassischen CIS-Solarzelle wird in Abb. 4.52 gezeigt.

In der Regel erfolgt der Zellaufbau auf molybdänbeschichteten Glassubstraten. Die Molybdänbeschichtung übernimmt dabei die Funktion des Rückkontaktes. Molybdän wird entweder durch Sputtern oder durch Elektronenstrahlverdampfen auf das Glas aufgebracht. Auf der Molybdänbeschichtung wird eine 1,6–1,7 μm dicke Absorberschicht aus p-leitendem $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ oder CuInS_2 erzeugt (UMSCHLAG 2012, SITTINGER 2012).

An der Oberfläche des Absorbers befindet sich eine nur einige 10 nm dicke, schwach n-leitende Schicht aus CdS oder ZnS (Pufferschicht). CdS wird bei diesen Zellen meist nicht wie bei den CdTe-Zellen durch Aufdampfen, sondern durch „chemical bath deposition“ (CBD) aufgebracht. Die Grenzfläche zwischen der p-leitenden $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ - oder CuInS_2 -Schicht und der schwach n-leitenden Schicht aus CdS oder ZnS stellt den Heteroübergang dar. CdS ist durchsichtig und dient als Fenster. Darauf befindet sich die transparente zweite Elektrode als Frontkontakt. Die Funktion des Frontkontaktes wird durch transparentes, n-leitendes ZnO übernommen. Sowohl der Frontkontakt aus ZnO als auch der Rückkontakt aus Molybdän werden mit Kathodenerstäubungsverfahren (Sputtern) abgeschieden.

Für die Herstellung der photoaktiven Halbleiterschicht existieren verschiedene Prozessvarianten: Durchlaufverfahren („In-Line“) mittels Koverdampfung, Kathodenerstäubung und anschließende

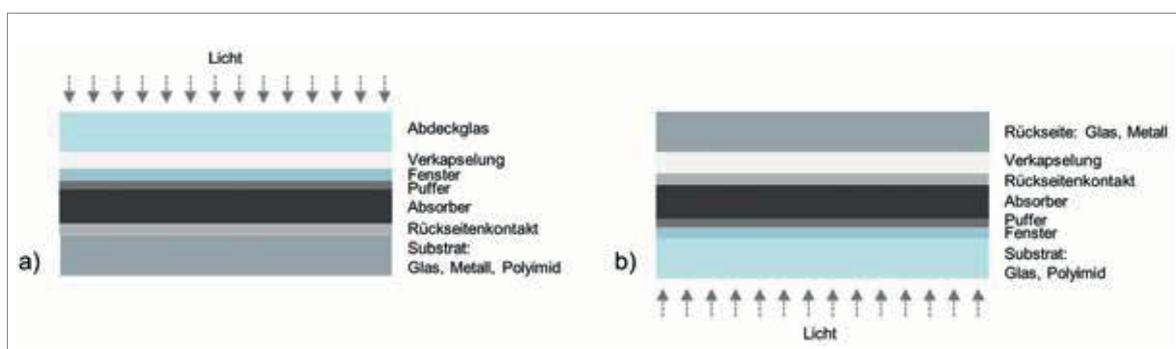


Abb. 4.52: a) Substrat- und b) Superstrat-Aufbau von Chalcogenid-Solarzellen (CdTe, CIGS), (Quelle: Marwede 2013)

Verdampfung oder Abscheidung per Badverfahren. Durch eine galvanische Abscheidung, die für eine Metallbandbeschichtung geeignet ist, sollen die teureren und entwicklungsaufwändigen Vakuumprozesse ersetzt werden.

Im Labormaßstab sind für CIS-Zellen Wirkungsgrade von ca. 15 % durchaus üblich. Kommerziell gefertigte Module erreichen Werte von 11 % bis 13 %.

4.19.1.6 Sonstige Dünnschichtzellen

Neben den hier aufgeführten Zellen gibt es noch weitere Zelltypen, die ebenfalls zur Dünnschichtfamilie zählen. Zu erwähnen sind hierbei insbesondere die organischen Solarzellen. Motivation bei der Entwicklung dieses Zelltyps ist die Nutzung deutlich kostengünstigerer Materialien und Fertigungsverfahren. Allerdings sind die Wirkungsgrade bisher sehr gering und die Lebensdauer ist mit zurzeit ca. 5.000 Stunden zudem recht kurz. Es gibt noch keine kommerziell erhältlichen Zellen oder Module mit dieser Technologie. Ein Beispiel für diesen Zelltyp ist die Farbstoffzelle. Dieser, auch „Grätzel-Zelle“ genannte Zell-Typ, nutzt, ähnlich wie in der Photosynthese, organische Farbstoffe zur Umwandlung von Licht in elektrische Energie. Die Zellen sind meistens lila und liefern den besten Wirkungsgrad aller organischen Solarzellen von über 10 %, haben jedoch aufgrund aggressiver Elektrolyte ebenfalls eine begrenzte Lebensdauer.

4.19.2 Rohstoffinhalt

Im Weiteren werden nur die Technologien CI(G)S und CdTe betrachtet, weil sie seit mehreren Jahren kommerziell verfügbar und auf wichtige Rohstoffe angewiesen sind. Die grobe Zusammensetzung von CdTe- bzw. CIGS-Dünnschichtmodulen ist Abb. 4.53 zu entnehmen.

Die Abbildung veranschaulicht die Dominanz von Glas und Rahmenkonstruktion. Der Gehalt an Halbleiterverbindungen, die unter „Dünnschichtelemente“ subsumiert wurden, ist dagegen relativ gering.

Zu beachten ist dabei, dass vor dem Laminieren Materialentfernungen durch Ätzen, Laser- und

mechanische Strukturierung an Rückelektrode (Mo), Absorberschicht (CIGS) und Frontelektrode (ZnO) erfolgen. Diese Materialentfernung dient der Herstellung der internen monolithischen Zellverschaltung. Das entfernte Material wird überwiegend durch die Bäder bzw. die Absaugung ausgeschleust und entsorgt. Ein Recycling findet meist nicht statt. Ferner werden noch pro m² ca. 1,4 g Indiumlot sowie 9 g Kupferdraht eingesetzt. Des Weiteren sind die Materialausbeuten bei den verschiedenen Beschichtungsprozessen zu berücksichtigen. Insbesondere bei den Sputterprozessen gelangen zum Teil lediglich 23 % des eingesetzten Targetmaterials auf das Substrat. Denn ca. 50 % des eingesetzten Targetmaterials bleiben als Reststoff übrig und werden üblicherweise einem Recycling zugeführt und ca. 27 % des eingesetzten Targetmaterials schlagen sich auf den Kammerwänden bzw. Blenden nieder (NAUJOKS 2000). Schließlich ist noch zu beachten, dass bei einigen PV-Zellen die Frontelektrode statt aus ZnO als ITO-Schicht ausgeführt wird, was in diesen Fällen eine weitere indiumverbrauchende Komponente darstellt.

MARWEDE & RELLER (2014) entwickelten Szenarien für Materialeffizienz entlang des Lebenszyklus‘ beider Dünnschichttechnologien. Sie betrachteten auch Materialverluste während der Beschichtung bzw. durch Ausschussware und das Recycling dieser Verluste. Die Materialnutzung der Produktion

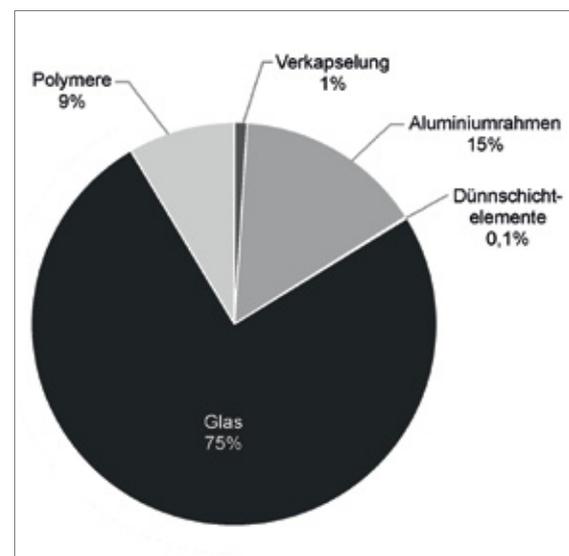


Abb. 4.53: Zusammensetzung eines Dünnschicht PV-Moduls (Quelle: SANDER et al. 2007)

wird dabei definiert als produktspezifischer Rohstoffbedarf durch den Rohstoffeinsatz für die Produktion minus des recycelten Materials aus Produktionsabfällen. Da heißt, das recycelte Material aus Produktionsabfällen wird gutgeschrieben. Aus den berechneten Materialnutzungseffizienzen lassen sich Faktoren ableiten, um wieviel mehr der Rohstoffbedarf für die Produktion den eigentlichen Materialinhalt der Module übersteigt.

Der produktspezifische Rohstoffinhalt pro Wp ist abhängig von der Schichtdicke, der stöchiometrischen Zusammensetzung und des Wirkungsgrades der Solarzelle. Im Jahr 2009 lag die Schichtdicke des wichtigsten CdTe-PV Produzenten „First Solar“ zwischen 2,1 und 2,2 μm (NGI 2010, GREEN 2012). Für beide Technologien können derzeit (im Labor) Zellen mit 1 μm Absorberschichtdicke produziert werden (NOWSHAD et al. 2007, JONES et al. 2009). Langfristig ist es möglich, über optische „Lichtfallen“ die Schichtdicke auf unter 1 μm zu reduzieren.

Der Wirkungsgrad bestimmt, wie viel Quadratmeter Fläche pro Watt Nennleistung benötigt wird. First Solar hat im Jahr 2011 einen durchschnittlichen Wirkungsgrad von 11,9 % erreicht (FIRST SOLAR 2011). MARWEDE & RELLER (2014) mittelten den Wirkungsgrad von 9 CIGS Produzenten zu 11,8 %. Basierend auf dem physikalisch Möglichen wird im optimalen Szenario angenommen, dass

die Wirkungsgrade beider Technologien auf 20 % bis zum Jahr 2040 steigen können (GREEN 2012, RAUGEI 2012, WOODHOUSE et al. 2015).

Aus den oben genannten Daten lassen sich Parameter zur Berechnung des produktionspezifischen Rohstoffbedarfs im Jahr 2012 ableiten und zwei unterschiedliche Technologieszenarien für das Jahr 2035 entwickeln (siehe Tab. 4.45).

Die Daten in Tab. 4.45 ergeben sich aus der beispielhaften Betrachtung gängiger Beschichtungsprozesse für CdTe- und CIGS-Module. Hier bleiben jedoch Indiumlote und Schichtstrukturierungen unberücksichtigt, während Materialverluste während der Beschichtung und durch Ausschussware mitbetrachtet werden. Die Menge an recyceltem Material aus Produktionsabfällen (Ausschussware und Beschichtungsmaterialien) wird jedoch gutgeschrieben.

Insgesamt unterliegen die zellspezifischen Gehalte an Halbleitermaterialien erheblichen Unsicherheiten. Schichtdicken und Beschichtungsverfahren haben einen wesentlichen Einfluss auf den tatsächlichen Verbrauch von Halbleitermaterial und variieren von Hersteller zu Hersteller. Ferner unterscheiden sie sich erheblich zwischen Labormaßstab und Pilotanlagen und ändern sich auch während der anschließenden Prozessausweitung hin zur Massenfertigung.

Tab. 4.45: Produktionsspezifischer Rohstoffbedarf abhängig von Absorberschichtdicke, Wirkungsgrad und Materialeffizienz (eigene Berechnung)

| | 2013 | | 2035 | | | |
|--------------------------------------|--|--------------------------|----------------------------------|----------------|-------------------------------------|-----------------|
| | | | Durchbruch | | Langsame Entwicklung | |
| | CIGS | CdTe | CIGS | CdTe | CIGS | CdTe |
| Absorberschichtdicke | 1,6 μm | 2,0 μm | 0,5 μm | | 1 μm | |
| Wirkungsgrad | 12 % | 12 % | 20 % | | 15 % | |
| Materialineffizienz | Cu, Ga: 1,4–5,9 In: 1,2–3,5 Se: 1,6–4 | 1,3–2,3 | 1,03 | 1,03 | Cu: 1,4 In, Ga: 1,2 Se: 1,6 | 1,3 |
| Rohstoffbedarf [g/kWp] ^{a)} | Cu: 21–89 In: 23–67 Ga: 7–30 Se: 60–150 | Cd: 60–105 Te: 67–119 | Cu: 3 In: 4 Ga: 1 Se: 7 | Cd: 7 Te: 8 | Cu: 10 In: 11 Ga: 3 Se: 30 | Cd:23 Te: 27 |

^{a)} Stöchiometrie $\text{Cu}(\text{In}_{0,7}\text{Ga}_{0,3})\text{Se}_2$

4.19.3 Foresight industrielle Nutzung

Wirksame und wesentliche Nachfrageeffekte der Dünnschicht Photovoltaik nach hochreinen Halbleitermaterialien hängen entscheidend vom Marktwachstum der Dünnschicht Photovoltaik ab. Die zukünftige Marktentwicklung der Dünnschicht Photovoltaik hängt wiederum entscheidend von der Gesamtentwicklung bei der Energienachfrage (u. a. Preisen für fossile Energieträger), der erneuerbaren Energieträger im besonderen (u. a. Technologieförderung und Vergütungsbedingungen) und der Photovoltaik ganz konkret (u. a. Stand der Dünnschichttechnologie) ab.

In der Vergangenheit ist das Dünnschichtsegment überdurchschnittlich gewachsen. Im Jahr 2011 betrug die weltweite Solarzellenproduktion 37,2 GW_p (HERING 2012). Der Marktanteil von CdTe betrug 5,5 %, von CIGS 2,4 % (HERING 2012). Um den zukünftigen Rohstoffbedarf abzuschätzen wurden zwei Marktszenarien entwickelt. Im „Durchbruch“-Szenario erreichen beide Technologien im Jahr 2040 je einen Marktanteil von 15 % der jährlich installierten Kapazität von 162 GW_p laut EPIAs „accelerated scenario“ (EPIA 2010). Falls sich der Dünnschichtmarkt langsam entwickelt, erreicht jede Technologie einen Marktanteil von 5 % des Gesamtmarktes im Jahr 2040 (Szenario „Langsame Entwicklung“). Um ausgehend von der installierten Leistung im Jahr 2012 auf die entsprechend installierte Leistung je Technologie im 2035 zu kommen, wurde die Entwicklung beider Technologien bis 2040 s-kurvenförmig modelliert.

Tab. 4.46 fasst die weltweit jährlich installierte Leistung von PV und den jährlichen Zubau für die vertieft untersuchten Dünnschicht-PV Zelltypen CIGS und CdTe zusammen. Für den Ausbau der GaAs-Zellen, die hauptsächlich für Weltraumanwendungen genutzt werden, konnten keine sinnvollen Projektionen vorgenommen werden.

4.19.4 Foresight Rohstoffbedarf

Durch Multiplikation des produktionsspezifischen Rohstoffbedarfs (Tab. 4.45) mit der jährlich installierten Menge (Tab. 4.46) erhält man den zukünftigen Rohstoffbedarf (Tab. 4.47).

Für das Jahr 2013 ergibt sich eine relativ breite Spannbreite für den Rohstoffverbrauch aus den Materialineffizienzfaktoren (Tab. 4.45). Aufgrund unterschiedlicher Produktionstechnologien und -effizienzen sowie fehlender Informationen lässt sich kein „Marktdurchschnitt“ bestimmen. Für alle Rohstoffe (außer für Selen in der „Langsamen Entwicklung“) liegt der prognostizierte Rohstoffbedarf für 2035 sogar innerhalb der abgeschätzten Spannbreite für 2013. Das Durchbruchsszenario wird als realistischer als die „Langsame Entwicklung“ eingeschätzt.

Auffällig ist, dass alle Rohstoffbedarfe im Szenario „Durchbruch“ niedriger als im Szenario „Langsame Entwicklung“ sind. Der dreifach so hohe Marktanteil wird durch den geringeren prozessspezifischen Bedarf überkompensiert.

Die prognostizierte produktionsspezifische Nachfrage nach Indium im Jahr 2035 liegt trotz Marktwachstum unter der maximalen Nachfrage im Jahr 2013, bedingt durch Materialeffizienzmaßnahmen auf Produkt- und Prozessebene. Nach den Szenarien beträgt der Indiumbedarf im Jahr 2035 11 % der Indiumproduktion im Jahr 2013.

Die Galliumnachfrage der CIGS-Photovoltaik liegt im Jahr 2035 unter 9 % der Jahresproduktion im Jahr 2013. Tendenziell ist sie sogar überschätzt, da auch nicht-galliumhaltige CIS-Solarzellen produziert werden.

Sowohl die Gallium- als auch die Indiumnachfrage in 2035 fällt deutlich niedriger aus als in der Projektion in ANGERER et. al. (2009) für das Jahr 2030,

Tab. 4.46: Jährliche Installation von CdTe- und CIGS-Solarmodulen in Megawatt Peak in den Szenarien „Durchbruch“ und „Langsame Entwicklung“ (Quelle: eigene Berechnung)

| Jährliche Installation | 2013 | 2035 | |
|------------------------|-----------|------------|----------------------|
| | | Durchbruch | Langsame Entwicklung |
| CdTe | 2.987 MWp | 24.086 MWp | 8.116 MWp |
| CIGS | 1.536 MWp | 24.049 MWp | 8.032 MWp |

Tab. 4.47: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf für Dünnschicht-PV in t

| Rohstoff | Produktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 Durchbruch | Bedarfsvorschau 2035 Langsame Entwicklung |
|----------|--|-------------|------------------------------------|--|
| Kupfer | 18.365.341 (B) 21.446.333 (R) | 32–136 | 74 | 82 |
| Indium | 790 (R) | 35–103 | 87 | 90 |
| Gallium | 350 (P) ¹ 200 (R) ¹ | 11–45 | 25 | 26 |
| Selen | 2.709 (R) | 92–230 | 173 | 240 |
| Kadmium | 22.187 (R) | 178–315 | 174 | 190 |
| Tellur | 500–550 ² | 201–355 | 198 | 218 |

B: Bergwerksförderung

R: Raffinadeproduktion

P: Primärproduktion

¹ Quelle: USGS 2014b, 2015a

² Quelle: Marwede 2013

obwohl die jährliche Installationsmenge in dieser Vorschau höher ausfällt. Die potentiell höhere Rohstoffnachfrage wird jedoch deutlich kompensiert durch zukünftige Materialeffizienzgewinne, die in ANGERER et. al. (2009) nicht berücksichtigt wurden.

Auch die zukünftige Selenachfrage ist tendenziell überschätzt, da Selen zumindest in Teilen durch Schwefel substituiert werden kann. Die zukünftige Rohstoffnachfrage liegt zwischen 6 % und 9 % der Produktion im Jahr 2013.

Die Tellurnachfrage liegt im Jahr 2013 zwischen 36 % und 70 % der Jahresproduktion. Für das Jahr 2035 ist keine Nachfragesteigerung abzusehen. Dann werden 36 %–44 % der Jahresproduktion von 2013 benötigt. FTHENAKIS 2009 erwartet, dass allein durch das Wachstum der Kupferproduktion, bei der Tellur als Beiprodukt gewonnen wird, das Tellurangebot in Zukunft deutlich erweitert und somit der zukünftige Rohstoffbedarf der Photovoltaik gedeckt werden kann (FTHENAKIS 2009).

Verglichen mit der Produktionsmenge an Kadmium ist die Nachfrage aus der Dünnschichtphotovoltaik gering (um 1 %). Hier spielt eher die Frage der Toxizität der Halbleiterverbindung CdTe eine Rolle, die bisher noch nicht ausreichend untersucht worden ist. Bisher fällt CdTe-PV (noch) nicht unter das Verbot der europäischen RoHS Richtlinie (RoHS-Directive 2011). Falls in Zukunft das Inverkehrbringen von CdTe-PV Modulen in Europa ver-

boten wird, wird das eine direkte Auswirkung auf die Rohstoffnachfrage haben. Dies wird vor allem für Tellur ausschlaggebend sein, da für Tellur die CdTe-PV-Industrie einer der Hauptnachfrager ist.

Eine absolute (geologische) Knappheit von Tellur oder Indium ist unwahrscheinlich, aber hohe Rohstoffpreise, bedingt durch ein Nachfrage-Angebotsungleichgewicht, könnte für die Hersteller ein Problem werden. Beide Materialien sind Beiprodukte von Basismetallen, also abhängig vom Abbau und der Raffination dieser Metalle.

Die zukünftige Entwicklung von CIGS-Dünnschichtphotovoltaik ist auch abhängig davon, was Hersteller anderer Technologien wie LEDs, Displays oder ICs für die Materialien Indium und Gallium zahlen können. So kann zum Beispiel ein LCD-TV Hersteller deutlich besser Preissteigerungen verkraften, weil der Wertanteil des Indiums gemessen am Verkaufspreis deutlich niedriger als bei CIGS-Solarmodulen ist (MARWEDE 2013). Zudem können LCD-Hersteller auf mögliche Substitute zurückgreifen, wenn die Indiumpreise zu hoch werden, was CIGS-Herstellern nur bedingt möglich ist: durch die Substitution von In mit Ga ändert man die Bandlücke und außerdem ist Gallium ähnlich teuer und kritisch wie Indium.

CdTe-PV-Hersteller sind stark abhängig von der Tellurverfügbarkeit. Allerdings sinkt die Nachfrage anderer Technologien nach Tellur. Das kann dazu führen, dass der Tellurpreis sinkt, was den Aus-

bau der Produktionskapazitäten weniger attraktiv machen könnte (CANDELISE et al. 2011). Der wichtigste CdTe-PV-Produzent schaut voraus, indem er selbst in den Abbau investiert (PV MAGAZINE 2013).

4.19.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Derzeit sind die Rückläufe von Altmodulen gering, da beide Technologien erst in den 1990ern in den Markt eingeführt worden und die Module lange in Nutzung sind (über 20 Jahre). So sind nach Szenarien von MARWEDE & RELLER (2012) signifikante Rücklaufmengen von Tellur in Altmodulen erst nach 2030 zu erwarten. Aufgrund der potenziellen Toxizität von Cd kümmert sich allerdings der größte Hersteller von CdTe-PV Modulen FirstSolar jetzt schon um die Rücknahme und das Recycling der Module, bei dem auch das Kadmiumtellurid zurückgewonnen wird.

Bei CIGS-Solarmodulen ist für eine wirtschaftliche Rückgewinnung die Gallium- und Indiumkonzentration in den Modulen zu gering. Recycler prüfen die Möglichkeit, das Recycling von LCDs (Indium) mit dem Recycling von CIGS Solarzellen zu kombinieren, was den Prozess kurzfristig tragfähig machen könnte (EUROPEAN COMMISSION 2014a). Zudem sollte angestrebt werden, auch das Substratglas hochwertig zu recyceln, um einen mengenmäßig wichtigen Rohstoff wieder in den Markt zu bringen.

Als Alternative zu CIGS und CdTe werden Solarzellen mit günstigeren und verfügbareren Halbleiterverbindungen wie CuZnSnS, CuN oder FeS₂ entwickelt. Außerdem stehen noch andere Technologien zur Auswahl, wie organische oder Farbstoffsolarzellen. Organische Materialien werden mit großer Wahrscheinlichkeit ein Teil der klassischen anorganischen Materialien in unterschiedlichen Anwendungen (z. B. OLEDs) substituieren, wenn auch die Lebensdauer und die Effizienz dieser Materialien noch erhöht werden muss (PHOTONICS21 2009).

4.20 Solarthermisches Kraftwerk

4.20.1 Technologiebeschreibung

Ein solarthermisches Kraftwerk (Concentrating Solar Power – CSP) besteht aus einer optischen Einrichtung (Konzentrator), einer Receiverinheit sowie aus einer Wärmekraftmaschine, die die thermische Energie über mechanische in elektrische Energie umwandelt.

Nur der parallel einfallende direkte Anteil der Sonnenstrahlung kann von CSPs genutzt werden, diffuse Solarstrahlung ist nicht geeignet (QUASCHNING 2011). Verluste an der Optik (Sauberkeit des Spiegelsystems, Reflektions- und Absorptions- sowie Transmissionseigenschaften der Optik), dem Receiver (Reflektion und Absorption, Verluste aufgrund von Konvektion, Wärmeleitung langwelliger Strahlung) sowie innerhalb der Wärmekraftmaschine reduzieren den Wirkungsgrad eines solarthermischen Kraftwerks. Ebenso sind der Einfallswinkel sowie die Nachführung des Spiegelsystems sehr entscheidend für die Effizienz.

Neben der Turbine ist ein Hauptelement eines solarthermischen Kraftwerks die solare Konzentrations- und Receiverinheit. Die Sonnenstrahlung wird über ein Spiegelsystem gebündelt und in der Receiverinheit auf ein Wärmemedium übertragen. Für die Konversion wird eine Turbine benötigt. Hierbei kommen sowohl Dampfturbinen, als auch kombinierte Gas- und Dampfturbinen zum Einsatz, die aus der konventionellen Kraftwerkstechnologie stammen (RAGWITZ 2007). Diese Komponenten werden nun vermehrt auf die Anforderungen von CSPs angepasst (IEA 2014). Die wesentlichen technologischen Innovationen konzentrierten sich bei solarthermischen Kraftwerken bisher auf den solaren Anteil der Anlage. Sowohl das Kostensenkungspotenzial, als auch die Option zur Effizienzsteigerung sind in diesem Bereich signifikant. Wirkungsgradsteigerungen sind zum einen durch effizientere Systemkomponenten und durch Speicher möglich, mit denen die tägliche Betriebsdauer des Kraftwerks erheblich verlängert werden kann. Zum anderen stellt das Erreichen höherer Arbeitstemperaturen erhebliches Optimierungspotenzial dar.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Hauptkonzepte Parabolrinne, Fresnel-Kollektor, Solar-

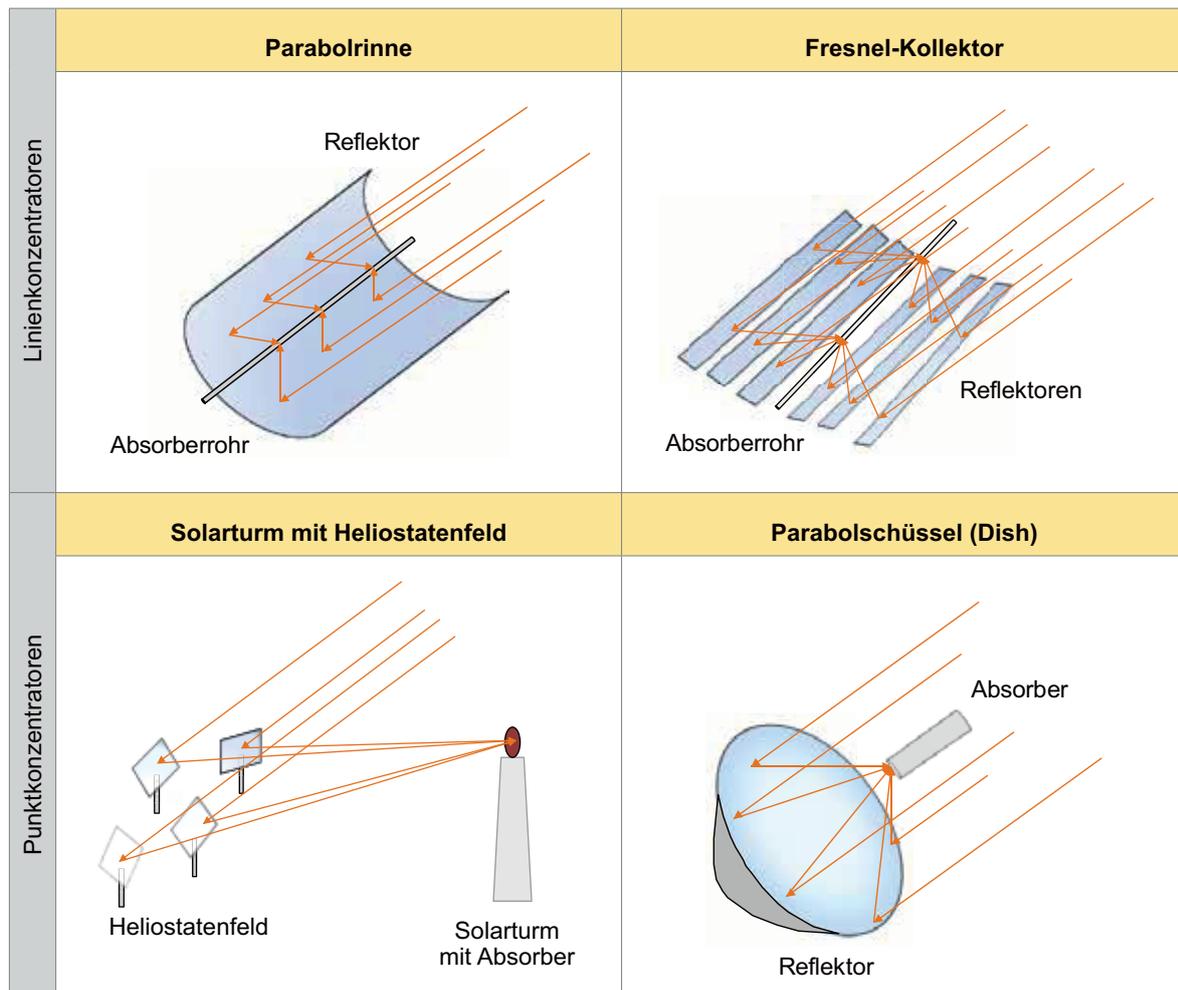


Abb. 4.54: Konzentratorsysteme zur solarthermischen Stromerzeugung
(Quelle: eigene Darstellung)

turm- und ParabolSchüsselsystem vorgestellt, die je nach Reflektoreigenschaft in Linienkollektoren oder Punktkollektoren untergliedert werden. In Abb. 4.54 finden sich zudem zu jedem Konzept Prinzipskizzen sowie in Tab. 4.48 zusammenfassend charakteristische Kennzahlen.

Linienkonzentratoren

Die **Parabolrinne** ist derzeit die am weitesten verbreitete Technologie zur solarthermischen Stromerzeugung. Das Sonnenlicht wird durch parabolartig geformte Spiegel auf eine Receiveröhre fokussiert. Der Receiver ist generell ein schwarz beschichtetes Metallrohr, das wiederum von einer Glasröhre ummantelt ist, um Konvektionsverluste zu reduzieren. In der Röhre befindet sich ein synthetisches Öl, das als Wärmeträgermedium erhitzt wird (VOGEL & KALB 2010). Die Bestrebungen gehen

jedoch dahin, Öl als thermisches Transportmedium zu ersetzen, um die Dampferzeugung direkt in der Receiveröhre zu realisieren. Auf diesem Weg kann eine Kostenreduktion erreicht werden, die aufgrund des Phasenwechsels im Transportmedium technisch derzeit immer noch schwer zu realisieren ist (EUROPEAN COMMISSION 2013). Desweiteren wird versucht, ionische Flüssigkeiten (IL) als Transportmedium einzusetzen, da sie wärmebeständiger sind als Öl (BARLEV et al. 2011). Nach wie vor wird weiterhin angestrebt, die Arbeitstemperatur und damit die thermodynamische Effizienz der Parabolrinne zu erhöhen.

Der prinzipielle Aufbau von **Fresnel-Kollektoren** ist dem von Parabolrinnenkraftwerken sehr ähnlich. Hier wird die Form eines Parabolspiegels durch einzelne Spiegelsegmente angenähert. Dadurch entstehen Wirkungsgradverluste, denen jedoch Kosteneinsparung durch einfache Produktions-

Tab. 4.48: Kennzahlen der verschiedenen CSP-Systeme
(Quelle: IRENA 2012a, BARLEV et al. 2011)

| | System | Jährlicher Solar-Elektrizität Wirkungsgrad | Typische Kapazität [MW] | Spezifische Stromgestehungskosten [€ ₂₀₁₀ /kWh] | Betriebstemperaturbereich [°C] |
|----------------------|-------------------------------|--|-------------------------|--|--------------------------------|
| Linienkonzentratoren | Parabolrinne | 11–16 % | 10–300 | 0,11–0,27 | 50–400 |
| | Fresnel | 13 % | 10–200 | – | 50–300 |
| Punktkonzentratoren | Solarturm mit Heliostatenfeld | 7–20 % | 10–200 | 0,13–0,22 | 300–2000 |
| | Dish | 12–25 % | 0,01–0,025 | – | 150–1500 |

verfahren entgegenstehen (VOGEL & KALB 2010). Zudem hat dieses System den Vorteil, dass der Receiver eine separate Einheit bildet und bei der Nachführung nicht zusätzlich berücksichtigt werden muss. Dadurch wird die Nachführung einfacher, akkurater und effizienter (BARLEV et al. 2011). Um den Wirkungsgrad von Fresnel-Kollektoren zu erhöhen, wird derzeit auch an neuen Receiversystemen, wie beispielsweise dem invertierten Hohlraumreceiver, oder neuen Reflektorfeldgeometrien geforscht, um die erhöhte Verschattung zu verbessern (BARLEV et al. 2011).

Punktkonzentratoren

Höhere Arbeitstemperaturen werden durch die zweiachsige Konzentration der Sonnenstrahlen auf einen Punkt hin ermöglicht. Dies impliziert hohe Anforderungen an die Genauigkeit des Nachführungssystems der Reflektoren, um permanent die direkt einfallende Sonnenstrahlung auf den Receiver zu fokussieren.

Bei **Solarturm-Systemen** sitzt der Receiver an der Spitze eines zentralen Turmes, der von Hunderten von Spiegeln (Heliostaten) umgeben ist. Das Licht wird von den Heliostaten reflektiert und auf einen zentralen Receiver fokussiert, in dem

Temperaturen von bis über 1.500 °C erreicht werden. Dabei folgen die zwischen 50–150 m² großen Heliostate der Sonnenbewegung. Als thermisches Transportmedium werden geschmolzene Salze, Luft und auch Wasser eingesetzt, um die Wärme über einen Gas- oder Dampfturbinenprozesse in Elektrizität umzuwandeln (VOGEL & KALB 2010). Da Solarturmkraftwerke bei hohen Temperaturen arbeiten, resultieren die größten Verluste durch Konvektion an der Receiveroberfläche. Daher werden Receiver mit einer großen inneren Oberflächenstruktur bevorzugt. Die hohen Investitionskosten für das Heliostatfeld stellen weiterhin ein Problem für Solarturm-Systeme dar, weshalb hier weiterer Forschungsbedarf für kostengünstigere und leichtere Materialien, wie beispielsweise PVC-Verbundstahl, gesehen wird (BARLEV et al. 2011).

Parabolschüsselsysteme (Dish) sind im Vergleich zu den übrigen Kollektorsystemen relativ kleine Einheiten. Die rotationssymmetrischen Paraboloiden konzentrieren das Sonnenlicht auf den Brennpunkt, in dem ein Receiver die Wärmeenergie an einen Stirling-Motor überträgt. Aufgrund der hohen Sonnenkonzentration werden hohe Temperaturen erreicht, sodass auch Gasturbinen in einem Brayton oder kombinierten Rankine/Brayton Prozess eingesetzt werden können (BARLEV et

al. 2011). Der Durchmesser beträgt typischerweise zwischen 5–15 m bei einer Leistung von 1–25 kW. Aufgrund ihrer Größe eignen sich Parabol-Schüsselsysteme besonders für die dezentrale Energieversorgung (VOGEL & KALB 2010). Sie zeichnen sich insbesondere durch ihren hohen energetischen Wirkungsgrad aus. Allerdings überwiegen derzeit die hohen spezifischen Stromgestehungskosten, insbesondere wegen der hohen Anforderungen an die konkave Spiegelform, sodass sich Parabol-Schüsselsysteme bisher noch nicht auf dem Markt durchsetzen konnten. Daher wird versucht die Parabol-Schüssel durch einzelne kleine Spiegelsegmente anzunähern und so die Kosten zu senken (BARLEV et al. 2011). Dennoch sind Parabol-Schüsselsysteme nur schwer mit Speichersystemen kombinierbar, sodass die Betriebsdauer als signifikantes Problem bestehen bleiben wird.

4.20.2 Rohstoffinhalt

Ende 2013 war entsprechend IEA (2014) eine kumulierte Kapazität von rund 3.600 MW im Einsatz. Parabolrinnen besaßen mit 90 % den mit Abstand größten Anteil daran. Fresnel und Turmkraftwerke hatten nur eine untergeordnete Rolle. Auch im Zuge der Neuinstallationen wird sich das Bild nicht ändern. Nach LENZEN (2014) befinden sich derzeit Anlagen mit einer kumu-

lierten Gesamtkapazität von 1.600 MW im Bau. Parabolrinnen besitzen daran einen Anteil von 67 %, Solarturm-Systeme einen Anteil von 29 % und Fresnel-Kollektoren nur einen Anteil von 4 %. Damit sind bisher ausschließlich Parabolrinnen- und Solarturm-Kraftwerke ausgereift genug, um sinnvolle Abschätzungen über die Rohstoffinhalte zu geben. Die Datenlage für die übrigen Systeme sieht deutlich schlechter aus, sodass keine fundierte Aussage für diese getroffen werden kann. Daher sollen im Folgenden ausschließlich die Rohstoffbedarfe von Parabolrinnen- und Solarturm-Systemen detaillierter beschrieben werden.

Wie Abb. 4.55 zeigt, werden für Solarturmkraftwerke insgesamt beinahe doppelt so viele Rohstoffe benötigt, wie für Parabolrinnen. Auch unterscheiden sie sich ein wenig bezüglich der Anteile der Systemkomponenten. So ist das Parabolrinnenkraftwerk bezüglich der gesamten Rohstoffe deutlich stärker durch das Solarfeld geprägt (59 %) als das Solarturmkraftwerk (46 %).

Neben den mengenmäßig am meisten verwendeten Rohstoffen Zement und Kies sind in Tab. 4.49 die technisch wichtigsten Rohstoffe aufgelistet. Insbesondere Chrom ist hierbei von großem Interesse, da es von der EU als kritischer Rohstoff aufgeführt wird (EUROPEAN COMMISSION 2014c). Darüber hinaus ist Silber aufgrund der großen

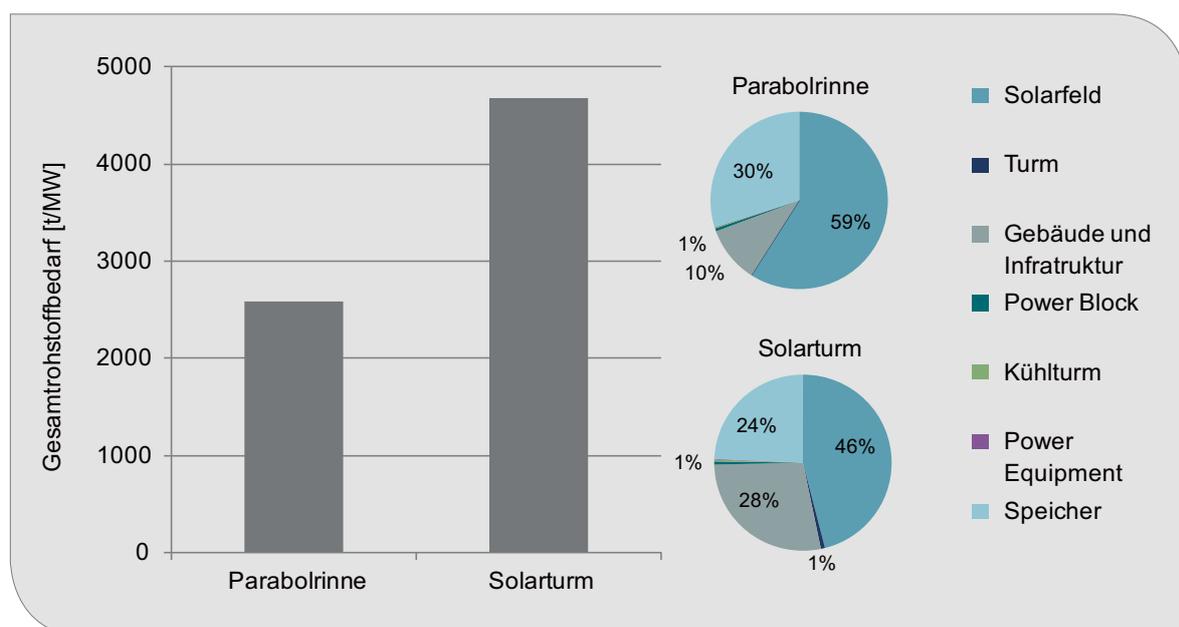


Abb. 4.55: CSP Anlagen nach Systemkomponenten
(Quelle: DLR & CIEMAT 2008), linear skaliert auf eine 1 MW Anlage

Bedeutung in Spiegelsystemen signifikant bei der Beschreibung von CSP-Systemen.

Die dargestellten Zahlen beruhen auf Referenzkraftwerken und sind nach PIHL et al. (2012) im Abgleich mit der Literatur valide. Trotzdem sind sie eher als Mengengerüst der einzelnen Kraftwerkstypen zu verstehen und dienen nicht zum generellen Vergleich bezüglich der Rohstoffe untereinander, da sich beide Typen noch in unterschiedlichen Stadien der Kommerzialisierung befinden. Für das Parabolrinnenkraftwerk wurde eine 50 MW_e Anlage in Spanien mit einer Solarfeldgröße von 512.000 m² sowie einem binären Salzgemisch aus KNO₃ und NaNO₃ angenommen. Das Solarturmkraftwerk wurde ausgehend von der Sierra Sun-Tower-Anlage in Kalifornien, einer 5 MW_e Direkt-dampf Demonstrationsanlage, auf eine 100 MW_e Anlage mit einem 1.472.000 m² großen Solarfeld hochskaliert. Auch das Solarturmkraftwerk nutzt ein binäres Salzgemisch aus KNO₃ und NaNO₃. Beide Systeme verwenden Kollektoren mit einer 100 nm dicken Silberschicht (PIHL et al. 2012).

4.20.3 Foresight industrielle Nutzung

Bereits in den Jahren 1985 bis 1992 ist als Folge der Ölkrise von 1979/80 eine Reihe von solarthermischen Kraftwerken in Betrieb gegangen. Auf-

grund der damaligen energiepolitischen Rahmenbedingungen und der Stabilisierung des Ölpreises konnte die Technologie sich jedoch nicht durchsetzen. Erst im Jahr 2006 wurde die marktreife Technologie wieder aufgegriffen.

Derzeit (2013) sind weltweit 3,6 GW solarthermische Kraftwerke am Netz (IEA 2014). Im Jahr 2013 sind Kraftwerke mit einer Leistung von 882 MW ans Netz gegangen. Nach wie vor ist derzeit noch nicht klar, welche Technologielinien sich in Zukunft durchsetzen werden. Weitere Untersuchungen hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit müssen durchgeführt werden. Ein sich abzeichnender Trend ist, dass Parabolspiegel mit rund 90 % schon jetzt einen erheblichen Anteil an der installierten Kapazität ausmachen. Dies wird wahrscheinlich in Zukunft so bleiben, da Parabolspiegel auch bei den Neuinstallationen einen großen Anteil besitzen (LENZEN 2014).

In der Roadmap der IEA (2014) wird ein starker Zuwachs an CSP-Kapazität prognostiziert (Abb. 4.56). Zunächst soll die jährliche Zuwachsrate demnach von knapp 1 GW/Jahr auf rund 15 GW/Jahr springen. Ab dem Jahr 2031 soll die Zuwachsrate dann sogar noch einmal weiter zunehmen. Demnach sollen im Jahr 2035 jährlich 40 GW an Anlagenkapazität neu installiert werden und insgesamt eine globale Anlagenkapazität von 463 GW zur Verfügung stehen.

Tab. 4.49: Rohstoff- und Werkstoffinhalte für den Bau der CSP-Systeme [t/GW]
(Quelle: PIHL et al. 2012)

| | Rohstoff | Parabolrinne | Solarturm |
|---|-------------------|--------------|-----------|
| Glas (Reflektoren) | Glas | 130.000 | 110.000 |
| Stahllegierungselemente (verbesserter Korrosionsschutz und Temperaturbeständigkeit) | Cr | 2.200 | 3.700 |
| | Ni | 940 | 1.800 |
| | Zn | 650 | 1.400 |
| | Mg | 3.000 | 2.600 |
| | Mo | 200 | 56 |
| | Nb | – | 140 |
| | V | 2 | 2 |
| Silber (Reflektor) | Ag | 13 | 16 |
| Salzgemisch (Speicher) | KNO ₃ | 220.000 | 150.000 |
| | NaNO ₃ | 340.000 | 220.000 |

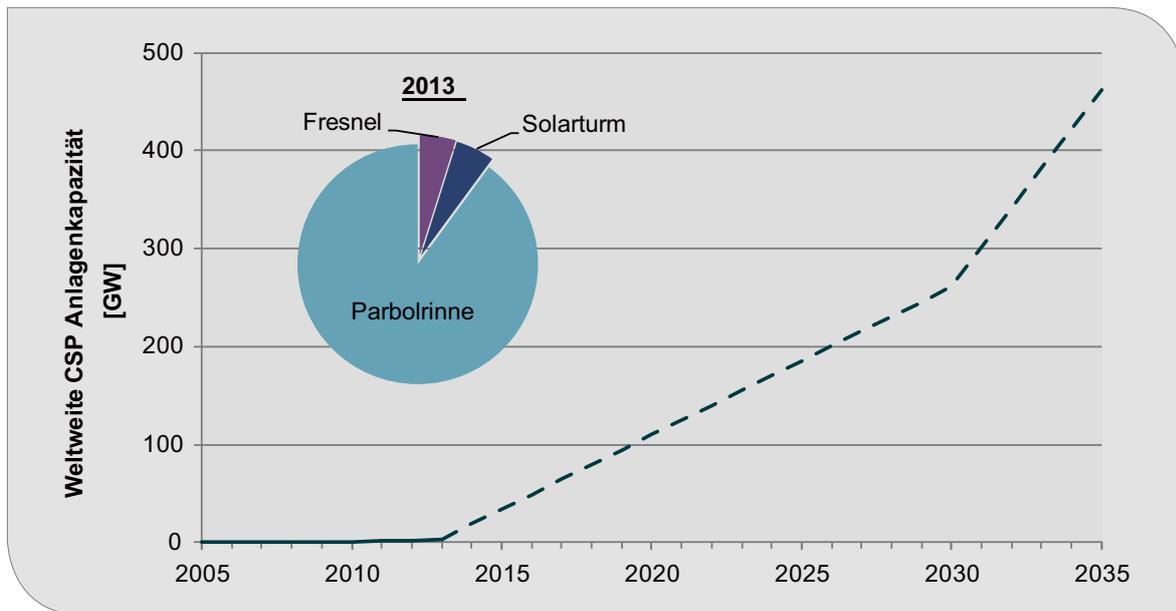


Abb. 4.56: Weltweite CSP-Anlagenkapazität
(Quelle: eigene Darstellung nach IEA 2014, LENZEN 2014)

4.20.4 Foresight Rohstoffbedarf

Vereinfacht wird für die Abschätzung des jährlichen Rohstoffbedarfs die Verteilung des Bestandes von 2013 angesetzt. Hierbei wird die 5 %-ige Anlagenkapazität an Fresnelkraftwerken der Tech-

nologielinie „Solarturm“ zugerechnet (vgl. Abb. 4.56). Damit ergibt sich eine jährlich neu hinzukommende Anlagenstruktur von 90 % Parabolrinnenkraftwerke und 10 % Solarturmkraftwerken. Durch Verknüpfung dieser Annahme mit den jährlichen

Tab. 4.50: Entwicklung der globalen Rohstoffproduktion ausgewählter Metalle von 1993 bis 2013
(Quelle: BGR 2015b)

| Rohstoff | Rohstoff | Produktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|-------------------------|-------------------|-------------------------|-------------|----------------------|
| Glas | Glas | 202.857.000 | 112.896 | 5.158.400 |
| Stahllegierungselemente | Cr | 13.422.102 (B) | 2.073 | 94.705 |
| | Ni | 1.955.132 (R) | 905 | 41.348 |
| | | 2.601.745 (B) | | |
| | Zn | 13.161.620 (B) | 639 | 29.218 |
| | | 12.919.650 (R) | | |
| | Mg | 970.170 (R) | 2.611 | 119.288 |
| | Mo | 270.739 (B) | 164 | 7.480 |
| Nb | 56.915 (B) | 12 | 564 | |
| V | 77.573 (B) | 2 | 76 | |
| Silber | Ag | 26.241 (B) | 12 | 536 |
| Salzgemisch | KNO ₃ | 34.500.000 ¹ | 187.866 | 8.583.900 |
| | NaNO ₃ | 51.300.000 ¹ | 289.296 | 13.218.400 |

B: Bergwerksförderung

R: Raffinadeproduktion

¹ Pihl et al. 2012

Zubauraten aus Kapitel 4.20.3 ergeben sich die in Tab. 4.50 aufgeführten Nachfragemengen.

Hervorzuheben ist, dass im Jahr 2013 für die Silberbeschichtung von Solarspiegeln ca. 1 t Silber benötigt wurde. Im Jahr 2035 werden dafür 536 t Silber benötigt. Im Vergleich zur weltweiten Silberproduktion von 26.000 t im Jahr 2013 ist der Bedarf im Jahr 2035 mit 2,06 % relativ gering. Mit Ausnahme des Salzgemisches zur Speicherung der Energie gilt dieser Zusammenhang auch für die übrigen aufgelisteten Rohstoffe. Auch hier liegt der Anteil an der Weltproduktion nur zwischen 0,33 (Chrom) und 2,9 % (Molybdän). Das Salzgemisch aus KNO_3 und NaNO_3 wird nach den Berechnungen hier mit rund 25 % einen erheblichen Anteil an der Weltproduktion besitzen, weshalb hier Handlungsdruck bestehen könnte diese Rohstoffe zu substituieren und die thermische Speicherung der solaren Energie anderweitig zu ermöglichen.

4.20.5 Recycling, Ressourcen-effizienz und Substitution

Das Recycling von silberbeschichteten Spiegeln aus solarthermischen Kraftwerken ist wahrscheinlich ökonomisch darstellbar, erfolgt jedoch mit großem zeitlichem Verzug. Im Produktionsprozess (Nassbelegungsprozess) wird überschüssiges Silber nahezu komplett zurückgewonnen, so dass hier nur mit einem sehr geringen Ressourcenverlust zu rechnen ist. Eine Weiterentwicklung der Beschichtungstechnologien könnte mittel- bis langfristig zu dünneren Silberschichten führen. Allerdings ist schon jetzt eine Dicke von 100 nm sehr dünn, sodass hier kein großes Entwicklungspotenzial zu liegen scheint. Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von aluminiumbasierten Reflektoren, die mit einer Polymerschicht vor Korrosion geschützt werden (PIHL et al. 2012). Generell ist das Silber ohne Verringerung des Wirkungsgrads jedoch nur schwierig zu substituieren, da die Reflektionseigenschaften von Spiegelsysteme ohne Silber um bis zu 5 % herabgesetzt werden, was durch größere Spiegelflächen wiederum ausgeglichen werden müsste.

Ähnliches gilt auch für die eingesetzten Salze zur thermischen Speicherung bei CSP-Anlagen. Eine Möglichkeit zur Reduzierung des Bedarfs in Latentwärmespeichern besteht durch spezielle Phasenwechselmaterialien auf organischer Basis

oder durch Zugabe von Graphit, bei denen die Wärme durch Phasenwechsel gespeichert werden können. Deren Potenzial wird derzeit jedoch erst untersucht (BARLEV et al. 2011). Eine weitere Möglichkeit bietet die chemische Speicherung der thermischen Energie mit endothermen Prozessen. Durch Umkehren der Prozesse kann zu einem späteren Zeitpunkt und sogar an einem anderen Ort die Energie wiedergewonnen werden.

Die Rohstoffe, die als Stahllegierungselemente zur Verbesserung des Korrosionsschutzes und der Temperaturbeständigkeit bei CSP-Bauteile eingesetzt werden, werden voraussichtlich den Bedarf derselben Legierungselemente bei konventionellen Kraftwerken substituieren. Daher ist insgesamt nicht von einem erhöhten weltweiten Bedarf an diesen Rohstoffen durch CSP auszugehen. Wenn allerdings der Bedarf nicht ersetzt wird, wird insbesondere Molybdän nur schwer zu substituieren sein (PIHL et al. 2012).

4.21 SOFC – Stationäre Brennstoffzelle

4.21.1 Technologiebeschreibung

Feststoffoxidbrennstoffzellen (SOFC) erzeugen sehr effizient elektrochemisch Strom, da der Wirkungsgrad bei Brennstoffzellen nicht wie bei konventionellen Wärmemaschinen durch den Carnot'schen Wirkungsgrad beschränkt ist. Neben einem hohen Wirkungsgrad besitzen Brennstoffzellen weitere Vorteile gegenüber traditionellen Energieumwandlungssystemen: die Verlässlichkeit, die Modularität, die Möglichkeit der Nutzung unterschiedlicher Treibstoffe, niedrige Emissionen und Geräuscharmheit.

In den letzten Jahren hat sich der SOFC-Markt weltweit stark konsolidiert. Während zum Beispiel in der Anfangszeit der japanischen BZ-Heizgeräte noch zahlreiche Unternehmen an der Entwicklung und Erprobung mitgewirkt haben, erfolgt heute der Vertrieb von SOFC-Geräte nur noch durch Aisin Seiki, während die Hauptakteure Panasonic und Toshiba Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen anbieten (ROSE 2015).

Auch in Europa haben sich die Anbieter von SOFC im Bereich kleiner Kraft-Wärme-Kopplungssys-

teme für Häuser ($< 10 \text{ kW}_{\text{el}}$) konsolidiert: Die deutsch-österreichische Firma Ceramic Fuel Cells Ltd. wurde im Juli 2015 von Solid Power aus Italien übernommen. Schon 2012 wurde die Fa. Staxera mit der sunfire GmbH zusammengeschlossen, welche die SOFC-Stacks für Vaillant herstellt. 2015 übernahm Viessmann 100 % der Fa. Hexis in der Schweiz und vermarktet weiterhin deren Galileo Anlage, während Bosch Thermotechnik unter den Marken Buderus und Junkers mit Aisin Seiki kooperiert und im Jahr 2016 die Markteinführung ihres Prototyps FC10 plant.

Größere Systeme über 1 MW werden von GE Power (OWENS, McGUINNESS 2015, WESOFF 2014), Bloom Energy (nur zur Stromerzeugung), Mitsubishi Heavy Industries (MHI) sowie LG Fuel Cell Systems gebaut; letztere hat 2012 die Mehrheit von Rolls Royce übernommen (FLEINER 2013). Ein Entwicklungsziel der Firmen ist die Kombination der SOFC-Techniken mit Mikro-Gasturbinen (MGT) zu SOFC-MGT-Hybridkraftwerken (KOBAYASHI et al. 2015). Die meisten Systeme arbeiten mit Erdgas, aber auch bei der Weiterentwicklung des Kohlekombikraftwerks ist eine langfristige Vision die Verknüpfung des IGCC-Prozesses mit einer Hochtemperatur-Brennstoffzelle (SOFC oder MCFC) zu einem Hybridkraftwerk (IGFC) (WIETSCHEL et al. 2010).

Die Festoxidbrennstoffzelle ist, wie alle Brennstoffzellentypen, nach dem Elektrolyt genannt. Eine SOFC besteht aus zwei porösen Elektroden, zwischen denen ein dichtes ionenleitendes Elektrolyt liegt. Die Arbeitsweise einer Zelle ist in Abb. 4.57 illustriert. Der an der Kathode zugeführte Sauerstoff reagiert mit den von dem externen Stromkreis kommenden Elektronen zu Oxidationen (O^{2-}), die zur Anode (Treibstoffelektrode) durch das ionenleitende Elektrolyt wandern. In der Anode rekombinieren die Oxidationen mit Wasserstoff (und/oder Kohlenstoffmonoxid) im Treibstoff zu Wasser (und/oder Kohlenstoffdioxid). Dabei werden Elektronen frei, die von der Anode über den externen Stromkreis zu Kathode fließen.

Grundsätzlich lassen sich zwei Bauformen bei der SOFC unterscheiden: die planare, welche flach wie die PEM-Brennstoffzelle gebaut ist, und eine röhrenartige, die tubular genannt wird (vergleiche Abb. 4.58). Beide Bauformen haben Vor- und Nachteile, so dass einzelne Hersteller zeitweise beide Varianten weiter entwickelt hatten.

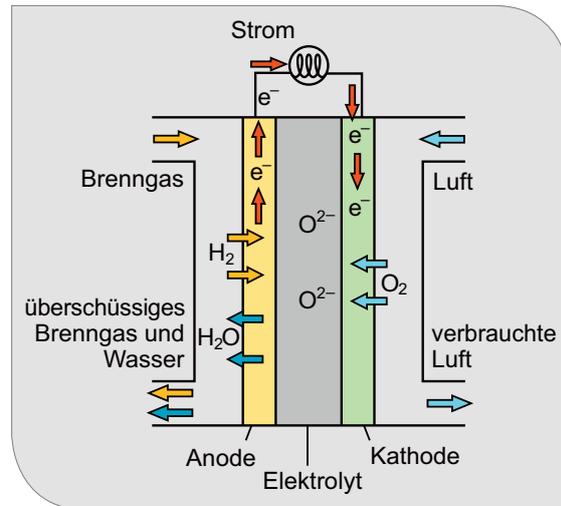


Abb. 4.57: Aufbau und Funktion einer Festoxidbrennstoffzelle
(Quelle: Sakurambo, Sunspeanzler, WIKIMEDIA, CC BY-SA 3.0)

In den letzten Jahren wurden die Arbeitstemperaturen von 900–1.000 °C um über 200 °C auf 650–800 °C gesenkt. Durch die Senkung der Arbeitstemperatur können mehr Materialien genutzt werden und die Systemkomponenten werden weniger beansprucht. Das trägt zur Kostenreduktion bei. Jedoch sinkt die elektronische Leitfähigkeit bei tieferen Temperaturen. Um diesen Nachteil zu überwinden, werden alternative Zellmaterialien und Bauweisen untersucht. Die Mate-

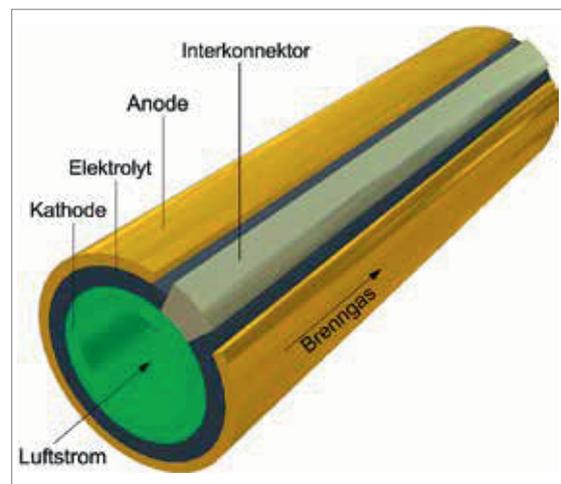


Abb. 4.58: Aufbau und Funktion einer Festoxidbrennstoffzelle
(Quelle: jmsanta, degree, WIKIMEDIA, CC BY-SA 3.0)

rialien für die Zellkomponenten werden nach ihren elektrischen Leiteigenschaften ausgewählt, die für die einzelnen Komponenten von Bedeutung sind.

Schon in den 1990er Jahren wurde yttriumdotiertes Zirkoniumdioxid (YSZ) als Elektrolyt in SOFC eingesetzt und ist wegen der ausreichenden ionischen Leitfähigkeit, der chemischen Stabilität und der mechanischen Festigkeit weiterhin das meist benutzte Material für das Elektrolyt. Der große Nachteil von YSZ ist die niedrige Ionen-Leitfähigkeit im Bereich niedriger Arbeitstemperaturen (<750 °C). Zwei Ansätze zur Lösung des Problems wurden getestet. Die Dicke des Elektrolyts wurde verringert und scandiumdotiertes Zirkoniumdioxid (ScSZ) eingesetzt, welches eine hohe Ionenleitfähigkeit besitzt.

Gadolinium- oder samariumdotiertes Ceroxid haben eine höhere Ionenleitfähigkeit als zirkoniumbasiertes Material. Ceroxidbasierte Materialien wurden erfolgreich als Elektrolyt in SOFCs von der Ceres Power Limited (GB) genutzt (ELECTROCHEMISTRY ENCYCLOPEDIA 2008).

Zusätzlich zu den üblicherweise genutzten Zirkonium- oder Ceroxiden könnte auch Galliumoxid als Elektrolytmaterial genutzt werden. Gallium hat jedoch zwei Nachteile: die Unsicherheit der Kosten und die chemische und mechanische Instabilität des Oxids. Trotz dieser Nachteile hat die Mitsubishi Material Corporation (Japan) bis zu 10 kW große SOFCs-Energiesysteme mit Gallium als Elektrolytmaterial erfolgreich gebaut und getestet (ELECTROCHEMISTRY ENCYCLOPEDIA 2008).

4.21.2 Rohstoffinhalt

Der Materialverbrauch hängt von der Bauweise der SOFC ab. Scandium als Dotierung von Zirkoniumdioxid wird in der Regel in elektrolytgetragenen Brennstoffzellen eingesetzt, da der Effekt der höheren Leitfähigkeit nur bei einer Dicke der Elektrolytschicht von 100–200 µm und hohen Temperaturen zum Tragen kommt. Der Effekt der höheren Leitfähigkeit geht bei anodenträglichen Brennstoffzellen, bei denen die Elektrolytschicht lediglich 7–10 µm dick ist, verloren (ANGERER et al. 2009).

Die poröse Anode wird meistens aus Nickel-YSZ bzw. Nickel-ScSZ hergestellt, je nachdem, mit

Tab. 4.51: Metallverbräuche für die SOFC

| Verbrauch | [g/kW] |
|------------|--------|
| Scandium | 23 |
| Cer | 51 |
| Lanthan | 213 |
| Zirkonium | 400 |
| Gadolinium | 13 |
| Yttrium | 14 |
| Aluminium | 50.000 |
| Chrom | 15.000 |

welchem Material das Elektrolyt dotiert ist. Dabei bestehen nur ca. ein Viertel des Volumens aus YSC bzw. ScSZ, ein Viertel aus Nickel und der Rest aus Luft. Bei elektrolytgestützten SOFC ist die Anode 50 µm, bei anodengestützten SOFC ist die Anode 300–1000 µm dick (STEINBERGER-WILCKENS 2008). Die Kathode eines YSC-Elektrolyts besteht klassischerweise aus dem keramischen Werkstoff Lanthan-Strontium-Manganit, (La,Sr) MnO₃, kurz LSM.

Die Flächenleistungsdichte beträgt bei SOFC, die auf Langlebigkeit ausgelegt sind, ca. 0,3–0,4 W/cm². Der Scandiumdotierungsgrad liegt bei 5–10 Mol-%, der Yttriumdotierungsgrad bei 3–10 Mol-%. Die Dichte von YSZ ist ca. 6,6 g/cm³. Werden von allen Werten die Mittelwerte genommen und die Molprozent in Gewichtsprozent umgerechnet, so kommt man auf die in Tab. 4.51 angegebenen Materialbedarfe für Yttrium und Zirkonium. Weitere Angaben sind aus einer Ökobilanz für die Hexis SOFC entnommen (MAI 2015).

4.21.3 Foresight industrielle Nutzung

Die Entwicklung der letzten Jahre im SOFC Markt wird in E4TECH (2015) dargestellt (vergleiche Abb. 4.59).

Während die Wachstumsrate von 2010 bis 2015 durch die jährliche Verdopplung der installierten SOFC-Leistungen sehr hoch war, wird in den Jahren bis 2022 von einem moderaten Wachstum von 9,05 % ausgegangen (MARKET RESEARCH STORE 2015). Wird dieses Wachstum bis zum Jahre 2035 fortgeschrieben, ist im Jahre 2035 die Installation von 3.700 MW zu erwarten (vergleiche Abb. 4.60).

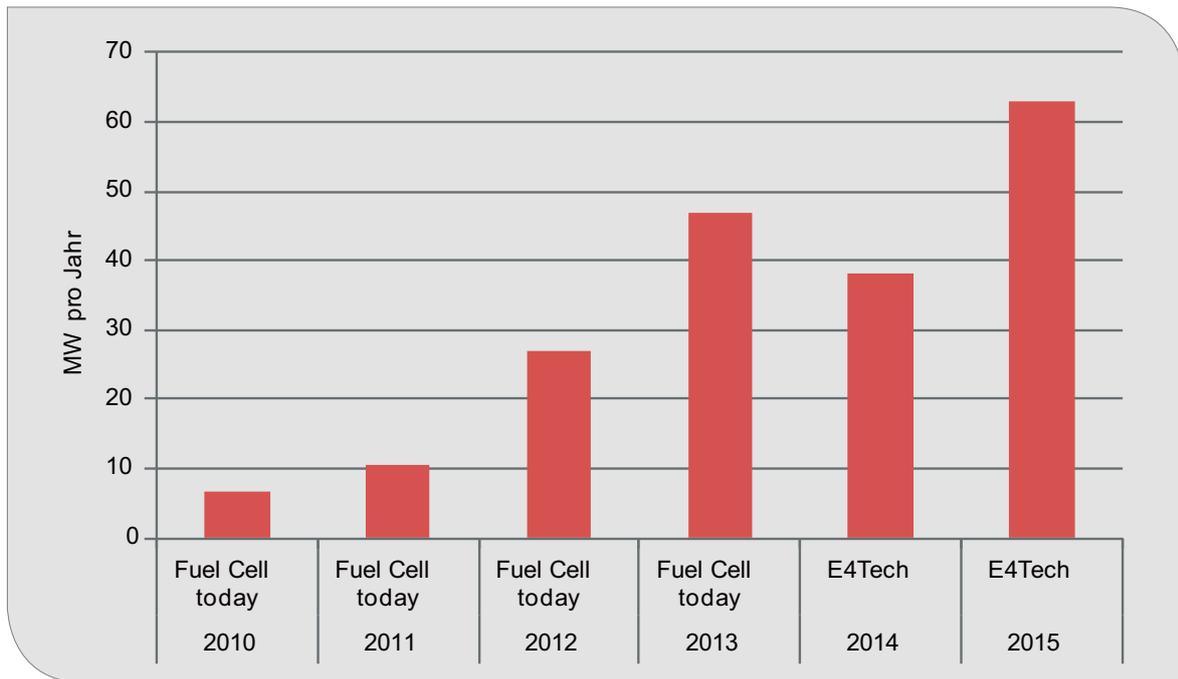


Abb. 4.59: Produktion von SOFC Anlagen

Die Entwicklung des Brennstoffzellenmarktes hängt sehr von den politischen Rahmenbedingungen und der Forschungsförderung ab. Unterschiedliche Technologien finden sich in der Entwicklung,

die sich in den Bauweisen und Materialien unterscheiden. Letztlich ist die Materialwahl von unterschiedlichen Faktoren wie Bauweise, Preis und elektrischen Eigenschaften abhängig.

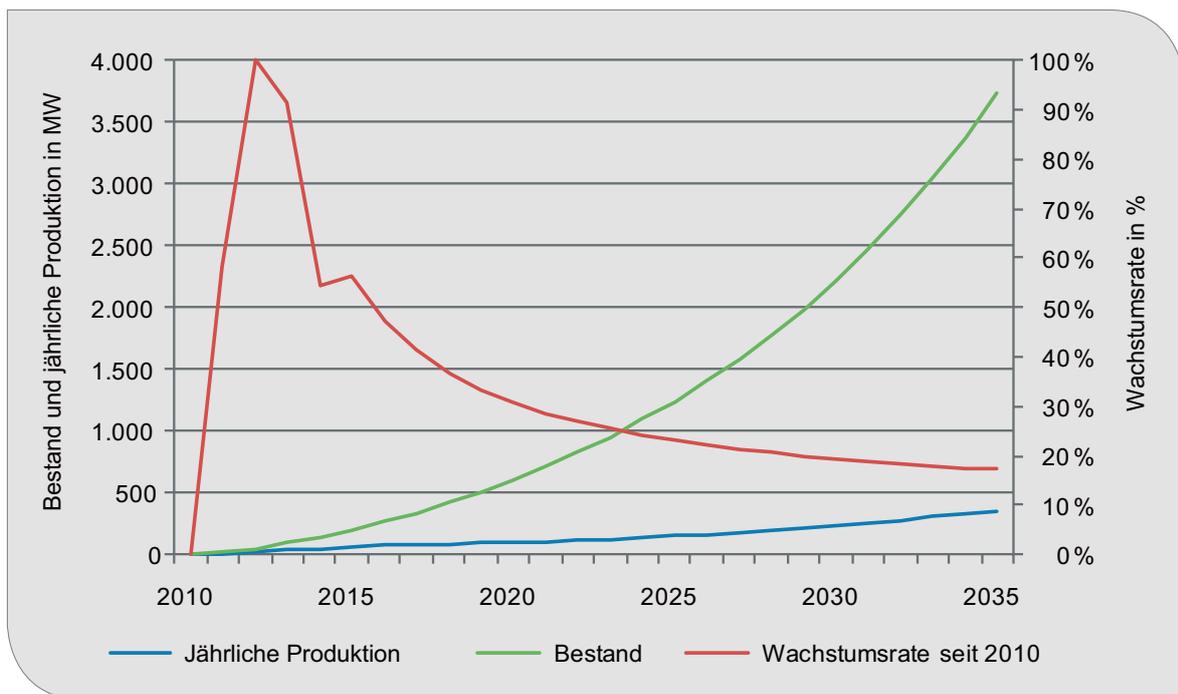


Abb. 4.60: Produktion, Wachstumsrate und Aufbau des Bestandes an installierter SOFC-Leistung

4.21.4 Foresight Rohstoffbedarf

Aus den spezifischen Rohstoff-Verbräuchen und den Produktionszahlen ergeben sich die Rohstoffbedarfe für SOFC-Systeme (vgl. Tab. 4.52).

Ein Versorgungsengpass wäre bei der Verfügbarkeit von Scandium möglich, weshalb das Forschungszentrum Jülich an dem weniger materialabhängigen yttriumdotierten anodengestützten SOFC-Brennstoffzellen arbeitete (BUCHKREMER 2008).

4.21.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Die Materialverluste hängen vom Herstellungsverfahren, von der Zellgeometrie und der Größe ab. In der Vergangenheit wurden bis zu 50 % angenommen (LILLEY et al. 1989), in neueren Arbeiten auch nur 10 % (LEE 2015).

Das Recycling von PEM-Brennstoffzellen ist in verschiedenen Projekten untersucht und in Demonstrationsanlagen gezeigt worden. Daher kann unterstellt werden, dass entsprechende Verfahren auch für die SOFC-Anwendung finden, sobald ein genügend großer Massenstrom an Alt-Anlagen vorliegt.

4.22 CCS – Carbon Capture and Storage

4.22.1 Technologiebeschreibung

Carbon Capture and Storage (CCS) bedeutet die Abscheidung und geologische Speicherung von CO₂. CCS-Technologien sollen künftig das bei Verbrennungsprozessen frei werdende CO₂ mit möglichst wenig zusätzlichem Energieaufwand und Kosten abtrennen, zum Speicher transportieren und dann langfristig und sicher speichern (BINE 2007). Die weltweite Stromversorgung wird insbesondere in den Wachstumsländern China und Indien auf Jahrzehnte auf fossile Energieträger angewiesen sein. Es besteht daher gegebenenfalls mit der Kohlenstoffsequestration und der dauerhaften Endlagerung von CO₂ eine Möglichkeit, die ansonsten zu erwartende steigende Belastung der Atmosphäre mit Treibhausgasen zu reduzieren. Zusätzlich kann man in fast erschöpften Erdöllagerstätten durch die Einlagerung von CO₂ den Druck erhöhen (Enhanced Oil Recovery).

Das Konzept der CO₂-Abscheidung bei Kraftwerken basiert darauf, das CO₂ durch technische Verfahren teilweise oder vollständig in einem modifizierten Umwandlungsprozess abzutrennen. In Abb. 4.61 ist das Entwicklungsstadium der CCS-Systemkomponenten dargestellt. Zwar wurden Abtrennungstechnologien schon seit

Tab. 4.52 Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf für stationäre SOFC-Systeme in t

| Rohstoff | Produktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|------------|-----------------------------|-------------|----------------------|
| Scandium | 6,5 ¹ | 1,1 | 9 |
| Cer | 53.700 ² | 2,4 | 20 |
| Lanthan | 42.900 ² | 10,0 | 80 |
| Zirkonium | 644.632 (B) | 18,8 | 155 |
| Gadolinium | 3.560 ² | 0,6 | 5 |
| Yttrium | 5.500 ² | 0,7 | 5 |
| Aluminium | 47.811.880 (R) | 2.350 | 19.400 |
| Chrom | 13.422.102 (B) ³ | 705 | 5.800 |

B: Bergwerksförderung

R: Raffinadeproduktion

¹ Quelle: USGS 2014a, Metallgehalt berechnet aus 10 Tonnen Sc₂O₃

² Metallproduktion berechnet aus den SEO, Schätzung inkl. illegaler Förderung in China, (Quelle: KINGSNORTH 2015)

³ Quelle: berechnet aus Chromit, USGS 2015d

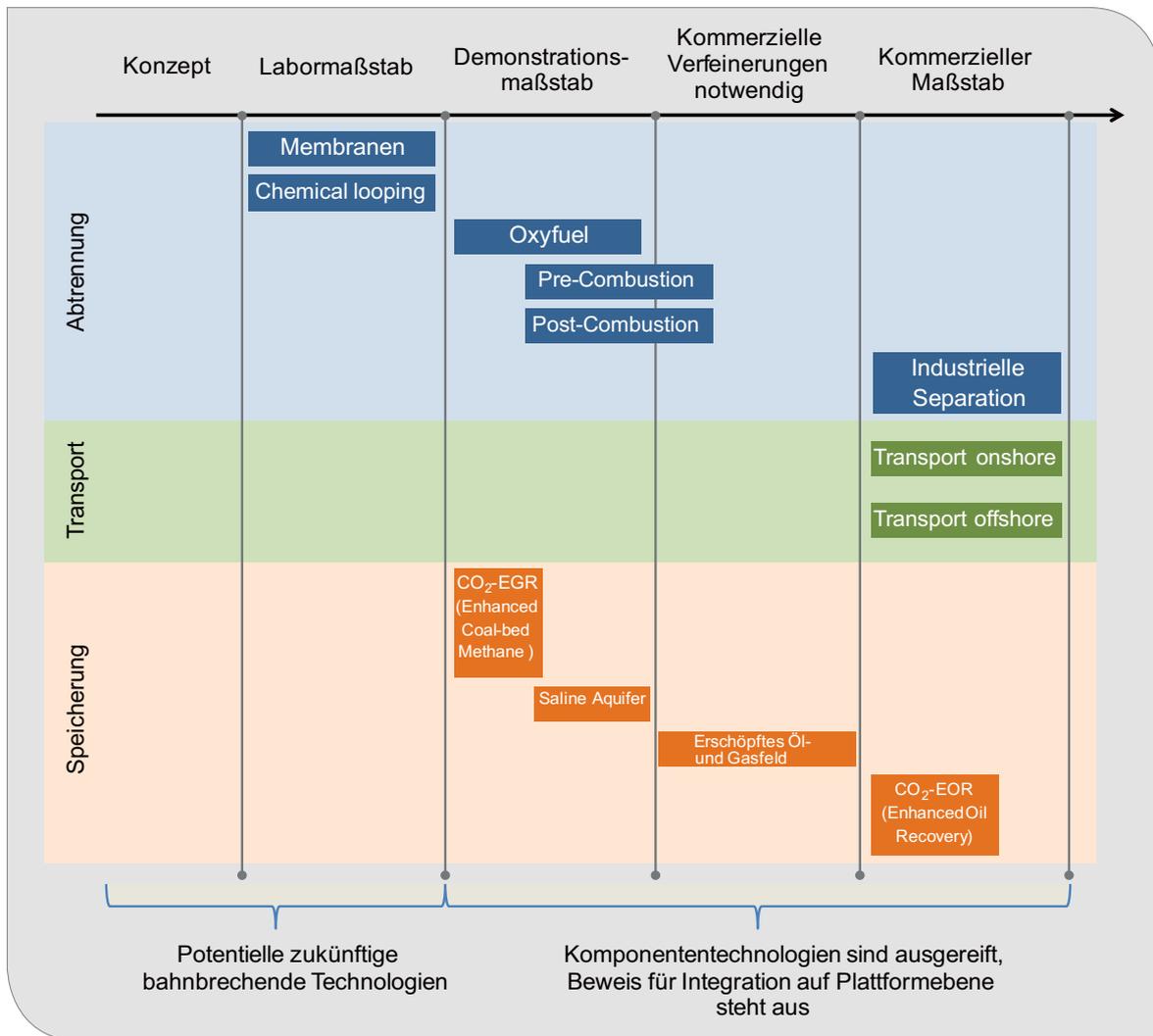


Abb. 4.61: Entwicklungsstadium der CCS-Systemkomponenten (Quelle: eigene Darstellung nach INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2005) und MCKINSEY & COMPANY (2008))

Jahrzenten in der chemischen Industrie und in Raffinerien eingesetzt, allerdings muss die technische Anwendung im Energiesektor nach wie vor gezeigt werden. Dies gilt insbesondere für Membranverfahren. Daher unterscheidet man grob zwischen drei Verfahren, deren Systemkomponenten bereits ausgereift sind: Post-Combustion-Capture, Oxyfuel und Pre-Combustion. Ausschließlich das Post-Combustion- und das Oxyfuel-Verfahren lassen sich bei bereits bestehenden Anlagen nachrüsten. Bei dem Pre-Combustion-Verfahren ist eine Auslegung der kompletten Anlage notwendig, sodass es sich nur für Neuanlagen eignet. In Abb. 4.62 sind die drei Carbon-Capture-Verfahren schematisch dargestellt.

Bei allen drei Verfahren wird nach der Abtrennung das CO₂ entweder für den Transport in Pipelines auf 110 bar verdichtet (überkritischer Zustand) oder bei geringen Mengen für den Abtransport in LKWs verflüssigt, wobei der Transport mittels Pipelines bevorzugt wird. Danach wird es in tiefen geologischen Formationen on- oder offshore gespeichert. Bei der Ölgewinnung wurden dazu bereits wertvolle Erfahrungen gesammelt, indem CO₂ zum EOR (Enhanced Oil Recovery) eingesetzt oder in erschöpften Öl- bzw. Gasfeldern gespeichert werden kann.

Aufgrund von Wirkungsgradverlusten benötigt ein Kraftwerk mit CCS-Technologie je nach Anlagentyp zwischen 10–40 % mehr Energie, was auch mit erhöhten CO₂-Emissionen verbunden ist.

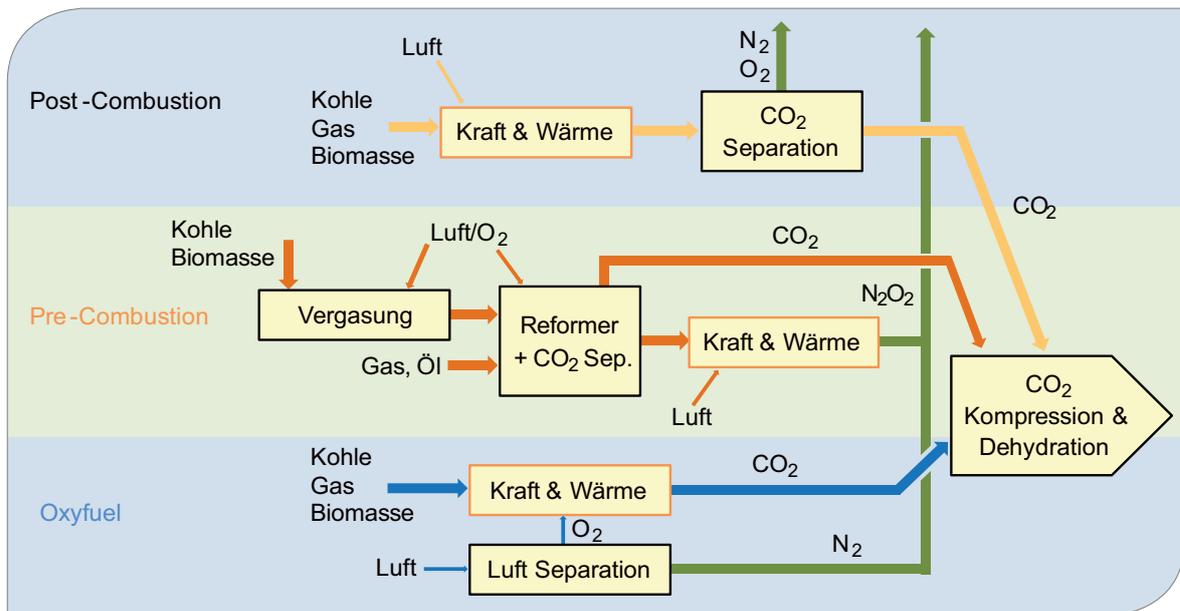


Abb. 4.62: Schematische Darstellung der drei Carbon-Capture-Verfahren
(Quelle: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2005), verändert)

Diese CO₂-Emissionen werden wiederum zu 85–95 % abgeschieden und können gespeichert werden, sodass die Emissionen in die Atmosphäre durch CCS insgesamt um 80–90 % reduziert werden können (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE 2005).

Post-Combustion

Das Verfahren des Post-Combustion-Capture lässt sich als Rauchgaswäsche beschreiben. Über die bereits übliche Rauchgasreinigung (Schwefel, NO_x, Staub) wird noch eine weitere Verfahrensstufe realisiert, in der das CO₂ aus dem Rauchgas entfernt wird. Bei einem chemischen Verfahren wird in einem Reaktorgefäß das Rauchgas im Gegenstrom mit einem Lösungsmittel – Aminlösungen wie beispielsweise Monoethanolamin – in Kontakt gebracht und so weitgehend von CO₂ befreit. Unter Zufuhr von Wärme wird das CO₂ in einem zweiten Reaktor zum Ausgasen gebracht. Das regenerierte Lösungsmittel wird wieder in den Prozess eingebracht.

In Bezug auf den Kraftwerksbau bedeutet die Nutzung eines chemischen Waschverfahrens keine Änderung der eingesetzten Technologien wie Brenner, Kessel, Turbinen usw. Allerdings muss die Abstimmung der gesamten Anlage verändert

werden, da die zusätzliche Wärmeenergie für die Regeneration des Lösungsmittels bereitgestellt werden muss. Außerdem muss die Waschanlage und die notwendige Verrohrung in die Geometrie und Topologie mit eingeplant werden.

Pre-Combustion

Bei dem Pre-Combustion-Verfahren wird Braunkohle oder Steinkohle in einem Vergaser unter Zugabe von Sauerstoff in ein Synthesegas überführt, das hauptsächlich aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff besteht. Die unerwünschten Gasbestandteile (H₂S, COS, HCN, NH₃) werden aus dem Synthesegas entfernt. Erdgas wird so reformiert, dass auch ein Gas mit den Hauptbestandteilen Kohlenmonoxid und Wasserstoff entsteht. Sowohl beim Einsatz fester Brennstoffe als auch beim Einsatz von Erdgas schließt sich nun eine Wasserstoffkonvertierung an, bei der in einem Shift-Reaktor das CO mit Wasserdampf zu CO₂ und zusätzlichem Wasserstoff umgewandelt wird. Es entsteht ein Synthesegas aus den Hauptbestandteilen Wasserstoff und CO₂. Der hohe CO₂-Partialdruck ermöglicht eine Abtrennung des CO₂ aus dem H₂/CO₂-Gemisch mittels physikalischer Wäsche. Hierbei wird das CO₂ physikalisch in einer Waschlösung wie z. B. Methanol gelöst. In Zukunft kommt auch die Membrantechnik

(Wasserstoff-Membranen) zur CO₂-Abtrennung in Frage, deren Vorteil in einer Reduzierung des Energieverbrauchs zu sehen ist.

Oxyfuel

Das Oxyfuel-Konzept beruht auf dem Prinzip, mit Verbrennung von Kohlen- oder Kohlenwasserstoffen mit reinem Sauerstoff ein Rauchgas entstehen zu lassen, das im Wesentlichen aus CO₂ (ca. 80 %) und Wasserdampf besteht. Letzterer kann problemlos auskondensiert werden. Durch die Verbrennung im reinen Sauerstoff entstehen keine Stickoxide. Somit entfallen aufwändige Entstickungsanlagen. Die Haupttrennarbeit und somit der höchste Energieverbrauch wird bei der Herstellung von reinem Sauerstoff in einer Luftzerlegungsanlage aufgewandt. Stand der Technik ist hierbei die kryogene Luftzerlegung, bei der die Luft zunächst verflüssigt wird und dann Sauerstoff und Stickstoff durch Destillation aufgetrennt werden. Bei der Sauerstoffherstellung könnte der Einsatz von Hochtemperaturmembranen den Energiever-

brauch deutlich senken. Diese speziellen Polymermembranen sind jedoch noch nicht Stand der Technik (CREMER 2007, WUPPERTAL INSTITUT 2007).

4.22.2 Rohstoffinhalt

Nach CORMOS et al. (2013) werden für den Bau von Kraftwerken mit CCS-Technologie mehr Rohstoffe benötigt als bei konventionellen Kraftwerken. Dazu wurden für deren Analyse drei verschiedene Kraftwerkstypen (NGCC, IGCC und PF) mit den jeweils passenden CCS-Verfahren untersucht. In Abb. 4.63 ist der Mehrbedarf an Konstruktionsmaterialien für den Bau von Kraftwerken mit CCS-Technologie dargestellt und darüber hinaus in der enthaltenen Datentabelle den konventionellen Kraftwerken prozentual gegenübergestellt. Insbesondere Beton und Stahl werden bei den kohlenbasierten Kraftwerken (IGCC und PF) mit rund 102 % zu einem erheblichen Anteil mehr benötigt. Bei dem Gaskraftwerk steigt ausschließlich der Bedarf an niedriglegierten Stählen mit 64 % in einem erheblichen Maße.

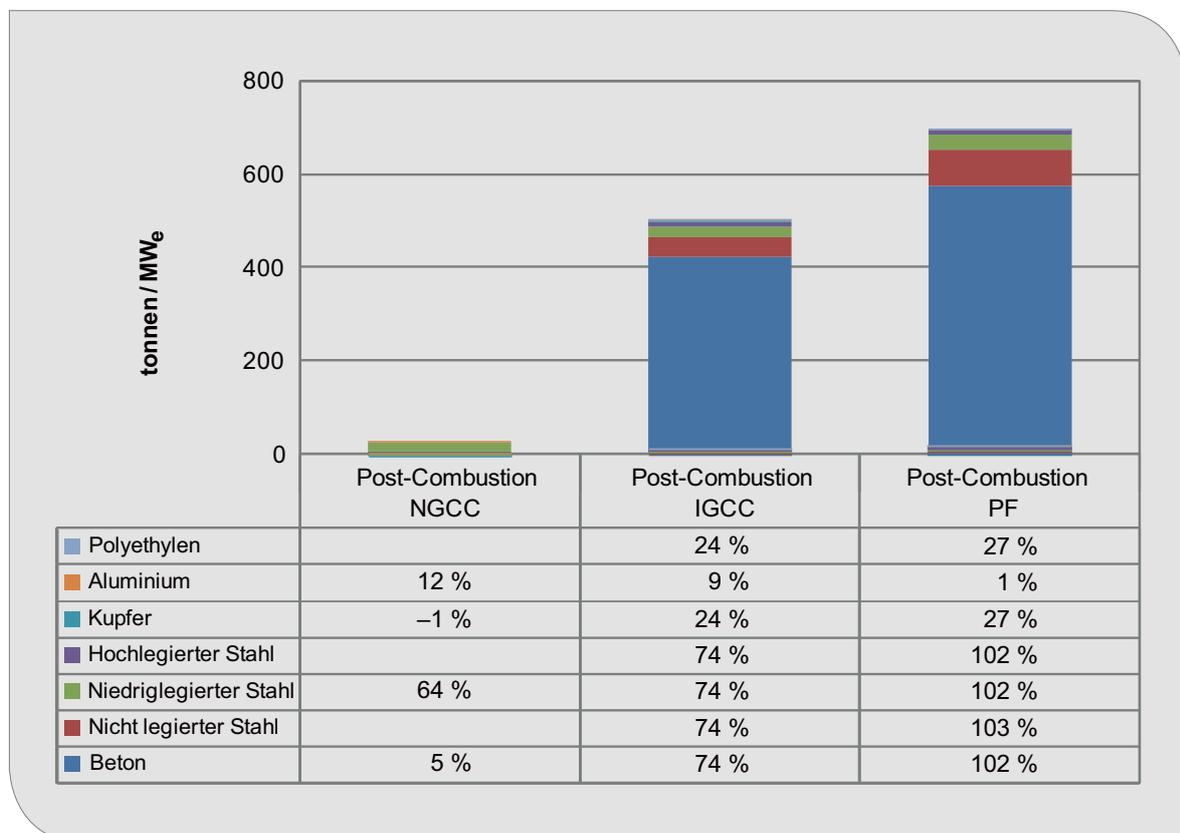


Abb. 4.63: Mehrbedarf an Konstruktionsmaterialien für den Bau von Kraftwerken mit CCS-Technologie (Quelle: eigene Berechnungen nach CORMOS et al. 2013)

Tab. 4.53: Menge an Legierungselementen für CCS-Technologien in kg/MW (Quelle: eigene Berechnung nach Moss et al. 2012)

| Legierungselement | kg/MW |
|-------------------|-------|
| V | 7 |
| Nb | 7 |
| Ni | 80 |
| Mn | 263 |
| Cu | 49 |
| Co | 1 |
| Cr | 23 |
| Mo | 1 |

Die dargestellten Zahlen beruhen auf konzeptionellen Referenzkraftwerken zwischen 400–500 MW mit einer minimalen CO₂-Abscheidungsrate von 90 % und sind nach CORMOS et al. (2013) im Abgleich mit der Literatur valide. Sie wurden durch Simulationen an den notwendigen Stellen ergänzt. Anschließend wurden die effizientesten Kraftwerke untereinander verglichen. Dabei wurden Konstruktionsparameter aus der Literatur entnommen.

Derzeit kann keine sinnvolle Aussage über die Stahlmenge pro Megawatt für die Oxyfuel Technologie getroffen werden, da die Materialien in den nächsten Jahren erst erforscht werden. Außerdem wird erwartet, dass die Prozessketten noch weiter vereinfacht werden können, so dass gleichzeitig der Materialeinsatz verringert wird (BURCHHARDT 2008).

In der JRC-Studie (Moss et al. 2012) wurden verschiedene Energietechnologien im Hinblick auf die Materialanforderungen mit besonderem Fokus auch auf Legierungselemente für die EU untersucht. In Tab. 4.53 sind die identifizierten Legierungselemente für die CCS-Technologien aufgelistet, welche jedoch nur in sehr kleinen Mengen benötigt werden. Insbesondere Chrom, Kobalt und Niob sind hierbei von großem Interesse, da sie von der EU als kritische Rohstoffe aufgeführt werden (EUROPEAN COMMISSION 2015).

Neben den Konstruktionsmaterialien mit den angesprochenen Legierungselementen benötigen die CCS-Technologien laufend Materialien für den Prozess der CO₂-Abscheidung. Diese Materialien sind in Tab. 4.54 bezüglich der CO₂-Abschei-

Tab. 4.54: Materialien für CO₂-Abscheidungsmethoden (Quelle: D'ALESSANDRO et al. 2010)

| | | Post-Combustion | Pre-Combustion | Oxyfuel Combustion |
|----------------------------|---|-----------------|----------------|--------------------|
| Absorption | – Chemikalien (Alkanolamine) – Physikalisch (Ionsche Flüssigkeiten) | x | x | |
| Absorption | – Mikroporös Materialien (Zeolithe, Metalloxide, Metall-organische Materialien, kohlenstoffhaltige Adsorbentien) – Druck/Temperatur-Swing-Ansatz | x | x | x |
| Tiefemperatur-Destillation | | x | x | x |
| Membranen | – Anorganisch (Keramik, Wasserstofftransport, Ionentransport) – Polymer – Hybridmembranen | x | x | x |
| Gashydrate | | x | x | |
| Chemical looping | – Metalloxide | | x | x |

dungsmethoden aufgelistet. Bei Post-Combustion werden derzeit wässrige Alkanolaminlösungen wie Mono-Ethanol-Amin (MEA) und kohlehaltige Adsorbenten für die CO₂-Wäsche eingesetzt. Nach Abschätzung in WUPPERTAL INSTITUT (2007) werden pro abgetrennter Tonne CO₂ an Chemikalien die folgenden Mengen benötigt: 2,25 kg MEA-Lösemittel und 0,0826 kg Aktivkohle sowie 0,152 kg NaOH für die CO₂-Wäsche mittels MEA-Abscheidung.

Langfristig, d. h. im Neubauzeitraum nach 2020, stellt die Verwirklichung und der sichere Betrieb einer Kraftwerksanlage mit 700 °C-Technologie eine unentbehrliche Voraussetzung dar, um CO₂ aus den Rauchgasen unter wirtschaftlichen Aspekten auszuwaschen und in geeignete Lagerstätten zu verbringen. Heutige bestehende fossil befeuerte Kraftwerke, mit einem mittleren Wirkungsgrad von rund 38 %, sind unter dem Gesichtspunkt eines verantwortlichen Umgangs mit fossilen Primärenergieträgern völlig ungeeignet für einen Betrieb mit einer CO₂-Rauchgaswäsche. Die durch eine CO₂-Rauchgaswäsche verursachte Wirkungsgradreduzierung von etwa 12 % würde dazu führen, dass der dem Kraftwerk zugeführte Brennstoffmassenstrom bei gleicher Stromerzeugung um rund 46 % gesteigert werden müsste. Neben einem höheren Verbrauch an fossilen Brennstoffen wäre beim Einsatz von Rauchgaswäschen auch erheblich mehr CO₂ abzutrennen und einzulagern (VGB 2011).

4.22.3 Foresight industrielle Nutzung

Als Zeitpunkt der kommerziellen Verfügbarkeit von CCS im Kraftwerksmaßstab wird in Roadmaps das Zieljahr 2030 genannt (EUROPEAN COMMISSION 2015). In welchem Zeitraum CCS einen Beitrag zum Klimaschutz leisten kann, ist jedoch nicht nur von der technischen Verfügbarkeit der Abscheidetechnologien, sondern auch von der verfügbaren Speicherkapazität und der benötigten Transportinfrastruktur abhängig (GRÜNWALD 2007). Einige begonnene CCS-Projekte, wie das Projekt „Schwarze Pumpe“ von Vattenfall, wurden in der Zwischenzeit wieder beendet. Dagegen werden noch immer neue Pilotanlagen (vgl. MIT 2015b) sowie kommerzielle CCS-Projekte mit einer Größe von über 60 MW geplant und gebaut (vgl. MIT 2015a und GLOBAL CCS INSTITUTE 2015).

Die Entwicklung der CCS-Technologie in der Zukunft ist schwer abzuschätzen, da die kommerzielle und routinemäßige Nutzung voraussichtlich erst ab dem Jahr 2030 einsetzen wird. In der Roadmap der IEA (2013a) wird ein starker Zuwachs an CCS-Kapazität zwischen 2030 und 2040 unter den Rahmenbedingungen eines 2 °C-Szenarios für die globale Erderwärmung (Szenario: „ETP 2012 2DS“) prognostiziert. Demnach soll die weltweite Kraftwerkskapazität, die mit CCS ausgerüstet ist, auf 946 GW in 2050 anwachsen und damit ca. 8 % der weltweiten Kraftwerksparkkapazität ausmachen. Darüber hinaus ist auch ein erheblicher Ausbau der CCS-Technologie in der Nicht-Energie-Industrie notwendig, um von den aktuellen (2013) CO₂-Einsparungen einiger zehn Megatonnen auf mehrere tausend Megatonnen Einsparung zu kommen. Zwischen 2015 und 2050 müssen nach IEA (2013a) mit CCS 120 Gt_{CO2} abgeschieden und gespeichert werden, um so das 2 °C-Ziel in dem IEA Szenario zu erreichen.

Vereinfachend wird hier der Nicht-Energie-Sektor, dem beispielsweise die Zementindustrie sowie Eisen- und Stahlindustrie zugeordnet werden, vernachlässigt. Zudem wird ein gleichmäßiger und kontinuierlicher Ausbau der CCS-Technologie ab dem Jahr 2030 angenommen, wobei kein Unterschied zwischen den einzelnen Regionen (wie Europa oder Asien) besteht. Um die geforderten 964 GW an Kraftwerken mit CCS-Technologie zu erreichen, ergibt sich mit den genannten Annahmen für die geschätzte Ausbaurrate ein jährlicher Zuwachs von 48 GW. Dabei wird weiterhin vereinfachend angenommen, dass im Jahr 2030 kommerziell genutzte Anlagen noch sehr gering sind und daher hier kürzend für die durchgeführte Interpolation zu null gesetzt wurden.

4.22.4 Foresight Rohstoffbedarf

Verlässliche Annahmen zur Berechnung des Rohstoffbedarfs sind bei derzeitigem Stand der Technik (Demonstrationsanlagen) schwer zu treffen. Erstens werden Stahllegierungen für hocheffiziente Kohlekraftwerke noch getestet; zweitens sind Reduzierungen im Materialverbrauch durch Weiterentwicklung der Prozesse zu erwarten; und schließlich könnten neue Membrantechnologien derzeitige Anlagen für die Luftzerlegung beim Oxyfuel-Verfahren oder physikalische Verfahren zur CO₂-Abtrennung vor der Verbrennung erset-

zen. Unter Umständen entsteht hier ein Bedarf für Seltene Erden. Da aber einige Materialkombinationen möglich sind, könnte in Zukunft wegen möglicher Knappheiten oder Kostenfragen auf andere Stoffe zurückgegriffen werden. Darüber hinaus ist der zukünftige Ausbau der CCS-Technologie noch schwer abzuschätzen.

Dennoch soll hier versucht werden den Rohstoffbedarf an Legierungselementen für das Jahr 2035 abzuschätzen. Durch Verknüpfung der Annahme aus Kapitel 4.22.3 mit den Werten aus Tab. 4.53 ergeben sich die in Tab. 4.55 aufgeführten Nachfragemengen bei einem jährlichen Zuwachs von 48 GW an Kraftwerken mit CCS. Nach den Berechnungen hier haben demnach alle Legierungselemente nur einen sehr geringen Anteil an der Weltproduktion im Promillebereich. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt auch die Studie VATOPOULOS & TZIMAS (2012) für die Zementindustrie. Auch in dem Sektor haben die untersuchten CCS-Technologien keinen Effekt auf den Rohstoffbedarf zur Herstellung von Klinker im Einzelnen und damit auch weltweit.

4.22.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Da CCS sich noch im frühen Stadium der Entwicklung befindet und Weiterentwicklungen der Pro-

zesse ausstehen, ist es schwierig Aussagen über das Recycling und Substituierbarkeit von Rohstoffen bezüglich CCS zu machen. Sicherlich gilt für die Konstruktionsmaterialien von CCS-Technologien ähnliches wie für konventionelle Kraftwerkskomponenten. Das enthalten Kupfer, Aluminium und Chrom wird daher in Zukunft vermutlich recycelt werden (EUROPEAN COMMISSION 2015). Ebenso wird es möglich sein, Katalysatoren zu recyceln oder Katalysatoren mit Vanadium und Wolfram durch Calciumcarbonat (für SO₂-Rückhaltung) zu ersetzen (IEA 2012).

4.23 Lithium-Ionen-Hochleistungs-Elektrizitätsspeicher für PKW

4.23.1 Technologiebeschreibung

Der Bedarf an Hochleistungs-Akkumulatoren für mobile elektronische und elektrische Geräte steigt seit Jahren steil an. Diese Entwicklung wird sich auch in der Zukunft fortsetzen. Dabei stehen zwei Entwicklungsziele im Vordergrund: Die Steigerung der Kapazität und die Steigerung der zulässigen Arbeits- und Ladestromstärke. Bei mobilen elektronischen Geräten steht die Kapazitätssteigerung im Vordergrund. Sie ermöglicht einen längeren Akkubetrieb. Bei Akkuwerkzeugen dagegen kommt es

Tab. 4.55: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf an Legierungselementen für den Bau von CCS in t

| Rohstoff | Produktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|----------|----------------------------------|-------------|----------------------|
| Vanadium | 77.573 (B) | < 1 | 337 |
| Niob | 56.915 (B) | < 1 | 356 |
| Nickel | 2.601.745 (B) 1.955.132 (R) | < 1 | 3.872 |
| Mangan | 16.900.000 ¹ | < 1 | 12.673 |
| Kupfer | 18.365.341 (B) 21.446.333 (R) | < 1 | 2.338 |
| Kobalt | 129.763 (B) | < 1 | 25 |
| Chrom | 13.422.102 ² | < 1 | 1.098 |
| Molybdän | 270.239 (B) | < 1 | 25 |

B: Bergwerksförderung

R: Raffinadeproduktion

1 Quelle: USGS 2015c

2 Quelle: berechnet aus Chromit, USGS 2015d

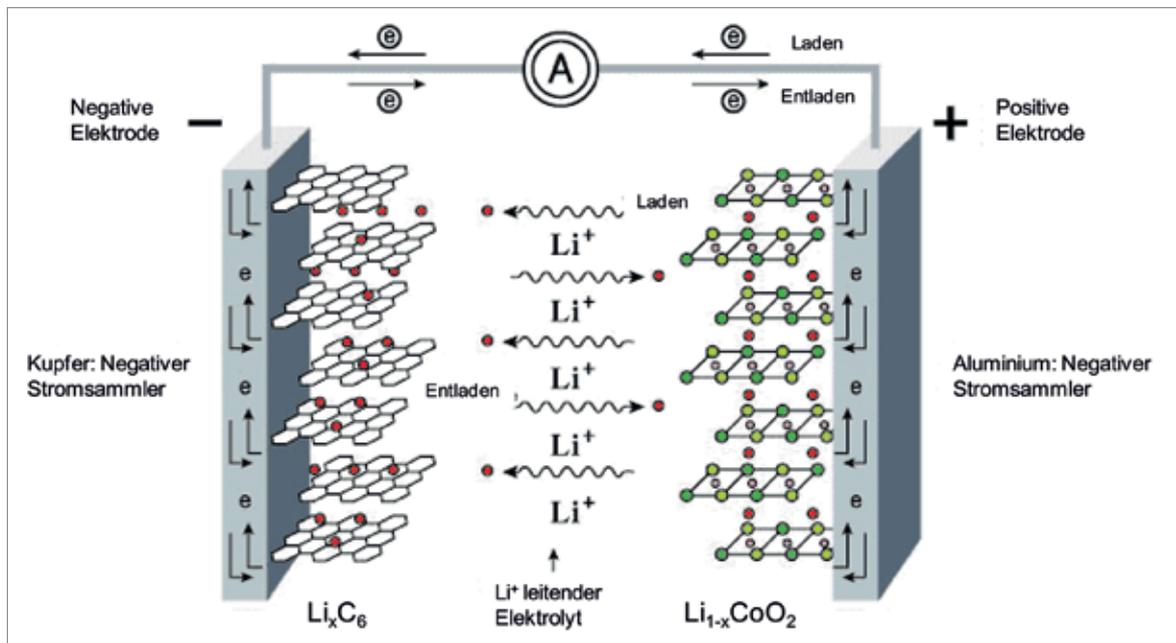


Abb. 4.64: Funktionsprinzip des Lithium-Ionen-Systems
(Quelle: FRAUNHOFER ICT)

auf die elektrische Leistung an, also die kurzzeitig verfügbare Arbeitsstromstärke.

Eine Renaissance erlebt zurzeit der elektrische Antrieb für Fahrzeuge. Im Markt sind gegenwärtig Hybridfahrzeuge und für den Stadtverkehr auch reine Elektrofahrzeuge. Das Entwicklungsziel von Elektrofahrzeugen ist ein Kompromiss zwischen Kapazität, die über die Reichweite der Fahrzeuge entscheidet, und Leistung, die das erreichbare Drehmoment und damit das Beschleunigungsverhalten des Fahrzeugs festlegt. Elektrisch angetriebene Fahrzeuge besitzen ein großes Zukunftspotenzial. Die Übergangszeit bis zur kommerziellen Bereitstellung leistungsfähiger und dauerhafter mobiler Brennstoffzellen werden Hybridfahrzeuge und batteriegetriebene Elektrofahrzeuge überbrücken. Beide benötigen leistungsfähige elektrische Akkumulatoren. Auch Brennstoffzellenfahrzeuge nutzen Akkumulatoren für den Antrieb, um die dynamische Trägheit der Brennstoffzelle auszugleichen und zur Rückgewinnung von Bremsenergie.

Das aus heutiger Sicht aussichtsreichste Batteriesystem zur Erfüllung dieser Anforderungen ist die Lithium-Ionen-Zelle. In diesem System besteht die positive Elektrode, sie wird bei wiederaufladbaren Batterien als Kathode bezeichnet, aus einem Metalloxid, in das reversibel Lithium-Ionen ein-

gelagert werden können. Als negative Elektrode (Anode) wird Graphit genutzt, der ebenfalls reversibel Lithium-Ionen aufzunehmen vermag. Pro 6 Kohlenstoffatome lässt sich gegenwärtig 1 Lithiumatom einlagern (LiC_6). Beim Entladen gibt der Graphit eingelagerte Lithium-Ionen ab, die dann durch einen wasserfreien Lithium-leitenden organischen Elektrolyt zur positiven Elektrode wandern und dort in das Gitter des Metalloxids reversibel eingelagert werden. Beim Laden kehrt sich der Vorgang um (Abb. 4.64). Bei jedem Lade- und Entladevorgang werden abhängig vom Kathodensystem 50–90 % des Lithiums ausgetauscht (DÖRING 2008, FRAUNHOFER ICT 2007).

Je nach Anforderungen an die Kapazität bzw. die verfügbare Stromstärke werden unterschiedliche Metalloxide genutzt (CDI 2008). Für eine hohe Kapazität in kleinen Lithium-Ionenbatterien werden Kobaltkathoden in Form von LiCoO_2 bevorzugt. Die für die Elektromobilität im Allgemeinen wichtigsten Li-Ionen-Technologien, die sich vor allem hinsichtlich ihres Kathodenmaterials voneinander unterscheiden sind (IVERS-TIFFÉE 2012):

- die Lithium-Eisen-Phosphat-Batterie (LFP),
- die Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid-Batterie (NMC),

Tab. 4.56: Leistungsmerkmale von Lithium-Ionen-Akkumulatoren

| Abkürzung | LCO | LMO | NMC (Schicht) | NCA | LFP |
|---|------------------|---------------------------|--|--|-------------------|
| Chemische Bezeichnung | LiCoO_2 | LiMn_2O_4 | $\text{Li}[\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}]\text{O}_2$ | $\text{Li}[\text{Ni}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}]\text{O}_2$ | LiFePO_4 |
| Mittlere Zellspannung bezogen auf C-Anode [V] | 3,6 | 4,1 | 3,8 | 3,8 | 3,45 |
| Spezifische Energie/Zelle [Wh/kg] | 177 | 94 | 135 | 132 | 113 |
| Ladungstransport | 50 % | 80 % | 66 % | 70 % | 95 |

- die Lithium-Nickel-Aluminium-Kobaltoxid-Batterie (NCA) und
- die Lithium-Mangan-Oxid-Batterie (LMO).

Die Leistungsfähigkeit der Lithium-Ionen-Systeme sind noch nicht ausgereizt und die Forschung und Technologieentwicklung noch stark im Fluss. Welches Lithiumsystem sich für Elektrofahrzeuge durchsetzen wird, ist noch nicht absehbar. Die Anforderungen hoher Energiedichte, um bei geringem Akkugewicht eine große Fahrzeugreichweite zu erreichen, konfliktieren noch mit der Anforderung nach kurzen Ladezeiten. Die Energiedichte spricht für das Kobaltsystem. Kobaltzellen weisen einen großen Innenwiderstand auf. Deshalb muss der Ladestrom begrenzt werden, um eine übermäßige Wärmeentwicklung zu vermeiden, welche die Zelle zerstören würde. Die Mangan- und Phosphatsysteme besitzen einen geringeren Innenwiderstand, allerdings auch eine geringere Energiedichte (DAMBROWSKI 2013, vergleiche Tab. 4.56). Die Spalte „Ladungstransport“ gibt an, welcher Anteil der Lithiummenge im Akku beim Laden und Entladen am Ladungsaustausch zwischen den Elektroden beteiligt ist.

4.23.2 Rohstoffinhalt

Lithium-Ionen-Akkumulatoren enthalten die oben erwähnten Metalloxide als Kathoden, in der Regel Kohlenstoff (Graphit) in der Anode (teilweise wird auch Lithiumtitanat, LTO, $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ eingesetzt), Lithium, das den Elektrizitätstransport im Zellinneren in Form von Ionen zwischen den Elektroden im Inneren der Batterie bewerkstelligt, ein wasserfreies organisches Lösemittel, das mit Leitsalzen

versetzt ist und weitere Stoffe, die zum Teil von den Herstellern als Betriebsgeheimnis gehütet werden.

Die spezifischen Mengen an Kathodenmetallen für Lithium-Ionenbatterien ist in Tab. 4.57 dargestellt. Die Literaturangaben zum Lithiumgehalt der Lithium-Ionenbatterien schwanken stark (ANGERER et al. 2009b). Sie reichen von 50 g Li/kWh (DGS 2008) über 90 g Li/kWh (MATHOY 2008) bis zu 300 g Li/kWh (THAIL 2006). Durch eine rechnerische Überprüfung der Elektrochemie und durch Anfragen bei zwei Forschungseinrichtungen, die mit der Batterieentwicklung bzw. -anwendung arbeiten, ergaben in guter Übereinstimmung die in Tab. 4.58 zusammengestellten Werte (ANGERER et al. 2009a). Die angegebenen Werte schließen eine gewisse Ladungsträgerreserve ein, um die aufgedruckte Kapazitätsangabe sicher einzuhalten. Die Spalte „Ladungstransport“ gibt an, welcher Anteil der Lithiummenge im Akku beim Laden und Entladen am Ladungsaustausch zwischen den Elektroden beteiligt ist.

Tab. 4.57: Spezifische Metallmengen in Batteriekathoden (NOVINSKY 2014, BRUNOT, CHARREYRON 2013)

| Kathodenmaterial | Kobalt g/Wh | Nickel g/Wh | Mangan g/Wh |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|
| LFP | – | – | – |
| NMC | 0,293 | 0,289 | 0,270 |
| NCA | 0,124 | 0,659 | – |
| LMO | – | – | 0,610 |
| Andere (u. a. NiMH) | | 0,5 | |

Tab. 4.58: Lithiumgehalt von Li-Ionen-Akkusystemen

| Kathodensystem | Ladungstransport [%] | Lithium-Gehalt [g Li/kWh] |
|-------------------------------|----------------------|---------------------------|
| Kobaltoxid, Kobalt-Mischoxide | 50 | 180 |
| Eisenphosphat | 90 | 120 |

4.23.3 Foresight industrielle Nutzung

Im Jahre 2013 wurden 65,5 Millionen PKWs produziert (OICA 2014), davon waren nur ca. 0,2 % Elektrofahrzeuge (IEA 2013b). Für die Entwicklung des PKW-Markts wurden die drei Szenarien des am Fraunhofer ISI erstellten Global Mobility Model GLOMO (KÜHN et al. 2014, SCHADE et al. 2012) übernommen, welche bereits in Kapitel 4.1 beschrieben wurden.

Es wurde schon erwähnt, dass Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Lithium-Ionenbatterien noch stark im Fluss sind und deshalb künftig mit einer weiteren Steigerung der Leistungsfähigkeit zu rechnen ist. Aufgrund der Leistungsmerkmale des Lithiumsystems entfaltet ihre Marktentwicklung eine erhebliche Dynamik. Sie wird getragen von der künftigen Nutzung mobiler elektronischer Geräte wie Laptops, Mobiltelefonen, Navigationssysteme etc., aber insbesondere von der Marktentwicklung bei den Hybrid- und Elektrofahrzeugen.

4.23.4 Foresight Rohstoffbedarf

Zur Berechnung des zukünftigen Rohstoffbedarfs der verschiedenen Lithium-Ionenbatterien werden die zukünftigen Anteile der Kathodentypen abgeschätzt, wie in Tab. 4.59 dargestellt (NOVINSKY 2014). Auch die Batteriegröße, die von der Antriebsart und von der Fahrzeugklasse abhängt, wird der Literatur entnommen (vergleiche Tab. 4.60).

Aus diesen Daten lässt sich eine grobe Abschätzung des Rohstoffbedarfs für die verschiedenen Szenarien durchführen (vergleiche Tab. 4.61). Dabei wurde unterstellt, dass durch zunehmende

Tab. 4.59: Abschätzung der Anteile der Kathodenmaterialien, die in den verschiedenen Fahrzeugtypen eingesetzt werden (Quelle: NOVINSKY 2014)

| Kathodenmaterial | Hybrid | PHEV | BEV |
|------------------|------------|------|------|
| LFP | 25 (30 %) | 15 % | 10 % |
| NMC | 35 % | 40 % | 45 % |
| NCA | 25 % | 20 % | 20 % |
| LMO | 5 % | 25 % | 25 % |
| NiMH | 10 % (5 %) | 0 % | 0 % |

Tab. 4.60: Batteriegrößen nach Antriebstechnologie und Größensegment in kWh. (Quelle: NOVINSKY 2014, PLÖTZ et al. 2013, ADAC 2013)

| Fahrzeuggruppe | Hybrid | PHEV | BEV | FVEC |
|-------------------|------------|-----------|-----------|----------|
| Kleinwagen | 1,5 | 0 | 15 | 0 |
| Kompaktwagen | 1,5 | 10 | 20 | 0 |
| Mittelklasse | 1,5 | 13 | 34 | 0 |
| Oberklasse | 1,5 | 16 | 73 | 0 |
| Mittelwert | 1,5 | 15 | 25 | 0 |

Verbesserung der Elektroden der mittlere spezifische Lithiumgehalt bis 2035 auf 150 g Li/kWh sinkt. Der Verbrauch an Kobalt für das Jahr 2013 wurde (NOVINSKY 2014) entnommen und beinhaltet nur die Anwendung in PKW.

Die Schätzung des künftigen Kobaltbedarfs ist mit Unsicherheiten behaftet, weil mehrere Elektrodenmetalle als potenzielle Substitute in Frage kommen. Beim Szenario zur „Marktdurchdringung E-PKW“ erhöht sich der jährliche Verbrauch 2035 erheblich auf ca. 85 % der Produktion des Jahres 2013.

4.23.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Der abgeschätzte Rohstoffbedarf muss nicht notwendig aus geologischen Lagerstätten entnommen werden, wenn das Recycling gebrauchter

Tab. 4.61: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf für PKW-Lithium-Akkumulatoren in t

| Rohstoff | Weltproduktion 2013 | Verbrauch 2013 | Bedarfsvorschau 2035 | |
|----------|--------------------------------|----------------|-------------------------------|--------------------------|
| | | | Prävalenz konventioneller PKW | Marktdurchdringung E-PKW |
| Kobalt | 129.736 (B) 85.904 (R) | 1.200 | 3.125 | 110.000 |
| Nickel | 2.601.745 (B) 1.955.132 (R) | > 1 | 6.200 | 188.000 |
| Mangan | 16.900.000 ¹ | > 1 | 2.900 | 194.000 |
| Lithium | 29.759 (B) | 607 | 3.510 | 110.000 |

B: Bergwerksförderung

R: Raffinadeproduktion

¹ Quelle: USGS 2015c

Batterien ausgebaut wird. Heute sind die Recyclingkapazitäten für Lithium-Ionen-Akkumulatoren noch unbedeutend. In der Europäischen Union wurden aber schon 2003 knapp 8 % des mit wiederaufladbaren Batterien vermarkteten Kobalts durch Recycling zurückgewonnen (CDI 2004). Gesetzgeberische Initiativen wie die Europäische Batterierichtlinie 2006/66/EC, die WEEE Richtlinie 2012/19/EU, die RoHS Richtlinie 2011/65/EU u. a. werden mittelfristig zum Ausbau des Recyclings führen.

Die zurzeit weltweit einzige großtechnische Recyclinganlage für Sekundärbatterien betreibt Umicore im belgischen Hoboken (UMICORE 2013). Die Recyclingkapazität beträgt 7.000 t/a für Batterien, verwertet werden zurzeit aber nur ca. 4.000 t in Kampagnen für Lithiumionen- und NiMH-Batterien.

Hierbei werden Ni, Co, Mn und andere wertvolle Metalle zurückgewonnen (ELWERT et al. 2012).

Daneben gibt es verschiedene Pilotverfahren und Forschungsvorhaben, bei denen Lithium-Ionenbatterien zuerst mechanisch und dann pyro- und/oder hydrometallurgisch bearbeitet werden. Einige deutsche Forschungsprojekte sind in Tab. 4.62 dargestellt (NÜSSLE, WISSEL-STOLL 2010).

4.24 Redox-Flow-Speicher

4.24.1 Technologiebeschreibung

Redox-Flow-Batterien (RFB) wurden in den 1970er Jahren entwickelt. Sie speichern elek-

Tab. 4.62: Deutsche Forschungsprojekte zu Recyclingverfahren für Lithium-Ionenbatterien

| Projektart/ Recycling | Unternehmen | Fördermittel Metalle | Metalle | Zusatzinformationen |
|---|--|----------------------|------------|---|
| Recycling von Lithium-Ionen-Batterien | Audi, Chemetall, Evonik Litarion GmbH, TU Braunschweig u. a. | 8,4 Mio. € | Co, Ni, Li | LithoRec Projekt/ BMUB |
| Recycling-Prozessentwicklung für Co-basierte Li-Bs aus EVs | Accurec Recycling, Universität RWTH Aachen | 0,6 Mio. € | Co, Ni | Li BMBF/PTJ eingeschränkt auf Co-basierte Batterien |
| Recyclingkonzept für die Hochleistungsbatterien zukünftiger EVs | Umicore, Daimler, Öko-Institut Darmstadt, TU Clausthal | 1,6 Mio. € | Co, Ni, Li | BMUB-Projekt LIBRI |

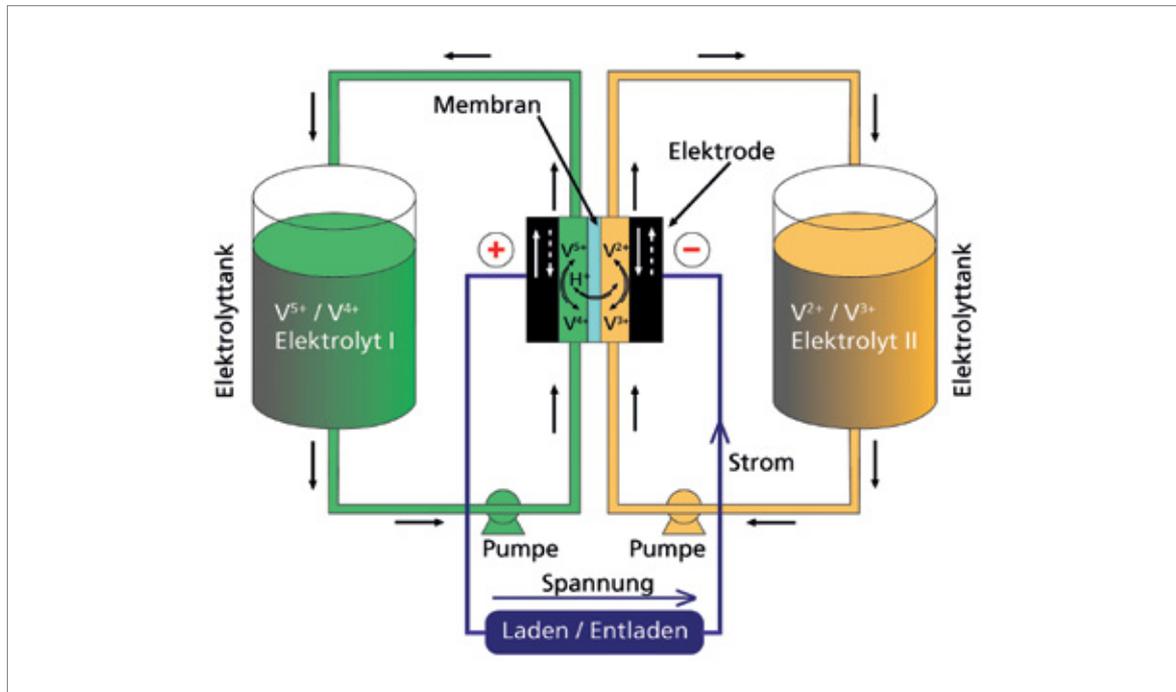


Abb. 4.65: Aufbau und Funktion einer Redox-Flow-Batterie
(Quelle: FRAUNHOFER UMSICHT)

trische Energie in Salzen und sind damit mit den Akkumulatoren verwandt. Im Unterschied zu den klassischen Akkumulatoren zirkulieren die zwei energiespeichernden Elektrolyte in zwei getrennten Kreisläufen, zwischen denen in der Zelle mittels einer Membran ein Elektronenaustausch ermöglicht wird (OERTEL 2008). Die energiespeichernden Elektrolyte werden außerhalb der Zelle in getrennten Tanks gelagert, wodurch die gespeicherte Energiemenge nicht von der Größe der zentralen Reaktionseinheit für den Lade- oder Entladeprozess abhängt (Abb. 4.65). Die Tanks können einfach und manuell befüllt und die Batterie damit geladen werden. Die Tankgröße bestimmt den Energieinhalt der Batterie (kWh), die Lade-/Entladeeinheit die Leistung (kW) der Batterie. Die zwei Parameter Leistung und Speicherkapazität können unabhängig voneinander skaliert werden. Dies ist bei konventionellen Batterien nicht möglich (WIETSCHEL et al. 2010). Da die Löslichkeit der Salze in den Elektrolyten typischerweise nicht sehr hoch ist, werden Energiedichten im Bereich der Bleibatterie erreicht (WIETSCHEL et al. 2010).

4.24.2 Rohstoffinhalt

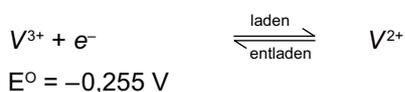
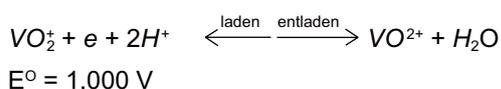
In den 1970er Jahren wurde das Eisen-Titan-System untersucht, später wurde Titan leistungssteigernd durch Chrom ersetzt, wobei sich dieses System u. a. wegen der kosten- und wartungsintensiven Membran nicht durchgesetzt hat. Von den verschiedenen einsetzbaren Salzsystemen haben sich Vanadium-Redox-Paare als eine besonders interessante Variante herausgestellt. Hauptgrund ist, dass Vanadium in vier verschiedenen Wertigkeiten vorliegen und damit in beiden Elektroden verwendet werden kann. Damit wird auch der sog. „Cross-over-Effekt“ (Verunreinigungen durch Übertreten von Ionen durch die Membran) verhindert, der bei anderen Systemen nach längeren Betriebszeiten zu irreversiblen Verlusten und zur Verunreinigung des Elektrolyten führte (GARCHE 2006). Darüber hinaus wurden in letzter Zeit die Systeme Vanadium-Bromid und Zink-Bromid weiterentwickelt. Einen Überblick über die verschiedenen Systeme gibt Tab. 4.63.

Vanadium-Redox-Batterien (VRB) sind bereits verschiedentlich stationär im Einsatz und von allen Redox-Flow-Batterien am weitesten verbreitet. Chemisch wird beim Entladen an der positiven Elektrode fünfwertiges Vanadium zu vierwertigem

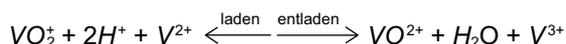
Tab. 4.63: Kennzahlen unterschiedlicher Redox-Flow-Batterien

| System | Eisen/ Chrom | Vanadium/ Vanadium | Vanadium/ Brom | Zink/ Brom |
|----------------------|-----------------|-----------------------|-------------------|---------------|
| Spannung [V] | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,8 |
| Kapazität [Ah/l] | 33,5 | 21,4 | 26,8 | 54,0 |
| Energiedichte [Wh/l] | 40,2 | 27,9 | 37,5 | 96,0 |

reduziert, an der negativen Elektrode wird zweiwertiges Vanadium zu dreiwertigem oxidiert:



Die Gesamtreaktion lautet dementsprechend:



Die elektrische Ausbeute dieser Systeme ist relativ hoch (ca. 90 %), unter Berücksichtigung der Verluste durch die dazugehörigen Aggregate werden (netto) 70 bis 80 % erreicht. Durch materialtechnische Verbesserungen, z. B. mit Elektroden aus Carbonfasern, deren feine Kanäle dem Elektrolyten weniger Widerstand bieten, und neue Membranen, könnten zukünftig Nettowirkungsgrade nahe 90 % möglich sein (INT 2006).

4.24.3 Foresight industrielle Nutzung

Das Vanadium/Vanadium System ist inzwischen marktreif. Ein Hauptideengeber ist dabei nach wie vor der ursprüngliche Entwickler dieses Systems, die University of New South Wales (UNSW) in Sydney. Im Jahr 2005 wurde die Fima VFuel Pty Ltd. als Ausgründung der Universität gegründet, die zurzeit aber keine eigenen Anlagen mehr herstellt. Im Jahr 2015 wurde von der Fa. Gildemeister ein CellCube FB 30-130 mit 30 kW und einer Speicherkapazität von 130 kWh zu Forschungszwecken an der UNSW installiert.

Wichtige Anbieter sind die Firma „Gildemeister Energy Solutions“ (übernahm 2010 die österreichische Cellstrom GmbH), die chinesische „Prudent Energy Inc.“ (übernahm 2009 die VRB Power Sys-

tems Inc., Kanada), die „Cellenium Company Ltd.“ (Thailand) und die „Sumitomo Electric Industries“ (Japan).

Aktuell laufen auch in Deutschland verschiedene Projekte zur Nutzung von Vanadium-RFB:

- SmartRegion Pellworm: In diesem BMWi geförderten Projekt sollen Li-Ionen Batterien (0,5 MWh Speicherkapazität) in Kombination mit einer Redox-Flow-Batterie vom Typ CellCube 200-1600 (speichert 1,6 MWh bei 200 kW Leistung) erneuerbare Energien speichern. Dabei soll ein optimaler Mix aus Erneuerbaren Energien, zentralen Groß- und dezentralen Kleinspeichern gefunden werden (GILDEMEISTER 2013).
- Braderup: In diesem Projekt der Robert Bosch GmbH und des Bürgerwindparks Braderup-Tinningstedt wird ein Windpark mit sechs Mühlen mit einem hybriden Speicher verbunden. Dieser wurde 2014 installiert und besteht aus Lithium-Ionenbatterien von Sony (mit einer Kapazität von 2 MWh und einer Leistung von 2 MW) und aus einer Redox-Flow-Batterie (1,3 MWh/0,3 MW) der Vanadis Power GmbH (BOSCH 2014).
- RedoxWind: Das Fraunhofer ICT entwickelt einen Redox-Flow-Großbatteriespeicher (2 MW/20 MWh), der direkt an den Gleichspannungszwischenkreis einer Windkraftanlage gekoppelt wird: Einheit aus Erzeugungsanlage und Batteriespeicher als Pilotanlage (FRAUNHOFER ICT 2015).

Derzeit sind weniger als 1 GWh Speicherkapazität in Redox-Flow-Batterien weltweit installiert. Die Vanadium-Redox-Batterien arbeiten automatisch und weitgehend wartungsfrei. So ist beispielsweise die Anlage der „Smartregion Pellworm“ für eine Betriebsdauer von 25 Jahren ausgelegt.

Tab. 4.64: Vergleich der Rohstoffbedarfe für Redox-Flow-Batterien

| System | Eisen/ Chrom | | Vanadium/ Brom | | Zink/ Brom | | Vanadium/ Vanadium |
|---|-----------------|--------|-------------------|-----------------|---------------|------|-----------------------|
| | Fe | Cr | V ³⁺ | V ⁴⁺ | Zn | Zn | V |
| Benötigte Stoffmenge [kg/kWh] | 3,47 | 3,23 | 1,36 | 1,36 | 0,34 | 1,02 | 2,92 |
| Kumulierter Rohstoffbedarf für 220 GWh [1000 t] | 760 | 710 | 600 | | 300 | | 640 |
| Rohstoffbedarf pro Jahr (lineare Aufteilung) [1000 t] | 38 | 35 | 30 | | 15 | | 32 |
| Weltweite Produktion 2013 [1000 t] | 1.180.000 | 28.800 | 79 | | 13.300 | | 79 |

4.24.4 Foresight Rohstoffbedarf

Wird unterstellt, dass weltweit bis zum Jahre 2035 ca. 220 GWh Speicherkapazität als Redox-Flow-Batterien gebaut werden (das entspricht der heutigen Speicherkapazität durch Pumpspeicherwerke u. a. in Deutschland), dann ergeben sich die in Tab. 4.64 dargestellten stöchiometrischen Rohstoffbedarfe.

Sollten die gesamten 220 GWh als VRB gebaut werden, lässt sich ein kumulierter Vanadiumbedarf für Redox-Flow-Stromspeicher von 640.000 t im Jahr 2035 hochrechnen (Tab. 4.64). Zur Berechnung des jährlichen Bedarfs wird ein linearer Aufbau der Speicher bis zum Jahre 2035 unterstellt, woraus sich ein Bedarf von ca. 32.000 t im Jahr 2035 ergibt (Tab. 4.65). Dies entspricht ca. 40 % der gesamten globalen Vanadiumproduktion im Jahr 2013. Bei der Nutzung von Redox-Flow Stromspeichern sind beträchtliche Impulse auf die Vanadiumnachfrage zu erwarten.

Tab. 4.65: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf für Vanadium-Redox-Batterien in t

| Rohstoff | Produktion 2013 (Bergwerksförderung) | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|----------|--------------------------------------|-------------|----------------------|
| Vanadium | 77.573 | 3.000 | 32.000 |

4.24.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Die Metalle in den Lösungen der Redox-Flow-Batterien verändern sich nicht und können vollständig recycelt werden.

4.25 Vakuumisolation

4.25.1 Technologiebeschreibung

Wärmeübertragung und Vakuumisolation

Wärmeübertragung erfolgt durch die drei Mechanismen Wärmeströmung, Wärmeleitung und Wärmestrahlung, wobei der Anteil der drei Mechanismen in den meisten alltagstypischen Systemen vom erstgenannten zum letztgenannten abnimmt. Ein ideales Vakuum verhindert die Wärmeübertragung durch Wärmeströmung und Wärmeleitung. Lediglich die weniger bedeutsame Wärmestrahlung findet auch im idealen Vakuum statt. Ein technisch erzeugtes Vakuum befindet sich jedoch immer in einem Gefäß, welches selbst Wärmeübertragung durch Wärmeleitung verursacht.

Bereits eine relativ geringe Druckreduzierung („Grobvakuum“ oder „ruhendes Gas“) unterbindet Wärmeströmung, die immer an Materieströmung gebunden ist. Genutzt wird dies z. B. in Stahlmantelrohren von Fernwärmeleitungen. Konventionelle Gebäudedämmstoffe verhindern Wärmeströmung durch ihre poröse Struktur. In diesen herkömmli-

chen Dämmstoffen setzt sich der Wärmetransport aus ca. 65–75 % Wärmeleitung über das eingeschlossene Gasvolumen, 5–10 % Wärmeleitung über das Gerüstmaterial und 20–30 % Wärmestrahlung zusammen (ANGERER et al. 2009).

Zusätzlich wird die Wärmeleitung eines Gases unterbunden, wenn der Druck soweit reduziert wird bzw. das Vakuum ausreichend ist, damit annähernd keine Wechselwirkungen zwischen einzelnen Gasatomen auftreten. Ein solch starker Unterdruck („echtes“/„gutes“ Vakuum) muss gegen den äußerlich herrschenden Luftdruck stabilisiert werden. Einfach realisieren lässt sich das für rotationssymmetrische Behälter, die geometrisch bedingt stabil sind. So ist die Vakuumisolation z. B. bei Thermoisolierkannen und Dewargefäßen seit Langem etabliert.

Die Übertragung der Vakuumisolationstechnologie auf flache Bauelemente macht eine zusätzliche Stabilisierung erforderlich (HEINEMANN et al. 2011). Bei Wanddämmelementen, so genannten Vakuumisulationspaneelen (VIP), wird dies in der Regel durch einen porösen Stützkern gewährleistet. Glasfenster, so genannte Vakuumisulationsgläser (VIG), werden durch transparente Stützen gegen den Außendruck stabilisiert. VIP- und VIG-Technologien können in der Kühltechnik zum Einsatz kommen, haben aber insbesondere das Potenzial, neue Möglichkeiten im Bereich der Gebäudedämmung zu eröffnen.

Vakuumisulationspaneele (VIP) in der Gebäudedämmung

Gegenüber herkömmlichen Gebäudedämmstoffen (z. B. Polystyrol, Polyurethan, Glas- oder Mineralwolle, Zellulose, Stärke) mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von $U = 0,030 - 0,040 \text{ W/(m K)}$ dämmen Vakuumisulationspaneele 5–10-mal besser ($U = 0,004 - 0,008 \text{ W/(m K)}$) (EnOB 2015). Um die gleiche Dämmwirkung zu erzielen, können Vakuumisulationspaneele also wesentlich dünner gestaltet werden. Die Stabilisierung durch einen inneren Stützkern ermöglicht zudem verschiedenste Formen der Dämmelemente.

Die VIP-Technologie ist derzeit aber auch mit einigen Nachteilen verbunden. Bisher sind die Vakuumisulationspaneele zwar wesentlich dünner, aber auch deutlich teurer als herkömmliche Wärme-

dämmsysteme mit vergleichbarer Wärmeübertragung (BSB 2013). Außerdem können die Paneele nicht vor Ort zugeschnitten und angepasst werden und erfordern somit einen erhöhten Planungsaufwand. Auch nach guter Planung erfordert die Handhabung und Montage von Vakuumisulationspaneelen eine besondere Sorgfalt, da Schäden an der Hülle zum Verlust des Vakuums und somit auch der hervorragenden Dämmwirkung führen (EnOB 2011). Auch mögliche Wechselwirkungen mit anderen Fassadenmaterialien (z. B. alkalischen Bindemitteln) müssen beim Einbau berücksichtigt werden (IFT ROSENHEIM 2014). Daneben wirken sich Wärmebrücken bei VIP-Dämmungen aufgrund der geringeren Dämmelementdicken stärker auf die Gesamtisolation aus und müssen unbedingt vermieden werden (EnOB 2011).

Bei einwandfreiem Einbau verringert sich die Dämmwirkung kommerziell erhältlicher VIP in den ersten zehn Jahren allerdings nicht messbar, so dass davon ausgegangen werden kann, dass über die im Baubereich üblichen Lebensdauern von ca. 50 Jahren gute Dämmeigenschaften erhalten bleiben (EnOB 2011). Außerdem können VIP so eingebaut werden, dass das Vakuum jederzeit gemessen und defekte Paneele einzeln ausgetauscht werden können.

Aufgrund der aufgeführten Vor- und Nachteile eignen sich VIP beim derzeitigen Stand der Technik v. a. für folgende Anwendungen (s. Abb. 4.66):

- Die Sanierung von Bestandsgebäuden (Altbau), insbesondere wenn denkmalgeschützte Strukturen erhalten werden sollen, kein Platz für dickere Wände ist (z. B. bei Reihenhäusern, Gebäuden an öffentlichen Gehwegen oder niedrigen Decken) oder teure Zusatzarbeiten eingespart werden können (z. B. das Versetzen von Tür- und Fensterstürzen),
- Die Dämmung von mehrstöckigen Häusern in Regionen mit hohen Grundstückspreisen (z. B. Ballungsräumen/Innenstädten),
- Die Dämmung von sehr kleinen oder ungünstig geschnittenen Gebäuden/Grundstücken,
- Die Dämmung von Passivhäusern und Ultra-Energiesparhäusern (der Nullenergiestandard, der 2020 in der EU eingeführt werden soll, würde bei konventioneller Dämmung 40 cm dicke Wände erfordern (HEINEMANN et al. 2011)),

- Die Verwirklichung spezieller architektonischer Gestaltungsideen.

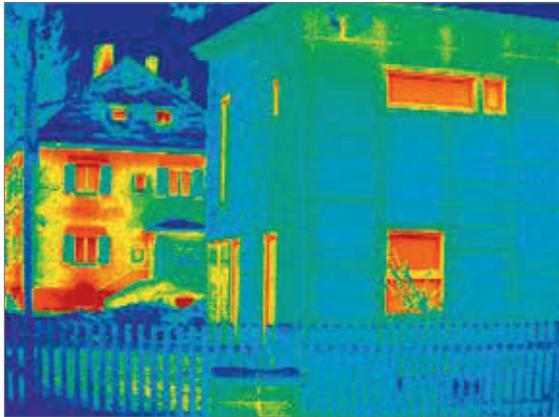


Abb. 4.66: Thermografie-Aufnahme eines mit VIP-gedämmten Hauses (Vordergrund) im Vergleich zum Nachbargebäude (Quelle: ZAE Bayern 2011)

Vakuumisolationspaneele (VIP): Geeignete Materialien

Vakuumisolationspaneele für die Dämmung von Gebäuden bestehen in der Regel aus einem Stützkern umgeben von einer vakuumdichten Hülle. Zusätzlich kann ein Getter an der Innenoberfläche der Hülle eindringende Gasmoleküle chemisch binden und so einem allmählichen Verlust des Vakuums entgegenwirken (ANGERER et al. 2009).

Für ein geeignetes Stützkernmaterial gelten folgende Anforderungen (HEINEMANN et al. 2011):

- Hohe Druckstabilität: Zum einen muss der Stützkern das Vakuum gegen den äußerlich einwirkenden Luftdruck stützen, zum anderen müssen VIP bei geringerer Dicke die gleichen mechanischen Drücke wie herkömmliche Dämmsysteme aushalten.
- Geringe Wärmeleitfähigkeit und hohe Abschirmung von Wärmestrahlung: Beides reduziert die insgesamt übertragene Wärme.
- Feine Porosität: Feinporige Stützkernmaterialien verringern Wechselwirkungen von Gasteilchen und somit deren Wärmeleitung. Daher gilt: Je feiner die Poren sind, desto geringer sind die Anforderungen an das Vakuum bzw. die Dichtigkeit der Hülle.

Als mögliche Stützkernmaterialien kommen daher Polymerschäume (Polysterol oder Polyurethan), Glasfasern, Aerogele sowie Pulver und Presslinge aus pyrogener Kieselsäure in Betracht (HEINEMANN et al. 2011). Am weitesten verbreitet sind Stützkernmaterialien aus pyrogener Kieselsäure. Dank Porendurchmessern von weniger als 200 Nanometern stellen sie geringe Anforderungen an das Vakuum und somit an das Hüllenmaterial. Schon bei einem so genannten Grobvakuum von 10 mbar können Wärmeleitfähigkeiten von ca. 0,004 W/(m K) erreicht werden. Pyrogene Kieselsäuren können außerdem geringe Mengen Wasserdampf aufnehmen und so einem allmählichen Nachlassen des Vakuums entgegenwirken. Darüber hinaus haben pyrogene Kieselsäuren eine geringe Wärmeleitfähigkeit und lassen sich leicht verarbeiten und zu Platten pressen. Chemisch betrachtet sind Kieselsäuren amorphes, durch pyrogene Verfahren hergestelltes Siliziumdioxid (VINCENTZ 2001). Sie fallen als Randprodukt bei der Produktion von Siliziumwafern an. Nachteilig ist der hohe Preis der pyrogenen Kieselsäuren, der sich wesentlich auf den Gesamtpreis der VIP auswirkt (HEINEMANN et al. 2011).

Durch die in VIP insgesamt sehr geringe Wärmeübertragung gewinnt die Wärmestrahlung an Bedeutung. Sie kann durch Beimischen von absorbierenden Komponenten wie Ruß, Eisenoxid oder Siliziumcarbid verringert werden.

Für ein geeignetes Hüllenmaterial eines Vakuumisolationspaneels sind folgende Kriterien zu optimieren (HEINEMANN et al. 2011):

- Hohe Dichtigkeit: Um eine für Gebäudebauteile übliche Lebensdauer von ca. 50 Jahren zu gewährleisten, muss die Hülle gasdicht sein, um das Eindringen von Luft und Wasserdampf in das Vakuum zu verhindern. Je dichter die Hülle ist, desto geringer sind die Anforderungen an die Porosität des Stützkerns.
- Geringe Wärmeleitfähigkeit: Insbesondere müssen Wärmebrücken im Randbereich vermieden werden, die aufgrund der geringeren Dicke der VIP großen Einfluss auf die Gesamtisolation haben.
- Hohe Durchstoßfestigkeit: Während der Montage müssen Vakuumisolationspaneele einer starken mechanischen Beanspruchung standhalten.

Bei so genannten Vakuumisolationssandwichs (VIS) kommen Edelstahlfolien oder -bleche als Hüllenmaterial zum Einsatz, welche allerdings selbst eine hohe Wärmeleitfähigkeit besitzen und sich somit negativ auf die Dämmwirkung, insbesondere in Bezug auf Wärmebrücken auswirken. Auch Aluminiumverbundfolien als Hüllenmaterial von Vakuumisulationspaneelen begünstigen Wärmebrücken. Eine gängige Alternative sind daher mehrfach aluminiumbedampfte Kunststoffhochbarrierelamine, bei denen das Aluminium so dünn aufgedampft wird, dass es keinen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit hat (HEINEMANN et al. 2011). Allerdings sind diese Lamine sehr teuer und tragen wesentlich zum hohen Gesamtpreis der VIP bei. Daher wurden neue Kunststoffhochbarrierelamine entwickelt, die zusätzlich eine Ormocer-Schicht enthalten, aber weniger oft mit Aluminium bedampft werden und somit preisgünstiger sind (OEBBEKE 2011). Ormocere sind anorganisch-organische Hybridpolymere (ISC 2015).

Verschiedene Varianten der Vakuumisulationspaneel sind erhältlich. Ungeschützte VIP sind am empfindlichsten gegen Montagefehler, sie sind allerdings auch am leichtesten auszutauschen. Eine Kaschierung, z. B. mit einer Hülle aus Glasfasergewebe, verleiht den VIP eine erhöhte Stabilität. Am leichtesten handhabbar sind bereits in Fertigbauteilen integrierte VIP, deren Vakuum allerdings später nicht mehr kontrolliert werden kann (HEINEMANN et al. 2011).

Vakuumisulationsglas (VIG) in der Gebäudedämmung

Fenster stellen generell eine Schwachstelle in der Gebäudedämmung dar. Gegenüber der in Deutschland üblichen Zweischeibenverglasung mit Edelgasfüllung hat ein Vakuumisulationsglasfenster im Zweischeibenaufbau mit einem Wärmeübertragungskoeffizienten von $U = 0,5 \text{ W/(m K)}$ eine zwei- bis dreifach bessere Dämmwirkung. Die ebenfalls relativ neue Dreifachverglasung mit Edelgasfüllung hat einen vergleichbaren Wärmeübertragungskoeffizienten von $U = 0,5 - 0,7 \text{ W/(m K)}$. Ihr Gewicht führt allerdings zu Problemen in der Handhabung, während das Gewicht der VIG dem der herkömmlichen Zweifachverglasung entspricht. Preislich soll die Vakuumisulationsverglasung langfristig konkurrenzfähig zur Dreifach-

verglasung sein (HEINEMANN et al. 2011, GLASER 2012).

Vakuumisulationsglas (VIG): Geeignete Materialien

Um das innere Vakuum (1 Mikrobar) gegen den Außendruck (1 Bar) zu stabilisieren, bestehen Vakuumisulationsgläser aus einer speziellen Randkonstruktion und Stützen (Abb. 4.67). Der Vakuumraum zwischen den ca. 4 mm dicken Floatglasscheiben ist weniger als 1 mm breit und wird von den Stützen gehalten sowie von einem Metall-Glas-Verbund vakuumdicht und längenflexibel verschlossen. Auf einer der Scheiben befindet sich eine wärmereflektierende Schicht zur Reduktion der Wärmeübertragung durch Wärmestrahlung. Die Wärmestrahlung, die aufgrund der insgesamt geringen Wärmeübertragung bedeutsam wird, kann durch eine absorbierende Glasbeschichtung verringert werden. Auf dem Markt verfügbare Modelle, die in Japan und China konstruiert wurden, haben zudem ein Ventil im Sichtfeld. Derzeit in Europa entwickelte Modelle sollen im Vakuum hergestellt werden, um ein solches Ventil zu vermeiden.

Wichtige Kriterien für den Randverbund sind (HEINEMANN et al. 2011):

- Hohe Dichtigkeit: Das Verhindern des Eindringens von Gasmolekülen über die gesamte Lebensdauer hinweg ist bei VIG noch wichtiger, da sie im Gegensatz zu VIP keine Getter oder Stützkernmaterialien enthalten.
- Ausreichende Längenflexibilität: Der Temperaturunterschied zwischen Innen- und Außenscheibe kann durch die gute Dämmung so groß werden, dass Unterschiede in der Längenausdehnung der Scheiben bei starrem Glas zu mechanischen Spannungen führen.

Auf dem Markt verfügbare, asiatische Modelle haben einen starren Glaslotverbund. Dagegen wird bei derzeit in Europa entwickelten Varianten zum Ausgleich der mechanischen Spannungen eine dünne Metallfolie integriert, um eine Lebensdauer von mindestens 25 Jahren zu garantieren. Im Projekt Winsmart soll dafür Zinn verwendet werden (OEBBEKE 2014b). Im Projekt ProVIG wurden verschiedene bleifreie Lote sowie Silber als Lötbeschichtung getestet (GLASER 2012).

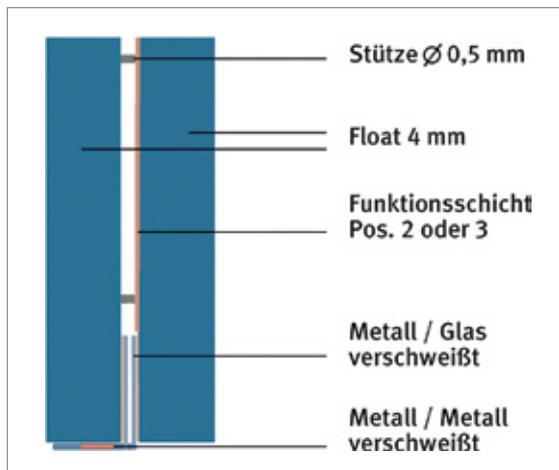


Abb. 4.67: Schematischer Aufbau einer Vakuumisolierverglasung (Quelle: ZAE Bayern 2011)

Für die Stützen gelten folgende Anforderungen:

- Hoher mechanischer Widerstand: Die Stützen sollen die Fensterkonstruktion gegen den Außendruck stabilisieren.
- Hohe Transparenz: Die Sichtverhältnisse sollten nicht merklich schlechter sein als bei herkömmlichen Fenstern.
- Geringe Wärmeleitfähigkeit: Die Gesamtwärmeübertragung muss niedrig gehalten werden.

Eine übliche Lösung sind Edelstahlzylinder mit einem Durchmesser von ca. 0,5 mm in einem Raster von 30 x 30 mm. Sie fallen nur vor kontrastarmem Hintergrund und bei einem Abstand

Tab. 4.66: Massenbestandteile ausgewählter Rohstoffe pro Quadratmeter eines Vakuum-Isolations-Paneels mit Kieselsäurekern. Die Angaben beziehen sich auf ein Paneel mit Kieselsäurekern der Stärke 20 mm (Quelle: ANGERER et al. 2009).

| Rohstoff | Masse [g] | Anteil am Gesamtgewicht [%] |
|------------------|-----------|-----------------------------|
| SiO ₂ | ca. 3.200 | ca. 80 |
| SiC | ca. 600 | ca. 15 |
| Al | ca. 0,5 | ca. 0,01 |
| Andere | ca. 200 | ca. 5 |

von weniger als einem Meter auf. Eine spezielle Oberflächenbeschichtung verhindert eine Blendung durch Reflektion von einfallendem Sonnenlicht (HEINEMANN et al. 2011).

4.25.2 Rohstoffinhalt

Vakuumisoliationspaneele

Der spezifische Rohstoffinhalt eines Quadratmeters VIP ist in Tab. 4.66 abgeschätzt.

Vakuumisoliationsglas

Fensterglas (so genanntes Flachglas) ist ein silikatisches Kalk-Natronglas und besteht hauptsächlich aus den Oxiden von Silizium (SiO₂, 71–75 %), Natrium (Na₂O, 12–16 %) und Calcium (CaO, 10–15 %), welche reichlich in der Erdkruste vorkommen. Die Verwendung der VIG-Technologie wird den Bedarf gegenüber konventioneller Zweifachverglasung nicht ändern bzw. gegenüber Dreifachverglasung um ein Drittel verringern.

Unter dem Aspekt der Rohstoffkritikalität interessant ist vor allem der Metallrandverbund, bei dem Zinn in bleifreien Loten und Silber in Lötbeschichtungen eingesetzt werden können (s. Kapitel 4.8). Da sich die Technologie noch in der Entwicklung befindet, können die Rohstoffgehalte allerdings nicht abgeschätzt werden.

4.25.3 Foresight industrielle Nutzung

Vakuumisoliationspaneele (VIP)

Laut Expertenmeinung und einer Studie (HENNING et al. 2013) werden VIP in Deutschland bis 2050 eher für Spezialanwendungen genutzt, für die Breitenanwendung jedoch nicht bedeutsam werden. Als wesentliches Hindernis bei der Etablierung auf dem Massenmarkt wird der hohe Preis gesehen (BSB 2013, HEINEMANN et al. 2011).

Global wird der allgemeinen Dämmstoffbranche (inklusive Kältetechnik) von 2013 bis 2018 eine jährliche durchschnittliche Wachstumsrate von 8,17 % prognostiziert (RESEARCH AND MARKETS 2014). Der Markt für Gebäudedämmmaterialien

soll von 2015 bis 2020 um jährlich 3,5 % zunehmen (MARKETS AND MARKETS 2015). Dabei werden Initiativen und strengere Gesetze zur Energieeffizienz als Wachstumsfaktor bzw. fehlendes Bewusstsein über Vorteile der Gebäudedämmung als global zu erschließendes Potenzial gesehen. Wesentliche Wachstumstreiber sind jedoch zunehmende Bauprojekte in Entwicklungsländern, insbesondere in den Ballungszentren Asiens (RESEARCH AND MARKETS 2014). Dort kann sich der Einsatz von Vakuumisulationspaneelen aufgrund hoher Grundstückspreise finanziell lohnen, so dass bereits Absatzzahlen von 1 Mio. m² verzeichnet wurden.

Vakuumisulationsverglasung (VIG)

In Japan hat die Vakuumisulationsverglasung bereits eine gewisse Verbreitung gefunden, weil die dort entwickelten VIG-Scheiben in die Rahmen der bislang üblichen Einfachverglasungen passen (HEINEMANN et al. 2011). In Deutschland sind asiatische VIG-Modelle vor allem als Spezialgläser für denkmalgeschützte Gebäude im Einsatz (OEBBEKE 2014a). Die Dreifachverglasung hat in Deutschland bereits einen Marktanteil von 60 % mit steigender Tendenz (OEBBEKE 2014b). Ein neu entwickelter, sehr gut isolierender Fensterrahmen wurde so konstruiert, dass er sowohl mit Dreifachverglasung als auch mit Vakuumisulationsverglasung kombiniert werden kann (GLASER 2012), was zeigt, dass beiden Technologien derzeit ein gewisses Potenzial eingeräumt wird.

Ob sich die derzeit entwickelten VIG-Modelle mit Metallrandverbund langfristig am globalen Markt etablieren können, wird davon abhängig sein, ob eine ausreichende Lebensdauer von mindestens 25 Jahren und ein zur Dreifachverglasung konkurrenzfähiger Preis erreicht werden können. In den USA ist eine Markteinführung dort entwickelter

VIG-Elemente für 2016 geplant (DOYLE 2013); in Deutschland und Europa wird diese frühestens 2016, nach Ende der derzeit laufenden Projekte Winsmart und ProVIG angegangen werden.

4.25.4 Foresight Rohstoffbedarf

Aufgrund der in Tab. 4.66 angegebenen verwendeten Materialien und deren Mengenanteilen ist anzunehmen, dass keine Rohstoffkritikalität von VIP-Elementen ausgehen wird. Da sich die VIG-Technologie noch in der Entwicklung befindet, ist es nicht möglich abzuschätzen, welche Bedarfe sich daraus an Silber und Zinn für bleifreie Lote ergeben werden (s. Tab. 4.67).

4.25.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

VIP

Pyrogene Kieselsäure eignet sich gut zum Recycling. Eine mögliche Hürde bei der Wiederverwendung ist die Trennung von Dämmstoff und Hülle. Die bei der Umhüllung verwendete Verbundfolie ist nicht direkt wieder verwendbar, jedoch sind Bestandteile teilweise rezyklierbar. Ungeschützte VIP eignen sich am besten zum Recyceln, in Fertigteilen verbaute VIP sind dagegen mit einem Mehraufwand verbunden.

Alternativen zu pyrogener Kieselsäure als Stützkernmaterial sind z. B. Kunststoffschäume, welche der pyrogenen Kieselsäure aber aufgrund ihrer größeren Poren im Bereich Druckfestigkeit und Behinderung der Wärmeleitung unterlegen sind.

Grundsätzlich sind VIP wegen ihrer geringeren Dicke materialeffizienter als andere Dämmstoffe.

Tab. 4.67: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf für VIP und VIG in t

| Rohstoff | Produktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|-----------|----------------------------|-------------|----------------------|
| Aluminium | 47.811.880 (R) | gering | gering |
| Zinn | 289.790 (B) 362.996 (R) | 0 | ? |
| Silber | 26.241 (B) | 0 | ? |

B: Bergwerksförderung

R: Raffinadeproduktion

Allerdings sind sie mit einem aufwendigeren Herstellungsprozess verbunden.

VIG

Entscheidend für das Recycling der für den Randverbund eingesetzten Metalle wird sein, inwiefern sich diese abtrennen und sammeln lassen.

4.26 Induktive Übertragung elektrischer Energie

4.26.1 Technologiebeschreibung

Die Übertragung elektrischer Energie erfolgt heute im Normalfall über Kabel. Diese konduktive Energieübertragung kann über eine fest verdrahtete Verbindung, wie bei einem Backofen, über ein Kabel mit Stecker, wie beim Kühlschranks, oder über Kontakte, wie bei Elektrowerkzeugen, hergestellt werden. Aber auch ohne Kabel ist es möglich, elektrische Energie zu übertragen, sei es elektromagnetisch, optisch, kapazitiv oder induktiv. Elektromagnetisch und optisch können nur kleine Leistungen ausgetauscht werden. Elektromagnetische Wellen werden beispielsweise genutzt, um Daten zwischen einem RFID-Transponder und dem Lesegerät auszutauschen. Die kapazitive Übertragung ist energetisch ineffizient, weil sie mit hohen Streuverlusten behaftet ist. Sie wird zur

Datenübertragung genutzt. Die induktive Übertragung ist unter den berührungslosen Verfahren die Methode der Wahl für den Transfer mittlerer und hoher elektrischer Leistung. Die Technik besitzt ein breites Einsatzspektrum.

Die berührungslose Übertragung elektrischer Energie beruht auf dem physikalischen Prinzip der elektromagnetischen Induktion, das 1831 von Michael Faraday entdeckt wurde: Wird eine Schleife aus elektrisch leitendem Material durch ein Magnetfeld mit dem Fluss Φ bewegt, wird in der Leiterschleife die Spannung V induziert, die an den offenen Enden gemessen werden kann. Die induzierte Spannung ist der zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses proportional.

Dabei ist es unerheblich, ob sich der magnetische Fluss in einer ruhenden Schleife zeitlich ändert, oder die Schleife durch ein ortsfestes Magnetfeld bewegt wird. Wird an die Enden der Leiterschleife ein Verbraucher mit dem ohmschen Widerstand R angeschlossen, fließt der Strom $I = V/R$.

1820 erkannte Hans Christian Ørstedt, dass um einen stromdurchflossenen Leiter ein Magnetfeld entsteht. Wird der Draht, wie in Abb. 4.68 gezeigt, zu einer Spule geformt, entsteht bei Stromfluss ein rotationssymmetrisches magnetisches Feld um die Spulenchse. Auf der Kombination dieses Phänomens mit dem Faradayschen Induktionsprinzip basiert die induktive Energieübertragung. Eine stromdurchflossene Primärspule erzeugt ein

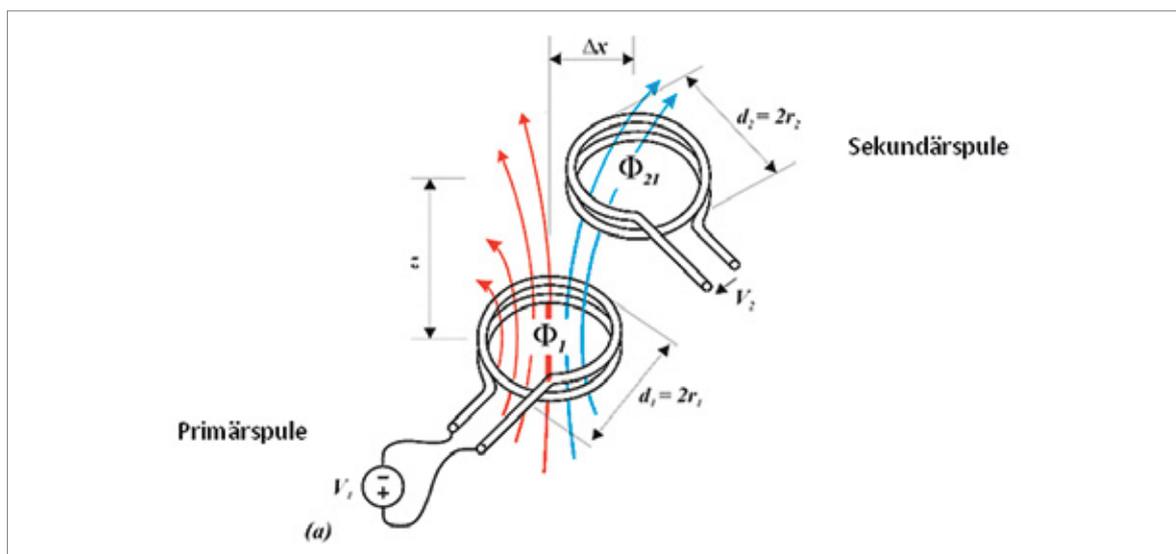


Abb. 4.68: Induktionsprinzip (Quelle: eigene Darstellung nach WAMBSGANSS & PARSPOUR 2010)

magnetisches Wechselfeld. Treten Teile des primären Magnetfelds durch eine zweite Spule aus elektrisch leitendem Material, wird in dieser Sekundärspule eine elektrische Spannung induziert.

Beim Anschluss eines Verbrauchers an die Sekundärspule mit dem ohmschen Widerstand R_2 fließt der Strom $I_2 = V_2/R_2$ und es wird die Leistung $P_2 = I_2 \cdot V_2$ übertragen. Die energetische Güte der Übertragung charakterisiert der Wirkungsgrad. Er hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Erstes Ziel ist es, einen möglichst großen Teil des primären Magnetfelds mit der Sekundärspule einzufangen und die Streuverluste gering zu halten. Dies wird erreicht, indem die Spulen ohne wesentlichen lateralen Versatz übereinander positioniert werden. Der Abstand der Spulen voneinander (Luftspalt) beeinflusst die Streuverluste erheblich. Durch Abschirmungen, beispielsweise mit Ferritblechen, lassen sich die Streuverluste reduzieren. Durch die Erhöhung der Frequenz des primären Wechselfelds lässt sich das Magnetfeld stärker bündeln und der Wirkungsgrad steigern.

In praktischen Anwendungen wird mit Übertragungsfrequenzen von 20–400 kHz gearbeitet (IFAK 2011). Der durchschnittliche energetische Wirkungsgrad von den Primär- zu den Sekundärklemmen heutiger Anwendungen wird mit 90 % angegeben (IFAK 2011). Es werden aber auch schon Spitzenwerte von 95 % erreicht (CONDUCTIX 2012). Dieser Wert wird im praktischen Betrieb an Elektrostadtbusen in Turin und Genua gemessen. Dabei beträgt der Luftspalt zwischen Primär- und Sekundärspule allerdings nur 4 cm. Induktive Übertragungssysteme können damit künftig nahezu ebenso effizient wie konduktive Systeme

ausgeführt werden, die typischerweise einen Wirkungsgrad von 97 % erreichen (IFAK 2011).

Die induktive Energieübertragung erfolgt aus den genannten Gründen in der Praxis nicht mit der Netzfrequenz von 50 Hz, sondern wird mit einem Umrichter (Inverter) auf die Übertragungsfrequenz gesteigert. Die leistungselektronischen Komponenten der Schaltung zeigt Abb. 4.69.

Die Chancen der kabellosen Energieübertragung wurden vor wenigen Jahren noch eher pessimistisch eingeschätzt (SCHRAVEN 2010). Die Technik hat in den letzten Jahren große Entwicklungsschritte gemacht und wird heute als Zukunftstechnologie gesehen, die in vielen Anwendungen die konventionelle konduktive Energieübertragung ablösen kann. Bereits marktgängige Anwendungen sind elektrische Zahnbürsten, elektrische Werkzeuge, selbstfahrende Unterflurfahrzeuge in industriellen Produktionshallen, Herzschrittmacher und andere. Dabei werden Leistungen von wenigen Watt bis zu einigen 100 kW ausgetauscht. Eine Untersuchung der DLR in Zusammenarbeit mit anderen Institutionen kommt zu dem Ergebnis, dass es technisch machbar ist, Hochgeschwindigkeitszüge mit in den Oberbau integrierten Induktionsstrecken oberleitungsfrei zu betreiben. Dabei müssen, um die maximale Betriebsgeschwindigkeit von 400 km/h zu erreichen, 25 MW elektrische Leistung induktiv übertragen werden (DLR 2014).

Das gestiegene Interesse an der induktiven Energieübertragung zeigt sich beispielhaft in Abb. 4.70 an den Entwicklungsaktivitäten der Automobilindustrie zum kabellosen Laden von Elektrofahrzeugen. Auch Fraunhofer-Forscher arbeiten an

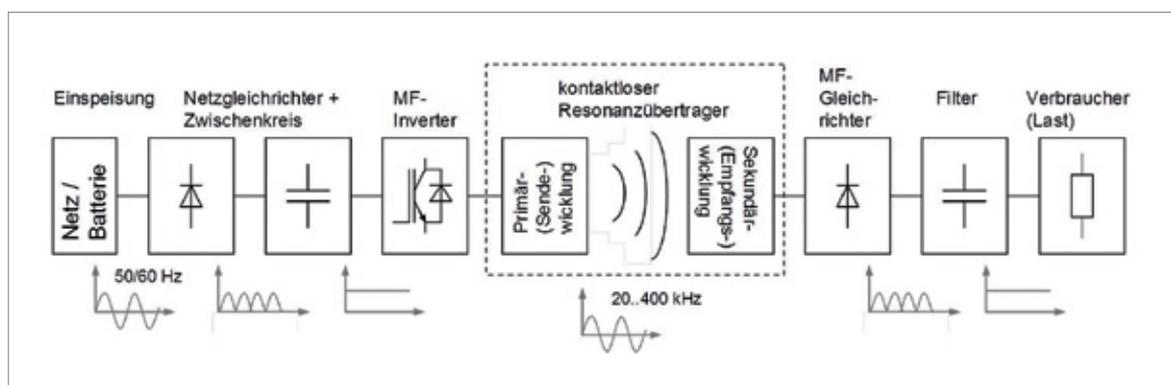


Abb. 4.69: Komponenten eines kabellosen Systems zur Übertragung elektrischer Energie
(Quelle: IFAK 2011)

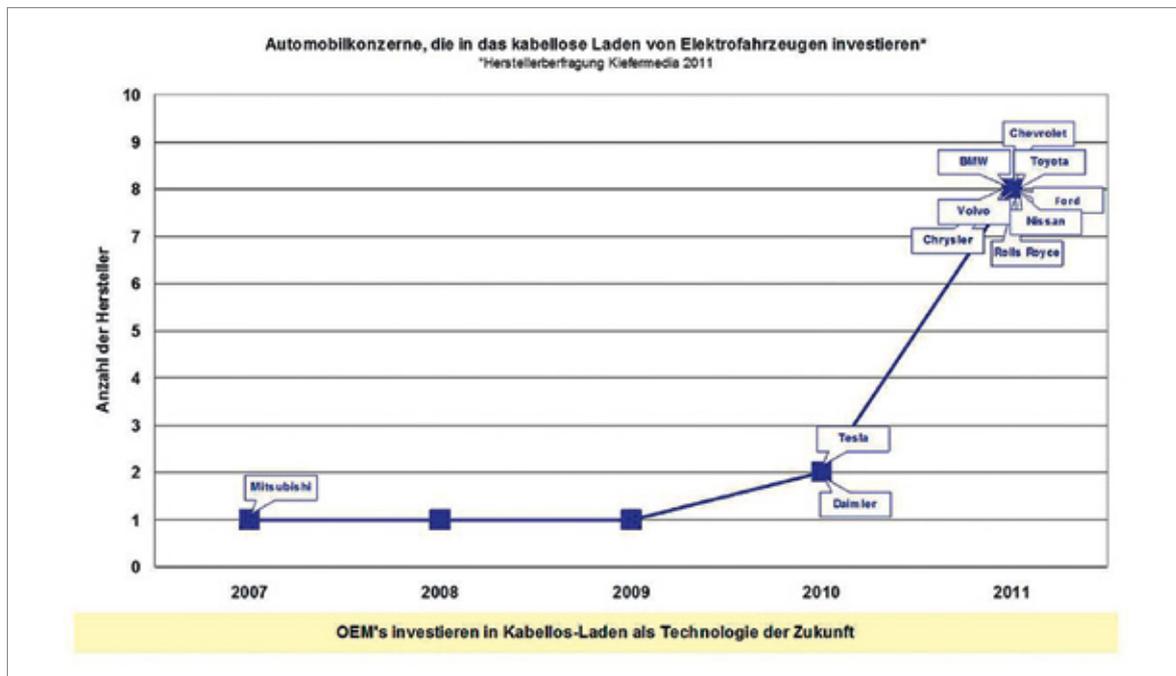


Abb. 4.70: Entwicklungsarbeiten zum kabellosen Laden von Elektrofahrzeugen
(Quelle: IFAK 2011)

der Entwicklung von kabellosen Ladesystemen (SCHRÖDER 2015). Diese Anwendung soll im Folgenden beispielhaft für das große Spektrum möglicher Einsatzfelder näher betrachtet werden.

In einem vom Bundesumweltministerium geförderten Projekt haben Daimler und Conductix Wampfler ein Mercedes A-Klasse E-CELL Fahrzeug mit einem induktiven Ladesystem in der Unterbodenverkleidung ausgerüstet. An dem Prototypfahrzeug wurde ein elektrischer Wirkungsgrad des induktiven Ladesystems über alle Komponenten vom Stromnetzanschluss bis zur Batterieklemme von 90 % gemessen. Das Ladesystem befindet sich nach Aussage von Daimler nun im Alltagstest (DAIMLER 2011, CONDUCTIX 2011).

Auch BMW und Siemens arbeiten mit Förderung durch das BMU an einem induktiven Ladesystem. Dazu wurde der sportliche Plug-in-Hybrid BMW i8 und das Elektrofahrzeug i3 mit einem in den Unterboden integrierten induktiven Ladesystem ausgerüstet, das 3,6 kW Ladeleistung ermöglicht. Damit kann der 18,8 kWh Lithium-Ionen-Akkumulator des BMW i3 über Nacht berührungslos vollständig aufgeladen werden. Auch bei diesem Ladesystem wird der elektrische Wirkungsgrad mit 90 % angegeben (BMW 2014a, SIEMENS 2011a).

Das britische Unternehmen Arup testet seit Mai 2011 das induktive Laden mit 110 auf Elektroantrieb umgerüstete Citroen C1. Die Fahrzeuge besitzen eine Reichweite von knapp 100 km und lassen sich induktiv oder über Kabel in sechs Stunden voll aufladen. Arup erwartet, dass sich die induktive Ladung bei Elektrofahrzeugen bis 2031 als Standard etabliert (PICHLER 2011).

Die Vorteile des berührungslosen Ladens liegen auf der Hand. Es entfallen die Ladesäulen für Elektrofahrzeuge. Das induktive Primärsystem kann unsichtbar abgedeckt in die Stellfläche integriert werden. Das Sekundärsystem im Fahrzeug wird mit dem Parkassistenten automatisch zentimetergenau über dem Primärsystem positioniert. Es arbeitet praktisch wartungsfrei, ohne Verschleiß von Steckern und Kabel, deren regelmäßige Erneuerung ein wesentlicher Kostenfaktor bei Ladesäulen ist. Schutzschaltungen gegen Stromschläge werden nicht benötigt. Die hochfrequenten elektromagnetischen Streufelder müssen allerdings durch Ferrite abgeschirmt werden. Dies bereitet jedoch für den vergleichsweise kleinen Luftspalt von 12–13 cm zwischen Primär- und Sekundärspule bei PKW-Ladesystemen keine Probleme. Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass bei geeigneter Spulendimensionierung und

Abschirmung alle Grenzwerte eingehalten werden können (WAMBSGANSS 2010: 28, IFAK 2011). Durch Datenaustausch zwischen Primär- und Sekundärspule wird sichergestellt, dass das Primärfeld erst eingeschaltet wird, wenn die Sekundärspule in Position ist, um die Entstehung eines offenen magnetischen Kreises zu vermeiden. Fremde Gegenstände im Spalt zwischen Primär- und Sekundärspule lassen sich durch Veränderung des Magnetfelds detektieren. Eine Schutzschaltung unterbricht dann die Energieübertragung.

4.26.2 Rohstoffinhalt

Um die ohmschen Verluste gering zu halten und gute Übertragungswirkungsgrade zu erzielen, werden die stromführenden Teile bei induktiven und induktiven Ladesystemen in Kupfer ausgeführt. Für die Abschirmung des Magnetfelds werden Ferrite eingesetzt, für Gehäuse von induktiven Ladesäulen Stahl und Kunststoffe. In den signal- und leistungselektronischen Komponenten findet sich ein Großteil der Elemente des Periodensystems, allerdings in unkritischen Mengen. Als mengenmäßig kritischer Werkstoff soll Kupfer betrachtet werden.

Bei den induktiven Übertragungssystemen findet sich Kupfer vor allem im Ladekabel und der Verdrahtung von Ladestation und Fahrzeug. Bei den induktiven Systemen bilden neben der Verdrahtung die Kupferspulen im Boden und im Fahrzeug die wesentlichen Kupfersenken.

Das Laden von Elektro- und Plug-in-Hybridfahrzeugen wird im Wesentlichen zu Hause in der Garage oder einem anderen 230 V 1-Phasen-Wechselstromanschluss erfolgen. Eine 400 V Drehstromsteckdose ist im privaten Bereich eher selten. Im Gebäudebestand sind die Stromleitungen in der Regel mit 16 A abgesichert. Neuere Gebäude sind auch schon auf höhere Stromstärken ausgelegt. Mit 230 V und 16 A können über eine Phase etwa 3,6 kW übertragen werden. Dem entsprechend wird das Gros der fahrzeugseitigen Ladesysteme aus Kostengründen auf 3,6 kW Leistungsaufnahme ausgelegt. An Drehstromanschlüsse stehen drei Phasen zur Verfügung. Damit lassen sich etwa 11 kW übertragen und die Ladezeit auf ein Drittel verkürzen.

Im Projekt „*Begleitforschung zum kabellosen Laden von Elektrofahrzeugen*“ wurden eine Reihe von geförderten Entwicklungsvorhaben zum induktiven Laden ausgewertet, Testsysteme nachgebaut und in empirischen Erhebungen der Stand der Entwicklung und die Zukunftsperspektiven erhoben (IFAK 2011).

Ein stationäres induktives Ladesystem mit 3,6 kW Leistung wurde nachgebaut und das notwendige Kupfergewicht der beiden Spulen mit zusammen 1,3 kg bestimmt. Ein 5-adriges, 4 m langes Normladekabel einer induktiven Ladestation wiegt 1,2 kg. Hinzu kommt das Gewicht der nicht näher untersuchten Kupferverdrahtung in den Ladestationen selbst. Das Institut für Automation und Kommunikation kommt zu dem Schluss, dass der Kupferanteil beider Ladesysteme in etwa vergleichbar ist (IFAK 2011).

Dies gilt für *stationäre* induktive Ladesysteme. *Dynamische* induktive Ladesysteme, bei denen lineare Leiter in die Fahrbahn eingelassen werden, um die Fahrzeuge während der Fahrt nachzuladen, haben einen deutlich höheren Kupferbedarf. Abgesehen von den immensen Kosten für die Nachrüstung der Verkehrswege müssten auch die Fahrzeuge selbst mit sehr leistungsfähigen, teuren und schweren Sekundärsystemen ausgerüstet werden, wie eine einfache Rechnung zeigt: Ein Elektrofahrzeug verbraucht in praxisgerechten Fahrbedingungen mindestens 0,16 kWh pro gefahrenen Kilometer (SCHRAVEN 2010). Damit könnte ein Fahrzeug mit einer induktiven Ladeleistung von 3,6 kW maximal mit einer Geschwindigkeit von 24 km/h bewegt werden, um die verbrauchte Energie während der Fahrt nachzuladen. Bei einem Fahrzeug mit einer Ladeleistung von 11 kW läge die Höchstgeschwindigkeit bei 69 km/h.

Die *dynamische* induktive Ladung ist eine Technologie, deren Realisierung in ferner Zukunft liegt. Sie wird vor ihrer Realisierung aus heutiger Sicht durch die Brennstoffzellentechnologie abgelöst, die an der Schwelle zur Markteinführung steht. Die Brennstoffzelle löst das Reichweitenproblem rein elektrisch angetriebener Fahrzeuge, eine Nachladung von Elektrizität während der Fahrt ist entbehrlich.

4.26.3 Foresight industrielle Nutzung

Die künftige Verbreitung stationärer induktiver Ladesysteme wird wesentlich von den Kosten ihrer Errichtung bestimmt. Sie stehen mit konventionellen konduktiven Ladesystemen im Wettbewerb. Zum Kostenvergleich zwischen diesen Systemen liefert die schon zitierte Studie (IFAK 2011) des Instituts für Automation und Kommunikation, Magdeburg, valide Daten, die in Tab. 4.68 zusammengestellt sind. Das induktive Ladeverfahren für Fahrzeuge ist noch nicht am Markt. Deswegen wurden Kostendegressionen einer zukünftigen Serienfertigung unterstellt, die mit gewissen Unsicherheiten behaftet sind. Auch unter Berücksichtigung dieser Unsicherheiten kommt man zu dem Ergebnis, dass die Diffusion induktiver Ladestationen in den Markt nicht durch die Kosten behindert werden wird.

4.26.4 Foresight Rohstoffbedarf

Der Anteil von reinen Elektrofahrzeugen an der globalen Fahrzeugproduktion soll nach Schätzung von BP bis 2035 auf 1,5 % steigen (BP 2014, SCHMIDT 2014a). Bei einer globalen Flotte (Bestand) von 1,7 Mrd. PKW in 2035 ergibt eine Modellrechnung im gleichen Jahr eine Flotte von rund 16 Mio. reinen Elektrofahrzeugen.

Bei einem Kupferinventar des induktiven Ladesystems von 0,65 kg pro Fahrzeug ergibt sich ein globaler Kupferbedarf für das Sekundärsystem von 10.400 t. Der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) geht davon aus, dass pro 15 Elektrofahrzeuge ein Ladepunkt benötigt wird (BDEW 2013). Danach wären 2035 weltweit 1.070.000 Ladepunkte erforderlich. Pro induktiven Ladepunkt werden 0,65 kg Kupfer benötigt. Insgesamt entsteht in diesem Szenario weltweit ein Kupferinventar von rund 700 t im primären Ladesystem, zusammen mit den sekundären Ladesystemen in den Fahrzeugen sind es 11.100 t.

Bei der konduktiven Ladung ist das Kupferinventar an den Ladesäulen konzentriert. Bei einem Inventar von 1,2 kg Kupfer sind in weltweit 1.070.000 Ladesäulen 1.284 t Kupfer verbaut. Das Kupferinventar konduktiver Ladesysteme ist somit deutlich geringer, weil in den Fahrzeugen keine Ladespulen mitgeführt werden. Das gleiche gilt für den jährlichen Kupferbedarf.

Bei einer PKW-Produktion von 110 Mio. Fahrzeugen in 2035 werden nach BP 1,65 Mio. reine Elektrofahrzeuge abgesetzt. Mit konduktiven Ladesystemen ausgerüstet benötigen sie 1.073 t Kupfer für das Sekundärsystem im Fahrzeug. Der Zuwachs von etwa 1,5 Mio. Elektrofahrzeugen unter Berücksichtigung der im gleichen Jahr verschrotteten Fahrzeuge erfordert den Zubau von

Tab. 4.68: Kostenvergleich induktiver und konduktiver Ladestationen
(Quelle: IFAK 2011)

| Induktive Ladung | Kosten | Konduktive Ladung | Kosten |
|------------------------------------|----------------|------------------------------------|----------------|
| Ladestation | | | |
| Sendespule mit Leistungselektronik | 750 € | Fernsteuerbarer | |
| Gehäuse | 150 € | FI Schutzschalter | 400 € |
| Positionsbestimmung und | | Steckdose mit elektromagnetischer | |
| Überwachung | 200 € | Verriegelung | 110 € |
| Fahrzeugidentifikation | 150 € | Isolationswächter | 100 € |
| | | Steuerung- und Überwachungsmodul | 250 € |
| | | Gehäuse | 600 € |
| | | Leistungsschutz | 80 € |
| | | Ladekabel | 300 € |
| | | Eingabesysteme mit Bedienelementen | 50 € |
| | | Ausgabesystem mit Display | 250 € |
| Fahrzeug | | | |
| Empfangsspule mit HF-Wandlung | 500 € | Steckdose am Fahrzeug | 110 € |
| Gesamtkosten | 1.750 € | | 2.250 € |

Tab. 4.69: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Kupferbedarf von Ladesystemen für Elektrofahrzeuge in t

| Produktion Cu 2013 | Ladesystem | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|--------------------|------------|-------------|----------------------|
| 18.365.341 (B) | Induktiv | 0 | 1.138 |
| 21.446.333 (R) | Konduktiv | 7 | 120 |

B: Bergwerksförderung

R: Raffinadeproduktion

100.000 Ladepunkten. Dafür werden bei induktiven Ladepunkten 65 t Kupfer benötigt. Zusammen ergibt sich ein jährlicher Kupferbedarf in 2035 von 1.138 t für induktive Ladesysteme und 120 t für konduktive Ladesysteme. Der Kupferbedarf ist in Tab. 4.69 zusammengestellt.

Das konduktive Ladesystem ist deutlich ressourceneffizienter. Gegenzurechnen ist dabei jedoch der Verschleiß von Ladekabel und Ladesteckern, die bei konduktiven Ladesystemen regelmäßig erneuert werden müssen. Das induktive Ladesystem ist dagegen praktisch wartungsfrei und gegen vandalistische Angriffe unempfindlich. Es benötigt weder Stahl noch Kunststoffe für ein Tanksäulengehäuse.

4.26.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Kupfer hat nach Silber die höchste elektrische Leitfähigkeit. Die Realisierung von Leiterstrecken für die Energieübertragung in Silber verbietet sich aus Kostengründen. Grundsätzlich könnte als Leiterwerkstoff auch Aluminium eingesetzt werden, wenn bestimmte technische Besonderheiten von Aluminium beachtet werden (ANGERER 2016). Dies brächte bei Betrachtung von Ressourceneffizienz, Gewicht und Kosten Vorteile. Aufgrund der technischen Nachteile von Aluminiumleitern ist jedoch nicht zu erwarten, dass sich diese Substitution in breiter Front durchsetzt.

Die eigentliche Konkurrenz für induktive Ladesysteme entsteht durch die technologische Systeminnovation des Brennstoffzellenautos (s. Kapitel 4.3). Brennstoffzellenfahrzeuge benötigen keine induktiven oder konduktiven Ladesysteme. Batteriegetriebene Elektrofahrzeuge sind technisch erheblich einfacher aufgebaut und können deshalb preisgünstiger angeboten werden als Brenn-

stoffzellenfahrzeuge. Zudem fallen die Kosten für leistungsfähige Lithium-Ionen-Akkumulatoren und gleichen sich jenen von Blei-Säure-Akkumulatoren an. Der Preisvorteil könnte dem Batteriefahrzeug das Überleben in Marktnischen sichern. Marktnischen sind beispielsweise PKW für den Stadtverkehr und Transporter für Zustell- und Serviceleistungen im städtischen und ländlichen Umfeld. Diese Fahrzeuge werden vorwiegend während der nächtlichen Ruhezeiten nachgeladen. Auf Ladestationen im öffentlichen Bereich sind sie aufgrund ihres begrenzten Aktionsradius nicht angewiesen.

Kupfer aus den Ladesystemen ist sehr gut zu recyceln. Sekundärkupfer ist nach der Elektrolysestufe qualitativ nicht von aus Erz gewonnenem Primärkupfer zu unterscheiden. Für die Komponenten aus Stahl und Kunststoffen gibt es eingeführte gut funktionierende Entsorgungswege. Problematisch ist das Recycling der Leistungs- und Signalelektronik. Trotz großer Fortschritte ist die Rohstoffrückgewinnung beim Elektronikschrottreycling aus wirtschaftlichen und technischen Gründen unbefriedigend. Der Großteil der Inhaltsstoffe geht dabei dem Wirtschaftskreislauf verloren.

4.27 Thermische Speicher

4.27.1 Technologiebeschreibung

Unter thermischen Speichern versteht man Anlagen zur Speicherung von Wärmeenergie. Einsatzmöglichkeiten (WIETSCHEL et al. 2010, MEYER 2015a, HAUER 2013) bestehen immer, wenn vorhandene oder gewonnene Wärme nicht direkt genutzt werden kann, z. B. wenn Wärme und Wärmebedarf nicht zeitlich deckungsgleich sind oder wenn Wärmequelle und Wärmeverbraucher unterschiedliche Leistungen haben. Eine weitere

Nutzungsmöglichkeit ist ein Wärmeverrat als Notfallreserve. Je nach Anwendung kann die Speicherdauer wenige Stunden (Kurzzeitspeicher) bis hin zu mehreren Monaten (Langzeitspeicher, insbesondere Saisonwärmespeicher) betragen.

Ein wichtiges Anwendungsfeld ist die Nutzung industrieller Abwärme, wobei die Wärme z. B. zur Prozessvorwärmung oder zur Erzeugung von elektrischer Energie (s. Kapitel 4.17) genutzt werden kann. Zur industriellen Nutzung zählen auch die Anwendungen in konventionellen und solarthermischen Kraftwerken sowie in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. Der Einsatz von Wärmespeichern in Solarthermieanlagen kann helfen, die variable Wärmequelle Sonne netzkompatibel zu machen. Wärmespeicher können ebenfalls direkt in Wärmenetzen zum Lastausgleich verwendet werden.

Auch im Gebäudebereich unterstützen Wärmespeicher die Nutzung solarer Wärme, insbesondere in Form von Saisonwärmespeichern, welche im Sommer gewonnene Wärme im Winter nutzbar machen.

Kälte ist physikalisch nur die Abwesenheit von Wärme, stellt aber technisch einen Zustand von niedrigerer Temperatur als der Umgebungstemperatur dar, den man ebenfalls in thermischen Speichern aufbewahren kann.

Derzeit ist eine thermische Speicherung im gesamten Temperaturbereich zwischen -40 bis $+400$ °C praktisch realisierbar (HAUER 2013).

Anforderungen an thermische Speichermaterialien

Folgende Kriterien (MEYER 2015a, HAUER 2013) sind ausschlaggebend für die Eignung eines Materials für thermische Speicher:

- **Energiespeicherdichte:** Die pro Volumen maximal speicherbare Wärme soll möglichst hoch sein.
- **Leistungsdichte:** Das Speichersystem sollte die Wärme möglichst schnell aufnehmen und abgeben können.
- **Speichereffizienz:** Wärmeverluste während der Speicherung sollen möglichst gering sein.
- **Temperatur der Wärmeabgabe/-aufnahme:** Diese muss für die Anwendung geeignet sein.
- **Lebensdauer:** Die chemische und mechanische Stabilität sowie die Anzahl durchführbarer Speicherzyklen sollen möglichst hoch sein.
- **Technische Handhabbarkeit:** Beispielsweise sollte die Volumenänderung bei Wärmeaufnahme und -abgabe nicht zu hoch sein.
- **Sicherheit:** Thermische Speicher sollten möglichst nicht brennbar, nicht explosiv, nicht giftig und nicht korrosiv sein.
- **Verfügbarkeit:** Die Materialien sollten in ausreichender Menge für Massen Anwendungen zur Verfügung stehen.
- **Kosten:** Der Preis für die Speicherung der Wärme in Euro/kWh sollte möglichst gering sein.

Aktuelle Forschungsziele (WIETSCHEL et al. 2010) sind die Erhöhung der Energiedichte, die Reduktion der Kosten und die Realisierung weiterer Temperaturbereiche, z. B. für Hochtemperaturanwendungen.

Drei Arten der thermischen Speicherung werden unterschieden: Sensible, latente und chemische Speicherung.

Sensible Speicher

Die Speicherung von Wärme (bzw. Kälte) erfolgt bei sensiblen Speichern durch Temperaturerhöhung (bzw. Temperaturniedrigung) des Speichermaterials. Es handelt sich um eine ausgereifte und in vielen Anwendungen etablierte Technologie (HAUER 2013).

Der wesentliche Vorteil sensibler Speicher sind ihre geringen Kosten (0,1–10 Euro/kWh, HAUER 2013). Latent- und chemische Speicher können finanziell nur konkurrieren, wenn sehr viele Speicherzyklen durchlaufen werden (HAUER 2013). Nachteilig ist jedoch ihre geringere Energiedichte gegenüber Latent- und chemischen Speichern. Für die Speicherung großer Wärmemengen werden daher große Volumina benötigt, so dass Platzmangel der Verwendung der Technologie entgegenstehen kann. Die Energiedichte liegt im Durchschnitt bei 25 kWh/m³ (HAUER 2013). Das am häufigsten eingesetzte Medium Wasser erreicht 60 kWh/m³ (WIETSCHEL et al. 2010). Die Speichereffizienz variiert stark (50–90 %) in Abhängigkeit von Medium und Isolation (HAUER 2013). Neuere Entwicklungen im

Bereich sensible Wärmespeicherung widmen sich daher Isolierungsmöglichkeiten, beispielweise in Form von vakuumsuperisolierten (VSI) Behältern (SCHNEIDER 2014). In diesen reduziert ein Vakuum zwischen Innen- und Außentank die Wärmeleitung und Konvektion, eine Perlitschicht verringert zudem die Wärmestrahlung. Eine weitere Anforderung an die Anlagenkomponenten ist, dass sie für eine Wärmeabgabe bei konstanter Temperatur sorgen müssen, falls die jeweilige Anwendung dies erfordert, da sensible Speicher ihre Wärme grundsätzlich bei veränderlicher Temperatur abgeben (HAUER 2013).

Wasser ist das am häufigsten eingesetzte sensible Speichermedium. Ein klassisches Anwendungsbeispiel ist der Boiler. Weitere Anwendungsbereiche sensibler Speichermedien sind die Speicherung industrieller Abwärme, Wärmespeicherung in der Solarthermie, aber auch Gebäudeheizung und -kühlung (z. B. Betonkernaktivierung) bis hin zur Saisonwärmespeicherung. Dabei zählt auch das saisonale Speichern von Wärme in Boden oder Grundwasser zur sensiblen Wärmespeichertechnologie. Die Wärme wird im Sommer solarthermisch gewonnen und über ein Rohrsystem mit Trägerflüssigkeit an den oberflächennahen Untergrund übergeben. Im Winter wird diese Wärme dem Erdreich entzogen und zum Heizen genutzt. Solche Systeme sind sowohl für einzelne Gebäude als auch für ganze Wohngebiete im Einsatz. In der kanadischen Drake Landing Solar Community können beispielsweise mehr als 90 % des jährlichen Wärmebedarfs durch ein solches System gedeckt werden (WONG 28.6.11).

Latentspeicher

Bei der Aufnahme latenter Wärme ändert sich die Temperatur eines Speichermaterials nicht. Stattdessen bewirkt die Wärme eine Phasenumwandlung mit Entropiezunahme. In der technischen Anwendung als Speicher ist dies meist der Phasenübergang von fest zu flüssig. Löst man den umgekehrten Phasenübergang mit Entropieabnahme (flüssig zu fest) aus, wird Wärme abgegeben. Die Speichermaterialien werden englisch auch als Phase Change Materials (PCM) bezeichnet.

Folglich wird die Wärme latenter Speicher bei der Temperatur des Phasenübergangs und somit bei einer konstanten, exakt definierten Temperatur

abgegeben und aufgenommen. Dies ist für viele Anwendungen vorteilhaft, bedeutet aber auch, dass zunächst ein Material mit zur jeweiligen Anwendung passender Schmelztemperatur gefunden werden muss. Zu beachten ist weiterhin, dass das Speichermaterial zeitweise flüssig vorliegt und die Phasenumwandlung mit einer Volumenänderung verbunden ist, so dass eine geeignete Hülle (Verkapselung, Behälter) gewählt werden muss. Beim Einsatz latenter Wärmespeicher als Baustoffzuschlag (s. u.) wird beispielsweise eine Mikroverkapselung verwendet (BINE INFORMATIONSDIENST 2009). Es befinden sich jedoch auch formstabile latente Wärmespeicher in der Entwicklung, welche ohne Hülle auskommen (HIRN 2012). Die Formstabilität wird durch Bindungskräfte zwischen benachbarten Polymerketten erreicht.

Wesentlicher Vorteil der latenten Speicher ist, dass eine große Wärmemenge bei geringer Temperaturänderung gespeichert werden kann. Die Energiedichte liegt bei ca. 100 kWh/m³, die Speichereffizienz bei 75–90 % (HAUER 2013). Die Erhöhung dieser Kennwerte gegenüber sensiblen Speichern geht jedoch mit höheren Kosten von 10–50 Euro/kWh einher. Bei den Kosten werden sowohl Ausgaben für das Speichermaterial als auch für sämtliche Systembestandteile und Anlagenkomponenten berücksichtigt. So kostet z. B. das Mikroverkapselungsmaterial (s. u.) häufig mehr als das eigentliche Speichermedium (HAUER 2013). Insbesondere die Erhöhung des Wärmetransports bzw. der Leistungsdichte stellt bei latenten Speichern



Abb. 4.71: Latentwärmespeicher für Handwärmekissen, links: vollständig flüssig, rechts: Kristallisation unter Wärmeabgabe (Quelle: FRAUNHOFER ISI)

einen wesentlichen Kostenfaktor dar. Um der geringen Wärmeleitfähigkeit vieler latenter Speichermaterialien (z. B. Salze) entgegenzuwirken, werden Wärmeleitstrukturen und Wärmeüberträgerkonzepte erforscht (DLR 2011a).

Das wohl bekannteste Anwendungsbeispiel latenter Speicher sind Handwärmekissen (s. Abb. 4.71). Darüber hinaus ist die thermische Speicherung zur Gebäudetemperierung ein wichtiges Einsatzfeld. Durch Integration in Bauelemente oder Baustoffe werden die thermischen Speicher passiv ausgenutzt, z. B. in Fassadenelementen, Decken und Wänden. Dort dienen sie der Übertragung der Nachtkälte in den Tag, was den Klimatisierungsaufwand reduziert. Die Integration in Bauelemente erfolgt in Form von Speicherelementen mit Makroverkapselung. Als Baustoffzuschläge kommen Partikel mit Mikroverkapselung zum Einsatz. Mikroverkapselte Paraffine sind beispielsweise seit 15 Jahren kommerziell erhältlich (BINE INFORMATIONSDIENST 2009). Latente Wärmespeicher werden auch als Baustoffzuschlag im Außenputz zur Optimierung des Temperaturprofils von Fassaden verwendet (MEYER 2015a). Daneben gibt es Anwendungen, die die thermischen Speicher aktiv durch Regelung bzw. gezieltes Abrufen der gespeicherten Wärme mit Hilfe von Pumpen oder Ventilatoren ausnutzen, z. B. Fußbodenheizungen, Wandheizungen, Kühldecken oder separate Geräte (BINE INFORMATIONSDIENST 2009). Latente Wärmespeichermaterialien (z. B. Paraffine) können in solchen Anwendungen auch zum Wärmetransport eingesetzt werden, indem sie der Wärmeträgerflüssigkeit (meist Wasser) zugemischt werden (HIRN 2012). Die Gemische werden als Phase Change Slurries bezeichnet.

Als Saisonwärmespeicher haben Latentspeicher den Vorteil des geringeren Volumenbedarfs, aber den Nachteil höherer Kosten.

Ein weiteres Anwendungsfeld ist die passive thermische Speicherung in Kühlboxen für sensible Güter (z. B. Pharmazeutika, Blutplasma). Auch in Kleidung können mikroverkapselte latente thermische Speicher integriert werden (BINE INFORMATIONSDIENST 2009).

Chemische Speicher

Die chemische Wärmespeicherung erfolgt durch umkehrbare chemische Reaktionen. Bei einer endothermen Reaktion wird die zugeführte Wärme gespeichert. Wird die exotherme Rückreaktion ausgelöst, wird die Wärme abgegeben. Meist handelt es sich bei diesen Reaktionen um Sorptionsprozesse. Dabei wird ein Stoff (meist Wasser) vom Speichermaterial unter Wärmeabgabe ad- oder absorbiert. Die umgekehrte Desorption (meist Wasserabgabe/Trocknung) erfolgt unter Wärmeaufnahme.

Ein großer Vorteil der chemischen Wärmespeicherung ist, dass die gespeicherte Wärme über den Speicherzeitraum hinweg nicht durch Selbstentladungsprozesse gemindert wird. Dadurch können Speichereffizienzen von 75 bis fast 100 % erreicht werden (HAUER 2013). Auch bei der Energiedichte sind chemische Speicher den anderen Technologien überlegen, ermöglichen also eine sehr kompakte Speicherung von Wärme. Der häufig verwendete Zeolith hat eine Energiedichte von 130 kWh/m³ (MEYER 2015a), bis zu 250 kWh/t (HAUER 2013) sind realisierbar. Nachteilig sind jedoch die hohen Kosten von 8–100 Euro/kWh (HAUER 2013). Diese sind vor allem auf die geringe Be- und Entladeleistung (Leistungsdichte) zurückzuführen, durch die der Wärmetransport zu einem großen Kostenfaktor wird (HAUER 2013).

Die medienwirksamste Anwendung war vielleicht die Verwendung von Zeolith im selbstkühlenden Bierfass. Nach dem gleichen Prinzip arbeitet ein Solarkühlschrank, der für Entwicklungsländer konzipiert wurde. Aber auch in Wärmezwischenspeichern von Spülmaschinen und in Wärmepumpen ist Zeolith als chemisches Wärmespeichermaterial im Einsatz. Eine weitere praktisch umgesetzte Anwendung sind Zeolithspeicher in Blockheizkraftwerken (MEYER 2015a).

Der Einsatz chemischer Speicher zur Gebäudeklimatisierung ist energetisch effizienter als der Einsatz von Kompressionswärmepumpen und ermöglicht zusätzlich eine Regulierung der Luftfeuchtigkeit (MEYER 2009).

Für Saisonwärmespeicher sind chemische Speicher aufgrund der hohen Energiedichte und dem entsprechend kleinen benötigten Volumen sowie durch die sehr hohe Speichereffizienz (geringe

bis keine Wärmeverluste) besonders geeignet. Der breiten Anwendung steht der vergleichsweise hohe Preis entgegen.

Die hohe Energiedichte bzw. das geringe Volumen der Speicher ermöglicht auch den ökologisch und ökonomisch sinnvollen Transport gespeicherter Wärme, wenn Quelle und Verbraucher weniger als 10 km voneinander entfernt sind (HAUER 2013). Dies erweitert die Nutzungsmöglichkeiten industrieller Abwärme.

4.27.2 Rohstoffinhalt

Sensible Speicher

Das am häufigsten genutzte sensible Wärmespeichermaterial ist Wasser, da es umweltneutral und mit geringen Kosten verbunden ist. Ebenfalls zum Einsatz kommen klassische Baustoffe wie Beton, Sand und Kies. Aber auch Thermoöle und Salzschnmelzen finden Verwendung. Prinzipiell steht eine große Auswahl an Materialien zur Verfügung, so dass computerbasierte Methoden genutzt werden, um das am besten geeignete Material für eine Anwendung gemäß der in Kapitel 4.27.1 aufgeführten Kriterien zu ermitteln (vgl. KHARE et al. 2013).

Latentspeicher

Mit latenten Wärmespeichern kann durch verschiedene Materialien (Wasser, wässrige Salzlösungen, Chlathrate, Fettsäuren, Paraffine, Zuckeralkohole, Nitrate, Hydroxide, Chloride, Karbonate, Fluoride) ein weiter Temperaturbereich von -100 – $+800$ °C (BINE INFORMATIONSDIENST 2009) abgedeckt werden.

Paraffine (55 kWh/m^3) finden schon seit längerem kommerzielle Verwendung in mikroverkapselter und makroverkapselter Form (s. 4.27.1). Als Mikroverkapselung kommen Materialien wie Plexiglas, Melamin-Harz, Polyurethan, Gummi oder Gelatine zum Einsatz (HIRN 2012). Nachteil der Paraffine ist, dass sie brennbar sind.

Latente Speichermaterialien auf der Basis von Salzen und Salzhydraten (120 kWh/m^3) sind dagegen nicht brennbar und ebenfalls nicht toxisch. Mit eutektischen Gemischen werden zusätzliche

Schmelztemperaturen realisierbar, wobei ausschließlich eutektische Gemische in Frage kommen, da nur diese bei einer konstanten Temperatur schmelzen. Mit Systemen aus K-, Na-, Li-, Ca-Nitraten oder -Nitriten werden Schmelztemperaturen zwischen 120 und 350 °C ermöglicht (DLR 2011b).

Auch bei Wasser bzw. Eis kann durch Ausnutzen des Phasenübergangs eine höhere Speicherdichte (92 kWh/m^3) erreicht werden, so dass Eisspeicher z. B. in der industriellen Kältetechnik zum Einsatz kommen.

Allein die englischsprachige Wikipedia listet 123 verschiedene latente Wärmespeicherstoffe mit ihren anwendungsrelevanten Eigenschaften auf (WIKIPEDIA 2015b). Aufgrund dieser Fülle an potenziellen Materialien können zur Suche nach einem für eine konkrete Anwendung geeigneten Werkstoff wiederum computerbasierte Methoden zum Einsatz kommen (KHARE et al. 2012).

Chemische Speicher

Die am häufigsten eingesetzten chemischen Speicher sind Sorptionsspeicher mit Silicagel oder

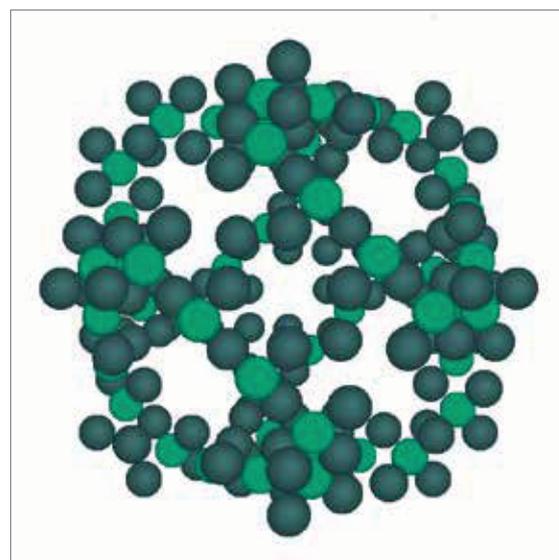


Abb. 4.72: Die Grundstruktur der Zeolithe besteht aus SiO_4 und AlO_4 -Tetraedern. In den Hohlräumen kann Wasser unter Wärmeabgabe angelagert werden (Quelle: eigene Darstellung)

Zeolith (ca. 130 kWh/m³, s. Abb. 4.72). Natürliche Zeolithe sind preiswerter als synthetische, aber auch weniger leistungsfähig. Eine Neuentwicklung sind Zeolithspeichermaterialien, die im Gegensatz zu herkömmlichen Produkten keinen Ton enthalten und daher eine 15–20 % höhere Speicherfähigkeit haben (MEYER 2015a).

Ein weiteres Sorptionsspeichermaterial ist wässrige Lithiumchloridlösung, welche durch Sorption ihre Konzentration ändert und beispielweise zur Wasserkühlung eingesetzt wird. Weitere chemische Speichermaterialien sind Metallhydride, Metalloxide (Zersetzung zu Metall und Sauerstoff), NiCl₂NH₃ sowie Mg-, Ca-Chloride oder -Sulfate (HAUER 2013).

4.27.3 Foresight industrielle Nutzung

Die aktuellen Hauptanwendungsgebiete thermischer Speicher sind laut NAVIGANT (2013):

- Wärme, Belüftung und Klimatisierung in kommerziell genutzten Gebäuden,
- Kühl- und (seltener) Heizsysteme in Wohngebieten,
- Kühlung des Turbinenzustroms zur Reduzierung von Leistungsverlusten,
- Unterstützung von Energieversorgungsnetzen,
- Hochtemperaturspeicher für solarthermische Kraftwerke.

Beim Neubau eines solarthermischen Kraftwerks wird fast immer ein Wärmespeicher, in der Regel basierend auf Salzschnmelzen, installiert (HAUER 2013). Insgesamt sind in 15 % aller Heizkraftwerke thermische Speicher vorhanden. Gemäß TRANSPARENCY MARKET RESEARCH (2015) werden kommerzielle und industrielle Anwendungen bis 2020 das führende Marktsegment bleiben, gefolgt von den Bereichen Wohnen und Stromversorgung.

Als Wachstumstreiber gelten weltweit zunehmende Energieeffizienzbestrebungen sowie steigende Energiepreise und ein wachsender Bedarf an Stromversorgungsreserven (NAVIGANT 2013, TRANSPARENCY MARKET RESEARCH 2015). Anschaffungskosten stellen jedoch eine entscheidende Markteintrittsbarriere dar. Politische Anreize können die Verbreitung von thermischen Speichern

erhöhen. Außerdem sollte die Forschung vor allem im Bereich der Latent- und chemischen Speicher vorangetrieben werden, um insbesondere die Langzeitstabilität ihrer sehr guten Speichereigenschaften zu verbessern (HAUER 2013).

Dem Marktwachstum im Gebäudebereich steht entgegen, dass in den Industrienationen relativ wenige Häuser neu gebaut werden. Aus den jährlichen Anteilen neu gebauter (1,3 %) und sanierter (1,5 %) Gebäude in Europa ergibt sich eine Implementierungsquote von unter 5 % (HAUER 2013). Hinzu kommt, dass sich die Integration von Wärmespeichern vor allem beim Neubau einfach und kostengünstig gestaltet. Bei Sanierungen kommt sie aufgrund des höheren Aufwands seltener zum Einsatz. In Entwicklungsländern mit wesentlich höheren Neubauquoten haben Beheizungs-/Klimatisierungssysteme mit Wärmespeicher einen deutlich geringeren Marktanteil (HAUER 2013). Um sich im Gebäudesektor zu etablieren, muss es Wärmespeichersystemen zunächst gelingen, in Gesamtkonzepten bzw. -projekten integriert zu werden (NAVIGANT 2013).

Aufgrund ihrer Bemühungen um Energieeffizienz und erneuerbare Energien (speziell solar), stellt die EU den größten Wachstumsmarkt für thermische Speicher dar. Auch in Asien, insbesondere Japan, wird eine starke Verbreitung erwartet, während für die USA ein geringeres Wachstum prognostiziert wird (HAUER 2013). Aber auch im Mittleren Osten und in Afrika gibt es Zielsetzungen im Bereich Energieeffizienz und erneuerbare Energien und ein entsprechendes Marktpotential für thermische Speicher (TRANSPARENCY MARKET RESEARCH 2015). Das globale Potenzial wird auf das ca. Dreifache des europäischen Potenzials geschätzt (HAUER 2013).

Laut TRANSPARENCY MARKET RESEARCH (2015) betrug die im Jahr 2013 weltweit installierte Kapazität an thermischen Speichern 2.038 MW. Für 2020 werden 6.070 MW prognostiziert, was einer mittleren jährlichen Wachstumsquote von 17,1 % entspricht. Für Europa wird von einer Gesamtkapazität von 1.307 MW ausgegangen. Der Marktwert soll mit einer Wachstumsquote von 16,7 % von 627,6 Mio. US\$ (2013) auf 1.818,8 Mio. US\$ (2020) anwachsen.

(VERGETIS LUNDIN 2012) geht sogar von einem doppelt so hohen Marktwert von 3,6 Mrd. US\$ im Jahr

2020 aus. Demnach verdreifacht sich die insgesamt installierte Kapazität von 2012 bis 2020 in den USA auf 7,2 GW. In Europa sollen 2020 die jährlichen Neuinstallationen 2 GW/Jahr betragen.

4.27.4 Foresight Rohstoffbedarf

Im Bereich thermische Speicher gibt es drei konkurrierende Technologien (sensible, latente und chemische Speicher), von der jede eine breite Auswahl an Materialien bietet. Es ist offen, wie sich die Marktanteile langfristig zwischen den Technologien und zwischen den jeweils zur Verfügung stehenden Materialsystemen aufteilen werden. Dies wird u. a. davon abhängen, wie sehr sich latente und chemische Speicher durch Forschungs- und Entwicklungsbemühungen optimieren lassen. Laut TRANSPARENCY MARKET RESEARCH (2015) wird die sensible Wärmespeicherung (in Wasser oder Gestein) von 2014 bis 2020 marktführend bleiben, allerdings Marktanteile abgeben müssen, da die anderen Technologien größere Energiedichten haben.

Unter den typischen Wärmespeichermaterialien fällt insbesondere Lithium als potenziell rohstoffkritisches Element auf.

4.27.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Substitutionsmöglichkeiten existieren bei der thermischen Energiespeicherung zum einen auf Technologieebene (sensible, latente und chemische Speichertechnologie). Zum anderen bieten die zahlreichen Materialien Substitutionsmöglichkeiten. Für besondere Anwendungen kann aber u. U. nur ein Material geeignet sein.

4.28 Micro-Energy Harvesting aus der Umgebungsenergie

4.28.1 Technologiebeschreibung

Die Mikrosystemtechnik ist zu einer Schlüsseltechnologie herangewachsen und wird heute in verschiedensten Anwendungen eingesetzt. Für die Erschließung neuer Einsatzfelder ist die Unabhängigkeit vom stationären Energieversorgungsnetz-

werk häufig eine wesentliche Voraussetzung. Ein Beispiel hierfür ist die fortschreitende Entwicklung von Sensornetzwerken für die kostengünstige Installation an Orten, an denen die Kabelverbindung zu einer externen Energieversorgungseinheit nicht praktikabel ist. Neben der hohen Flexibilität bei der Installation werden Kostenvorteile (Wegfall von Steckern, Kabeln und Installationsaufwand) sowie eine unkomplizierte Erweiterung bestehender Systeme in Ihrer Funktionalität möglich.

Dabei halten drahtlose Sensoren zunehmend in folgenden Anwendungsbereichen Einzug:

- Gebäudetechnik (Klima- und Beleuchtungssteuerung)
- Transportwesen (Ladegutüberwachung, Zustandsüberwachung)
- Umwelt Monitoring (Überwachung und Datenerhebung von Arealen)
- Medizintechnik (Monitoring von Patienten)
- Industrielle Prozessoptimierung (Überwachung von Anlagenzustand und Prozessparametern)

Konventionelle Energiespeicher, wie primäre oder sekundäre Batterien, begrenzen durch ihre Kapazität die unterbrechungsfreie Einsatzdauer von energieautarken Mikrosystemen. Der endliche Energievorrat führt dabei zu einem stets erforderlichen Kompromiss aus realisierbarer Baugröße, -gewicht und Kosten in der Entwicklung und Verbreitung autarker Mikrosysteme. Dies gilt besonders für die genannten Anwendungen, in denen ein unterbrechungsfreier Langzeitbetrieb ohne Wartungsintervalle für Batteriewechsel gefordert ist. Ebenfalls trägt die Zusammensetzung des elektrochemischen Energiespeichers wesentlich zur Toxizität des Gesamtsystems bei und erfordert spezielle Maßnahmen bei der Entsorgung. Neben alternativen Konzepten der Energiespeicherung (z. B. Integration miniaturisierter Brennstoffzellen) basieren innovative Versorgungskonzepte auf der Nutzung von Umgebungsenergie mittels „Energy Harvestern“ oder auch „Energy Scavenger“. Dabei werden nicht-elektrische Größen in elektrischen Strom und Spannung transformiert und nach entsprechender Anpassung dem elektrischen Verbraucher zur Verfügung gestellt. Für die im Folgenden diskutierten Formen des Micro-Energy Harvestings sind dabei stets Systeme aus Sensoren, Datenverarbeitung und Funkkommunikation energetisch zu versorgen. Bedingt durch die physikalischen Gegebenheiten

sind Leistungen im Bereich von einigen Mikro- bis Milliwatt zu erwarten, wodurch sich Einschränkungen für die Systemkonfiguration und -verfügbarkeit ergeben. Die in diesem Abschnitt diskutierten Formen des Micro-Energy Harvestings stellen damit immer nur unter ausgewählten Einsatzbedingungen und Anforderungsprofilen der Elektronik eine Alternative bzw. Ergänzung zu konventionellen Batterielösungen dar. Mit zunehmend sinkendem Leistungsbedarf mikroelektronischer Komponenten bei gleichzeitigen Effizienzsteigerungen von Funktionswerkstoffen und Zwischenspeichern für das Energy Harvesting ist jedoch langfristig eine anteilige Zunahme der autark betriebenen Systeme an der Gesamtmenge drahtloser Sensoren zu erwarten.

Micro-Energy Harvesting

Bei der Auswahl eines geeigneten Energy Harvesters ist zunächst nach den verfügbaren Energiequellen aus natürlichen oder anthropogen verursachten Prozessen aus dem unmittelbaren Umfeld eines Mikrosystems zu unterscheiden (Abb. 4.73). Potenzielle Energiequellen stellen die elektromagnetische Strahlung, Temperaturunterschiede

sowie mechanisch induzierte Bewegungen wie Vibrationen dar. Die Höhe der durchschnittlich bereitgestellten Leistung P'_{EH} wird durch die Effizienz des Wandlers sowie die Umgebungsbedingungen bestimmt. Durch Normierung auf das Volumen bzw. Gewicht kann die in der Literatur verbreitete Angabe von volumetrischer bzw. gravimetrischer Leistungsdichte, σ_v bzw. σ_G , vorgenommen werden. Für planare Anordnungen (z. B. Solarzellen, thermoelektrische Elemente und mikrotechnische mechatronische Wandler) ist jedoch der Bezug pro Fläche, σ_A , sinnvoll. Letztere Größen können jedoch immer nur einen Anhaltspunkt für die Systemkonzeptionierung liefern, da die (lokal) verfügbaren Leistungsprofile aus der Umgebung häufig schwer abschätzbar sind und zusätzlich eine starke Abhängigkeit der Effizienz des Energy Harvesters vom Arbeitspunkt besteht. In jüngster Zeit verfügbare mikroelektronische Schaltungen für das Power Management bieten daher zunehmend Schnittstellen für den modularen Austausch sowie die Kombination von konventioneller Batterieversorgung mit verschiedenen gearteten Energy Harvestern an. Die in diesem Abschnitt diskutierten Formen von Micro-Energy Harvestern werden daher als eigenständige funktionale Einheiten verstanden, wobei in typischen Anwendungsge-

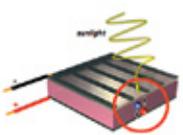
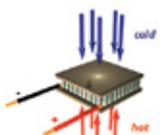
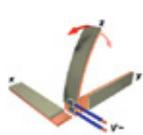
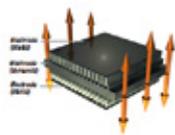
| | | | | | |
|-------------------------------------|--|--|--|--|--|
| Eingangsgröße Umgebung |  Optische Energie in Form von Licht |  Thermische Energie aus Temperaturgradienten |  Kinetische Energie aus mechanischen Schwingungen | | |
| Energy Harvester |  Solarzellen |  Thermoelektrische Elemente |  Piezoelektrische Wandler |  Induktive Wandler |  Kapazitive Wandler |
| Verfügbare Technologien | <ul style="list-style-type: none"> • α-, p-, m-kristallines Si • GaAs • Dünnschicht, z.B. CdTe • Polymer • Farbstoffbasiert • Multi junction | <ul style="list-style-type: none"> • Bi_2Te_3 -basierte Halbleiter: • Makro - auf Keramiksubstraten • Mikro - auf Si-Wafer bzw. Polyimid | <ul style="list-style-type: none"> • PZT -basierte Keramiken: • Makro - resonante Bimorphstrukturen • Mikro - prototypische Labormuster | <ul style="list-style-type: none"> • Makro - Diskrete Komponenten (Mikrospulen, Permanentmagnete) • Mikro - prototypische Labormuster | <ul style="list-style-type: none"> • Simulation kapazitiver MEMS-Interdigitalstrukturen • Mikro - prototypische Labormuster in Entwicklung |
| Zukünftige Herausforderungen | <ul style="list-style-type: none"> • Erhöhte Lebensdauer organischer Zellen • Konzentratoren • Kombinierte Ansätze (z.B. Thermoelektrik + Photovoltaik) | <ul style="list-style-type: none"> • Erhöhte Lebensdauer mikrotechnischer Komponenten • Kostenreduktion durch großvolumige Batch-Produktion | <ul style="list-style-type: none"> • Markteintritt mikrotechnischer Wandler • Entwicklung von Strukturen mit aktiver Resonanzanpassung | <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung von Dünnschichtprozessen zur Abscheidung hartmagnetischer Materialien • Optimierung planarer Spulen | <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung effizienter Ladeelektronik • Integration von Elektreten zur Initiierung des Ladeprozesses |

Abb. 4.73: Übersicht der Technologien für das Micro-Energy Harvesting (Quelle: BENECKE 2014)

bieten eine durchschnittliche Leistung im Bereich zwischen 100 μW und 1 mW zu erzielen ist. Realisierbare Funksensoren implementieren daher Maßnahmen für die drastische Reduktion des Leistungsprofils, d. h. niedrige Abstraten, intensive Nutzung von Energiesparmodi usw.

Für den photovoltaischen Effekt der Wandlung elektromagnetischer Strahlungsenergie aus Lichtquellen in elektrische Energie werden Halbleiter in kristalliner, polykristalliner oder amorpher Struktur, meist auf Basis von Silizium eingesetzt. Hierbei lassen sich unter solarer Strahlung tendenziell hohe Leistungsdichten erzielen, wobei die Einstrahlungsbedingungen starken zeitlichen und örtlichen Schwankungen unterliegen. Künstlich beleuchtete Innenräume nach DIN-Norm ermöglichen eine gute Abschätzung der Beleuchtungssituation, wobei Beleuchtungsstärken zwischen $E = 10 \text{ lux}$ (Notbeleuchtung) bis zu 1.000 lux (hell beleuchtete Arbeitsplätze wie Großraumbüros) zu erwarten sind. Für den Bedarf miniaturisierter Sensorik mit jeweils wenigen Quadratzentimetern Zellfläche wird in der Regel auf geringe Teile der bestehenden hochvolumigen Zellproduktion zurückgegriffen. Der Rohstoffbedarf der entsprechenden Industrie wird daher an anderer Stelle dieser Publikation weiter vertieft.

Da in autarken Anwendungen darüber hinaus eine nicht ausbleibende Verschmutzung der Solarzellenoberfläche über die Lebensdauer zu unvorhersehbaren Effizienzeinbrüchen führt, sind unter dem Überbegriff des Micro-Energy Harvesting vor allem thermoelektrische sowie piezoelektrische

und induktive elektromechanische Wandler von primären Interesse für die genannten Applikationsfelder. Mit MEMS- (Micro Electro Mechanical System) Technologien gefertigte Wandler, z. B. kapazitive Anordnungen, befinden sich technologisch im Entwicklungsprozess bzw. sind hinsichtlich der erzielbaren elektrischen Ausgangsparameter auf die Weiterentwicklung von mikroelektronischen Ultra-Low-Power Komponenten angewiesen. Der Zeitpunkt einer breiten Markteinführung ist derzeit noch schwer einschätzbar, da der Aufwand der zugrunde liegenden mikrotechnologischen Prozesse erst bei kontinuierlicher Nachfrage hoher Stückzahlen ökonomisch tragbar wird.

Thermoelektrische Energiewandler

Thermoelektrische Wandler nutzen das Prinzip des Seebeckeffekts zur direkten Wandlung von Temperaturdifferenzen in einen elektrischen Strom. Thermoschenkel aus n- bzw. p-dotierten Halbleitern werden hierzu zwischen zwei Substraten zu Thermopaaren verbunden, in Serie und über den Verbraucher kontaktiert. Um eine Thermodiffusion von Ladungsträgern zu ermöglichen, ist ein Temperaturgradient von mehreren Kelvin über dem Wandler erforderlich. Dies wird durch thermische Ankopplung an eine Wärmequelle, z. B. eine heiße Maschinenoberfläche, in Kopplung mit einem geeigneten thermischen Pfad ermöglicht (Abb. 4.74). Hierzu kommen aus dem thermischen Management elektrischer Systeme bekannte Materialien für das thermische Interface sowie die Wärmeübertragung an die Umgebung

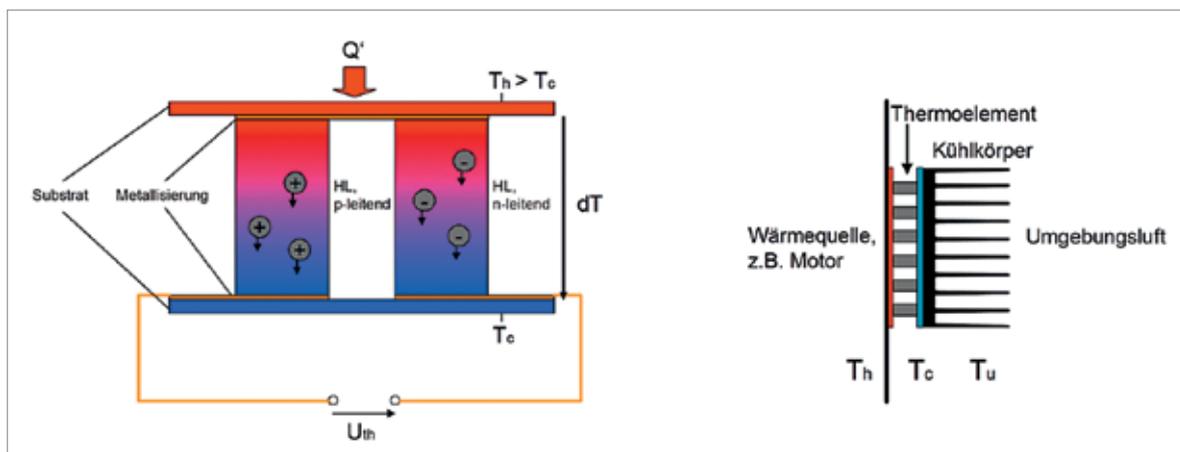


Abb. 4.74: Prinzip der thermoelektrischen Energiewandlung, links: Thermodiffusion in dotierten Halbleitern, rechts: thermische Ankopplung (Quelle: FRAUNHOFER IZM)

zum Einsatz. Mikrotechnisch hergestellte Wandler ermöglichen eine hohe Integrationsdichte an Thermopaaren, welche durch Strukturierung dotierter Dünnschichten auf Basis von Wismut-Tellurit im μm -Bereich auf Standard-Siliziumsubstraten hergestellt werden (BÖTTNER 2004). Entwicklung und Vertrieb thermoelektrischer Generatoren mit lateralen Abmaßen von wenigen Zentimetern werden durch die Nachfrage nach miniaturisierten, elektronischen Kühlern auf Basis des Peltier-Effekts getrieben. Material, Herstellung und Aufbau sind auf Grund der Reversibilität von Seebeck- und Peltier-Effekt vergleichbar.

Um die für eine ausreichende Ausgangsleistung erforderlichen Temperaturdifferenzen herzustellen, müssen eine Wärmequelle bzw. -senke in der unmittelbaren Umgebung verfügbar sein. Hierbei ist eine direkte Ankopplung an das warme Medium sowie eine ausreichende Wärmeabfuhr sicherzustellen, um den gewünschten Temperaturgradienten über dem Wandler zu erreichen. Potenziell nutzbare Temperaturunterschiede bestehen beispielsweise zwischen „Hot Spots“, wie sie bei abwärmeproduzierenden Maschinen, Heizungsanlagen, oder der konstanten Hauttemperatur von Lebewesen vorliegen und der Umgebung als Wärmesenke. Der Wirkungsgrad thermoelektrischer Wandler hängt dabei wesentlich von den Materialeigenschaften des Halbleiters ab. Hierbei führen eine geringe Wärmeleitfähigkeit und ein spezifischer elektrischer Widerstand zu hohen Temperaturunterschieden dT bzw. niedrigem Innenwiderstand R_i . Die erzielbare Leistung ist dann gemäß

Formel 1 unter Berücksichtigung des Seebeck-Koeffizienten α und die Anzahl der Thermopaare abzuschätzen.

Formel 1: Abschätzung der an Thermowandlern erzielbaren Leistung

$$P_{\max} \approx \frac{n \cdot \alpha^2 \cdot dT^2}{4R_i}$$

Piezoelektrische Vibrationswandler

Elektromechanische Wandler nutzen die in der Umgebung vorhandene kinetische Energie, um diese über einen geeigneten Mechanismus in elektrische Energie zu überführen. Kinetische Energie ist in Form von Vibrationen an Maschinen, Gebäuden oder Fahrzeugen verfügbar. Die Konvertierung in elektrische Energie erfolgt unter Nutzung der Wirkprinzipien der Piezoelektrik, aber auch der Elektrostatik und Induktivität. Piezoelektrische Funktionswerkstoffe werden hierbei in der Regel in resonanten, schwingfähigen Systemen eingesetzt (BENECKE et al. 2013). Abb. 4.75 zeigt schematisch den Aufbau einer solchen Einheit.

An einem einseitig eingespannten Bimorph werden über den Transversaleffekt Ladungsträger auf den Elektrodenflächen piezoelektrischer Keramiken erzeugt, wenn diese mechanische Zug- bzw. Druckbelastung quer zur polaren Achse erfahren. In Kombination mit den kapazitiven Eigenschaften der Keramiken führt der direkte piezoelektrische Effekt damit zur Ausbildung einer elektrischen

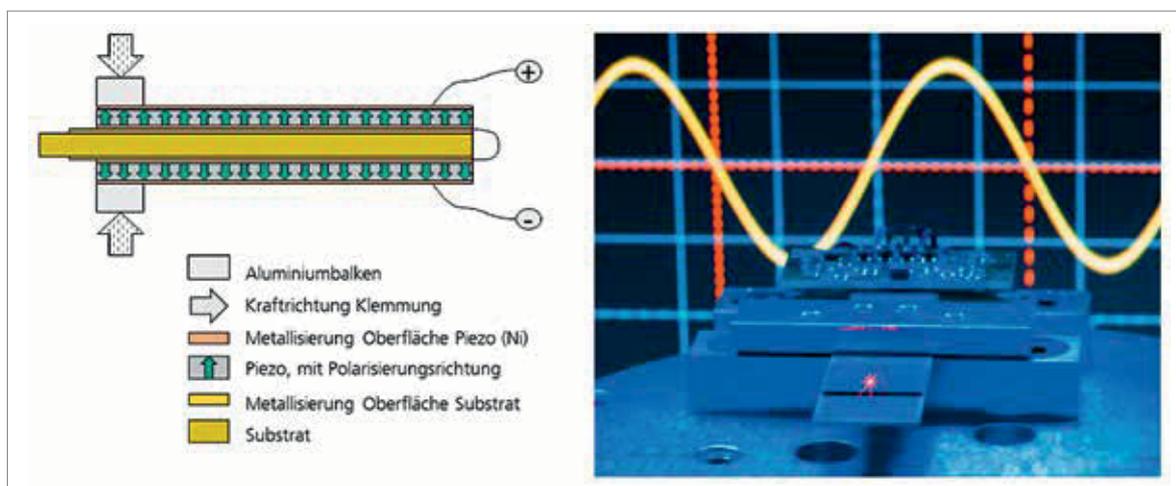


Abb. 4.75: Piezoelektrische Energiewandler, links: Schematischer Aufbau, rechts: schwingendes System auf Vibrationsteststand (Quelle: FRAUNHOFER IZM)

Spannung. Die Entnahme einer elektrischen Leistung wirkt sich dabei dämpfend auf das Feder-Masse-System aus, so dass diese über die Einführung eines elektrischen Dämpfungsglieds nach Formel 2 abgeschätzt werden kann. Die Ausgangsspannung piezoelektrischer Wandler ist bei harmonischer Anregung eine Wechselspannung, deren Amplitude von der elektrischen Beschaltung sowie der Intensität der auftretenden Vibrationen des übergeordneten technischen Systems bestimmt wird. Tragbare Effizienz wird erst bei Anpassung der natürlichen Resonanzfrequenz des Wandlers an das Vibrationsprofil der Anwendung sowie hinreichende Auslenkungsamplituden x der effektiven Masse des Biegebalkens erzielt. Mikrosystemtechnisch abgeschiedene piezoelektrische Werkstoffe wurden bereits als in MEMS mit niedrigen, aber dennoch nutzbaren Ausgangsleistungen präsentiert (MICROGEN o. J.).

Formel 2: Abschätzung der an schwingfähigen Energiewandlern erzielbaren Leistung

$$P_{el} \approx \frac{1}{2_i} b_{el} \dot{x}^2$$

Induktive Energiewandler

Die Wandlung in elektrische Energie erfolgt hier über das Induktionsgesetz nach Faraday, wonach elektrische Spannung in einer Leiterschleife mit N

Windungszahlen induziert wird, die von einem sich zeitlich ändernden magnetischen Fluss θ durchdrungen wird. Entsprechend lässt sich die erzielbare Leistung über einem elektrischen Widerstand nach Formel 3 abschätzen.

Formel 3: Abschätzung der an induktiven Energiewandlern erzielbaren Leistung

$$P_{el} \approx \frac{1}{R} \left(N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \right)^2$$

Induktive Wandler werden durch die Montage diskreter Komponenten, d. h. Spulen und Permanentmagneten in einer schwingfähigen bzw. rotierenden Struktur hergestellt. Die Notwendigkeit hoher Windungszahlen zum Erzielen hoher elektrischer Spannungen führt zwangsläufig zu Einschränkungen bei der Anwendung mikrotechnischer Verfahren für die Herstellung von Planarspulen. Ebenfalls ist die Abscheidung hartmagnetischer Schichten zurzeit nicht etabliert (GERLACH 2006). Feinwerktechnische Wandler zur Generation von wenigen mW aus Vibrationen in Transportmitteln wie Hubschraubern oder Lastkraftwagen sind kommerziell verfügbar (PERPETUUM o. J.).

Abb. 4.76 zeigt die exemplarische Applikation eines induktiven Generators in Schienenfahrzeugen. Der magnetische Kreis wird hier durch eine strukturierte rotierende Scheibe zeitlich verändert.

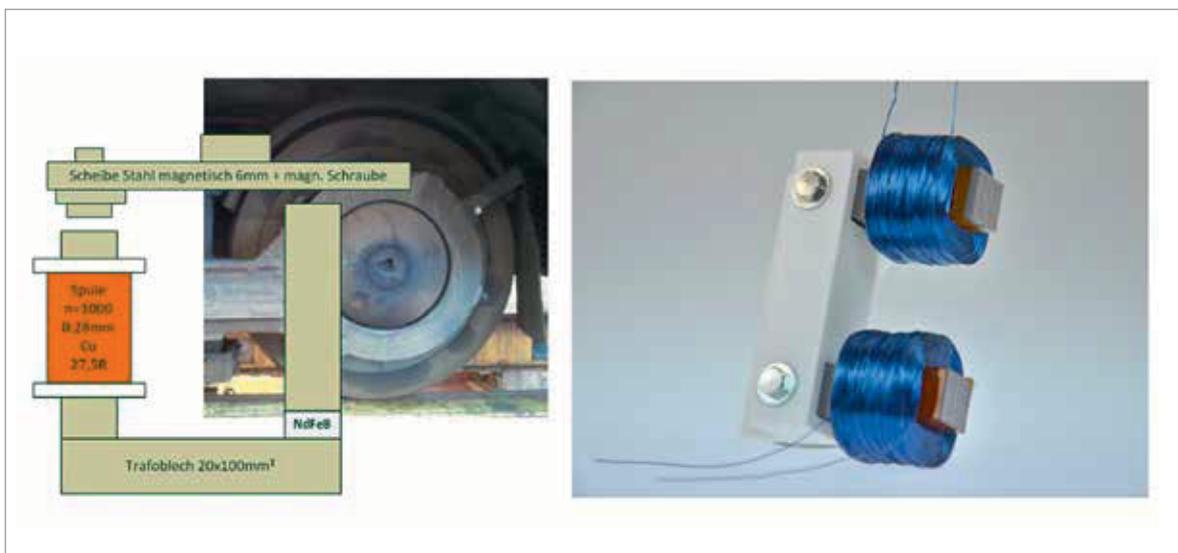


Abb. 4.76: Rechts: Induktiver Wandler für die Verwendung an Radlagern, links: Wirkprinzip (Quelle: FRAUNHOFER IZM)

4.28.2 Rohstoffinhalt

Thermoelektrische Wandler

Funktionswerkstoffe auf Basis von Wismut-Tellurit (Bi_2Te_3) sowie den Mischkristallen, welche Bi_2Te_3 mit Wismut-Selen und Antimon-Tellurit bildet, stellen optimale Ausgangsmaterialien für mit Mikroelektronik kompatible thermoelektrische Anwendungen bei Raumtemperatur dar (BÖTTNER 2007). Ein gängiges Verfahren zur Züchtung der dotierten Bi_2Te_3 -Kristalle ist das Bridgman-Verfahren, wobei die einzelnen Thermopaarschenkel anschließend aus dem Kristall gesägt und zwischen zwei metallisierten Keramiksubstraten verlötet werden. Hierzu werden Al_2O_3 bzw. AlN -Substrate, eine Cu-Metallisierung mit Ni-Au-Finish sowie SnSb-Lote (KELK o. J.) eingesetzt. Eine Ummantelung aus Silikon bietet Schutz vor Feuchtigkeit und Schmutzpartikeln.

Die Materialzusammensetzung eines entsprechenden Thermoelements der Kantenlänge $20 \times 20 \text{ mm}^2$ und Höhe von 3,6 mm ist in Tab. 4.70 zusammengeführt. Die Materialaufschlüsselung wird im Folgenden für die Hochrechnung des Rohstoffbedarfs für thermoelektrische Wandler angesetzt, da mit einer entsprechenden Einheit potenziell hinreichende Leistungen zum Betrieb mikroelektronischer Systeme erzeugt werden können. Die physikalische Einheit kann darüber hinaus als typisch für sensorische Anwendungen bezeichnet werden.

Piezoelektrische Vibrationswandler

Aufgrund der hohen erzielbaren Piezokoeffizienten für den Longitudinal- sowie Transversalleffekt haben sich piezoelektrische Keramiken wie Barium-Titanat (BaTiO_3), vor allem aber PZT (Blei-Zirkonat-Titanat $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$) für die piezoelektrischen Energiewandlung durchgesetzt. Bei der PZT-Keramik handelt es sich um einen Mischkristall aus Bleizirkonat (PbZrO_3) sowie Bleititanat (PbTiO_3), der mit verschiedenen Zusätzen in geringen Konzentrationen zur Anpassung der Materialeigenschaften erhältlich ist (IVERS-TIFFÉE 2004).

Für Bimorphstrukturen werden Piezokeramiken direkt auf metallischen Substraten gesintert bzw. in konfektionierten Verbundwerkstoffen geklebt. Die Herstellung der massiven Keramiken erfolgt nach der Formgebung aus Pulvern mit Korngrößen im μm -Bereich in einem Sinterprozess bei ca. $1.300 \text{ }^\circ\text{C}$ (PZT). Anschließend werden die Dipole der Kristallite im elektrischen Feld ausgerichtet. Für sensorische Anwendungen typische Leistungen um etwa 1 mW können mit einer in Tab. 4.71 beschriebenen Cantilever-Struktur erzielt werden und dienen daher als funktionale Einheit für die Untersuchung des Rohstoffbedarfs.

Induktive Wandler

Für die Herstellung induktiver Wandler sind als Grundelemente Spulen und Permanentmagnete

Tab. 4.70: Exemplarische Zusammensetzung eines Thermoelements (eigene Abschätzung)

| Komponente | Zusammensetzung * In Legierung vorliegend | Gewicht pro Einheit [mg] | Anteil [%] |
|------------------------------|--|-----------------------------|----------------|
| Träger | Substrate, Al_2O_3 | 2.978,6 | 50,7 % |
| Funktionswerkstoff | Thermoschenkel, Bi* | 787,1 | 13,4 % |
| | Thermoschenkel, Te* | 1.157,5 | 19,7 % |
| | Thermoschenkel, Sb* | 312,5 | 5,3 % |
| | Thermoschenkel, Se* | 34,7 | 0,6 % |
| Verdrahtung | Metallisierung, Cu | 283,2 | 4,8 % |
| | Metallisierung, Ni (Finish) | 18,0 | 0,3 % |
| | Metallisierung, Au (Finish) | 1,9 | 0,0 % |
| Elektrische Kontaktierung | Lot, Sn* | 285,0 | 4,9 % |
| | Lot, Sb* | 15,0 | 0,3 % |
| | Gesamt | 5.873,6 | 100,0 % |

Tab. 4.71: Exemplarische Zusammensetzung eines piezoelektrischen Wandlers (eigene Abschätzung)

| Komponente | Zusammensetzung * In Legierung vorliegend | Gewicht pro Einheit [mg] | Anteil [%] |
|----------------------|--|-----------------------------|----------------|
| Träger | Federstahl, Fe* | 11.100,66 | 37,7 % |
| | Federstahl, C* | 1,53 | 0,0 % |
| | Federstahl, Si* | 153,10 | 0,5 % |
| | Federstahl, Mn* | 153,10 | 0,5 % |
| | Federstahl, P* | 3,44 | 0,0 % |
| | Federstahl, S* | 1,15 | 0,0 % |
| | Federstahl, Cr* | 2.908,94 | 9,9 % |
| | Federstahl, Mo* | 61,24 | 0,2 % |
| | Federstahl, Ni* | 918,61 | 3,1 % |
| | Federstahl, N* | 8,42 | 0,0 % |
| Funktionswerkstoff | PZT, PbO* | 5.251,64 | 17,8 % |
| | PZT, ZrO ₂ * | 1.544,60 | 5,2 % |
| | PZT, TiO ₂ * | 772,30 | 2,6 % |
| | PZT, La ₂ O ₃ * | 154,46 | 0,5 % |
| Elektrischer Kontakt | Elektroden, Ni | 46,65 | 0,2 % |
| Mechanischer Kontakt | Einspannung, Al | 6400 | 21,7 % |
| | Gesamt | 29.479,85 | 100,0 % |

zu betrachten. Für Spulen werden insbesondere zur Verminderung der ohmschen Verluste Materialien mit niedrigem spezifischem Widerstand eingesetzt. Für feinwerktechnische Systeme sind dies üblicherweise Standardkomponenten, die

durch Wicklung eines Kupferdrahtes um einen weichmagnetischen Kern oder als reine Leiter-schleifen hergestellt werden. Typische weichmagnetische Materialien sind Eisenlegierungen, z. B. Elektroblech. Um hohe magnetische Flussdich-

Tab. 4.72: Exempleplarische Zusammensetzung eines induktiven Wandlers (eigene Abschätzung)

| Komponente | Zusammensetzung *In Legierung vorliegend | Gewicht pro Einheit [mg] | Anteil [%] |
|--------------------|---|-----------------------------|----------------|
| Halterung | Polymer | n.a. | n.a. |
| Spule | Draht, Cu | 66.820,0 | 36,4 % |
| | Isolierung | n. a. | n. a. |
| Funktionswerkstoff | Permanentmagnet, Nd* | 4.455,0 | 2,4 % |
| | Permanentmagnet, Fe* | 8.775,0 | 4,8 % |
| | Permanentmagnet, B* | 180,0 | 0,1 % |
| | Permanentmagnet, Ni* | 60,0 | < 0,1 % |
| | Permanentmagnet, Cu* | 30,0 | < 0,1 % |
| | Permanentmagnet, Dy* | 600,0 | 0,3 % |
| | Permanentmagnet, Co* | 750,0 | 0,4 % |
| Magnetischer Kreis | Elektroblech, Fe | 100.927,5 | 54,9 % |
| | Elektroblech, Si | 1.122,6 | 0,6 % |
| | Gesamt | 183.720,0 | 100,0 % |



Abb. 4.77: Thermoelektrisch betriebenes Condition Monitoring System in der Anwendungsumgebung Papierfabrik (Quelle: NIEDERMAYER et al. 2014)

ten zu erzeugen, werden für Permanentmagnete hartmagnetische Materialien eingesetzt, die sich durch eine hohe Remanenz B_R und Koerzitivfeldstärke H_c auszeichnen. Dazu zählen vornehmlich Legierungen aus Samarium-Kobalt und aus Neodym-Eisen-Bor (IVERS-TIFFÉE 2004). Dabei kommen Verbindungen aus SmCo bevorzugt unter hohen Betriebstemperaturen zum Einsatz. Auf Grund der hohen magnetischen Energiedichte sind Verbindungen aus NdFeB für den Einsatz in miniaturisierten induktiven Wandlern besonders gut geeignet. Um eine Entmagnetisierung bei erhöhten Temperaturen ab 80 °C zu verhindern, ist die Zugabe von Dysprosium bzw. Terbium erforderlich. Zusätze von Kobalt erhöhen darüber hinaus die Korrosionsstabilität. Entsprechende Konzentrationen in der Legierung lassen sich daher in typischen Magnetwerkstoffen (KJMAGNETICS o. J.) identifizieren. Halterungen für die feinwerktechnischen Komponenten werden zur Gewichtsreduzierung typischerweise aus Kunststoff ausgeführt. Tab. 4.72 enthält die exemplarische Materialaufschlüsselung eines am Fraunhofer IZM entwickelten Wandlers für die Applizierung und den Betrieb sensorischer Einheiten zur Zustandsüberwachung an Radsatzlagern von Schienenfahrzeugen.

4.28.3 Foresight industrielle Nutzung

Die industrielle Nutzung von Energy Harvesting Systemen für drahtlose Sensoren wird in den kommenden Jahren signifikant zunehmen. Beispiele für die industrielle Anwendung autark betriebener Sensorik finden sich vor allem im Bereich der Zustandsüberwachung mechatronischer Kom-

ponenten sowie von Betriebsparametern an Anlagen für eine effiziente Regelung von Prozessen. Abb. 4.77 zeigt die exemplarische Integration eines thermoelektrischen Energiewandlers in ein mikrosystemtechnisches Sensorsystem zur Überwachung kritischer Parameter an Antrieben einer Papiermaschine. Der thermische Pfad des integrierten Thermoelements wird dabei über das Gehäuse realisiert.

Neben Produktionsumgebungen werden autarke Energieversorgungssysteme zukünftig auch im Bereich der Transportmittelüberwachung eine Schlüsselrolle in der Erschließung neuer Anwendungen einnehmen. Darunter fällt die Einbindung der Datenerfassung in das Internet der Dinge für die Durchführung von Ferndiagnosen und die Echtzeitaufnahme von Datenhistorien nach Abb. 4.78. Darüber hinaus bieten die eingangs genannten Anwendungen, z. B. die verteilte Messdatenerfassung von Umweltdaten sowie die Gebäudetechnik, hohes Entwicklungspotenzial für das Micro Energy Harvesting.

Dem einerseits wachsenden Bedarf nach kabellosen, integrierbaren technischen Lösungen für die Energieversorgung stehen derzeit noch Kosten, begrenzte Leistungsdichte und fehlende Entwicklungsroutinen zur Einbindung von Micro Energy Harvestern im Systementwurf gegenüber. Für zukünftige Marktentwicklungen sind jedoch die fortschreitende Entwicklung zu leistungsarmen Prozessorarchitekturen, ökonomischen Skaleneffekten bei der Herstellung der Wandler sowie Effizienzsteigerungen im Energy Harvesting in Kombination mit der nachgelagerten Energiewandlungskette zu berücksichtigen. Dabei wird die fort-

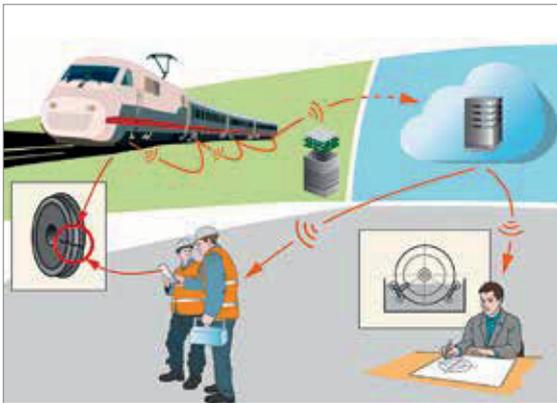


Abb. 4.78: Integration von autarker Sensorik für die Zustandsüberwachung von Transportmitteln
(Quelle: NIEDERMAYER et al. 2014)

schreitende Verschlankung der Systembauweise in Kombination mit sinkenden Stückpreisen den Entwicklungstrend zu autonomen Wandlern weiter unterstützen und die Attraktivität gegenüber konventionellen Batterielösungen erhöhen.

Hochrechnungen aus dem Jahr 2011 beziffern den Marktwert von Energy Harvestern für drahtlose Sensoren auf 13,75 Mio US\$ bei einer Stückzahl von 1,6 Mio Energiewandlern über die verfügbare Bandbreite der diskutierten Wandlertypen (IDTECHEx 2015a). Gleichzeitig kommt es zu einer annähernden Angleichung der prozentualen Anteile von induktiven, piezoelektrischen und thermoelektrischen Wandlern mit einem geringfügigen Anteil photovoltaischer Wandler (Abb. 4.79). Diese Entwicklung lässt sich aus der Beobachtung der Marktanteile im Zeitraum zwischen 2014–2016 ableiten (IDTECHEx 2015b). Am Marktwert bemessene jährliche Wachstumsraten werden mit 46 % (IDTECHEx 2015c) im Zeitraum von 2018–2022 für piezoelektrische Wandler; durchschnittlich 31 % (INFINERGIA CONSULTING 2015) im Zeitraum von 2012–2019 für thermoelektrische Wandler beziffert. Gleichzeitig werden Preisreduktionen z. B. für thermoelektrische Module von bis zu 45 Prozent pro Jahr prognostiziert.

Diese Hochrechnungen umfassen neben dem in diesem Abschnitt adressierten Bereich industrieller Funksensoren auch Consumer Produkte, z. B. piezoelektrische Wandler für elektrische Feuerzeuge und thermoelektrische Wandler für Leistungsbereiche oberhalb von einem Watt (z. B. Generatoren

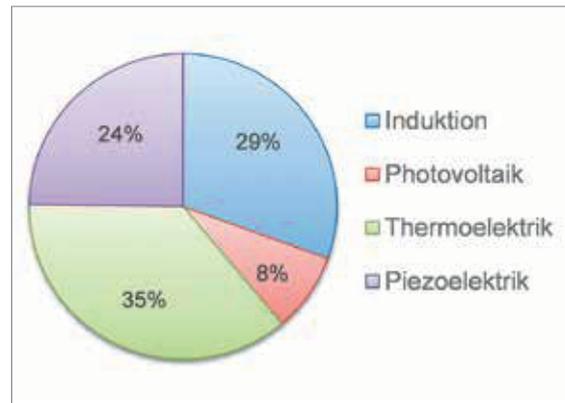


Abb. 4.79: Prozentuale Marktanteile der Wirkprinzipien im Jahr 2016
(Quelle: IDTECHEx 2015b)

mit Verbrennungsquelle). Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Entwicklungen im Micro Energy Harvesting von sinkenden Produktionskosten, Effizienzsteigerungen und Marktdurchdringung des absoluten Marktvolumens profitieren werden.

Basierend auf den im vorigen Abschnitt diskutierten, öffentlich zugänglichen Zahlen ist im Jahr 2011 von 1,6 Mio. Energy Harvesting Einheiten auszugehen. Bei Annahme gleicher Anteile induktiver, piezoelektrischer und thermoelektrischer Wandler ergeben sich etwa jeweils 500.000 Einheiten der entsprechenden Technologien. Da keine eindeutigen Prognosewerte für die Entwicklung der Stückzahlen der einzelnen Prinzipien des Energy Harvestings bis zum Jahr 2035 vorliegen, wird für die Hochrechnung des Rohstoffbedarfs eine jährliche Wachstumsrate von 30 % für die drei Prinzipien (induktiv, piezoelektrisch und thermoelektrisch) angenommen. Die angenommene Wachstumsrate spiegelt die steigende Nachfrage nach diesen Zukunftstechnologien dar, welche sich kurz nach bzw. gerade in der Markteinführung befinden. Die stetig sinkende Anwendungshürde durch optimierte Entwicklungsmethoden sowie kompatible schaltungstechnische Lösungen wird damit auch langfristig zu steigendem Umsatz im Micro-Energy Harvesting führen. Durch die hohe Dynamik dieser jungen Technologien ist jedoch zum heutigen Zeitpunkt schwer abschätzbar wann eine Sättigung in der Nachfrage autarker Sensoren einsetzen wird, so dass es sich lediglich um Schätzungen handeln kann. Aus den Überlegungen ergeben sich die in Tab. 4.73 produzierten Stückzahlen in den Jahren 2012 und 2035.

Tab. 4.73: Jährlich verkaufte Micro Energy Harvester für Industriesensorik

| | 2012 | 2035 |
|---|-----------|----------|
| Gesamtstückzahl umgesetzter Micro Energy Harvester | 1,95 Mio. | 813 Mio. |
| Verteilung nach Prinzipien (Induktion, Piezoelektrik, Thermoelektrik) | 1:1:1 | 1:1:1 |

4.28.4 Foresight Rohstoffbedarf

Basierend auf den definierten Stückzahlen aus Tab. 4.73 wurden die für die einzelnen Technologien ermittelten Referenzdatensätze für kritische Rohstoffe aus Abschnitt 4.28.2 für die Jahre 2013 und 2035 hochskaliert und mit den Förderquoten aus dem Jahr 2013 verglichen (Tab. 4.74).

Auf Grund der im Jahr 2013 noch niedrigen Absatzzahlen fallen die agglomerierten Stoffmengen im Vergleich zur Gesamtförderquote nicht signifikant ins Gewicht. Bei Annahme gleichbleibender Materialzusammensetzung, Förderquote und hochskalierter Stückzahl entsteht im Jahr 2035

für Neodym und Dysprosium jedoch ein nennenswerter Bedarf an diesen kritischen Ressourcen. Dabei liegt die geschätzte Menge für Dysprosium im Zukunftsszenario bei etwa 10 % der geförderten Gesamtmenge. Auch wenn die Schätzung der zu erwartenden aggregierten Stoffmengen einer hohen Schwankungsbreite unterlegen ist, stellen die Zahlen einen ersten Anhaltspunkt für potenzielle zukünftige Entwicklungen dar, die im weiteren Verlauf kritisch beobachtet werden sollten.

Bei der vorliegenden Schätzung der Rohstoffmengen ist zunächst zu beachten, dass die Nachfrage an drahtlosen Sensoren für den industriellen Einsatz der Haupttreiber für den Bedarf an autarken Energieversorgungsmodulen darstellt und durch dessen Entwicklungszweig daher maßgeblich getrieben wird. Der Anteil an Micro-Energy Harvesting Modulen in diesen Systemen wird durch die Bereitschaft zur Investition in innovative Energy-Harvesting Lösungen mit entsprechend erhöhtem Entwicklungsaufwand gegenüber konventionellen, batteriebetriebenen Systemen entschieden. Die technologische Hürde zur Einbindung in die Applikation sinkt dabei tendenziell mit fortschreitender Steigerung von Effizienz und Zuverlässigkeit sowie der Weiterentwicklung von entwicklungsbegleitenden Designmethoden. Der mit steigenden Produktionsvolumina einherge-

Tab. 4.74: Globale Produktion 2013 (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf für den Einsatz induktiver, piezoelektrischer und thermoelektrischer Energy Harvester in t

| Rohstoff | Produktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|------------------|----------------------------------|-------------|----------------------|
| Antimon | 160.865 (B) | 0,2 | 84,7 |
| Selen | 2.709 (R) | < 0,1 | 9,4 |
| Zinn | 289.790 (B) 362.996 (R) | 0,2 | 77,2 |
| Chrom | 13.422.102 (B) ¹ | 1,9 | 788,3 |
| TiO ₂ | 4.708.500 (B) | 0,5 | 209,3 |
| Kupfer | 18.365.341 (B) 21.446.333 (R) | 43,4 | 18.184,8 |
| Neodym | 28.900 ² | 2,9 | 1.207,3 |
| Dysprosium | 1.900 ² | 0,4 | 162,6 |
| Kobalt | 129.763 (B) 85.904 (R) | 0,5 | 203,3 |

B: Bergwerksförderung

R: Raffinadeproduktion

¹ berechnet aus Chromit, USGS 2015d

² Metallproduktion berechnet aus den SEO, Schätzung inkl. illegaler Förderung in China (Quelle: KINGSNORTH 2015)

hende Preisverfall wird darüber hinaus entsprechende Hebelwirkungen auf die technologiespezifische Nachfrage ausüben.

4.28.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Im Entwicklungsprozess autarker Sensoren rückt die Energieversorgungseinheit zukünftig immer stärker in den Fokus der ganzheitlichen Systembetrachtung. Der hier angesetzte Materialmix für die diskutierten Energiewandler basiert auf für den heutigen Stand typische Rohstoffmengen bei der Realisierung autarker Systeme und stellt eine statische Aufnahme und Hochskalierung der Technologiebeschreibung dar. Mit fortschreitender Entwicklung von energieeffizienten mikroelektronischen Sensoren, Prozessoren, Speichern und Kommunikationsbausteinen rücken in hochintegrierten Sensorpackages zukünftig MEMS-(MicroElectro-Mechanical System) Wandler in den Vordergrund der Betrachtung miniaturisierter Systeme. Während hier vergleichbare Materialsysteme (PZT Dünnschichten für piezoelektrische Komponenten, Bi_2Te_3 für Dünnschichten in thermoelektrischen Wandlern und hartmagnetische Werkstoffe zur Applikation am Backend der MEMS-Prozessierung) eingebracht werden, wird dadurch die absolute Menge der stofflichen Zusammensetzung pro Wandlerbaustein weiter reduziert. Für die Betrachtung des Rohstoffbedarfs ist dann die Betrachtung der gesamten Prozesskette unumgänglich, um den erforderlichen Overhead im Materialbedarf bei der Bulk- und Oberflächenprozessierung der Substrate in der Materialbilanzierung zu berücksichtigen.

Substitute für piezoelektrische Wandler werden in Form bleifreier Funktionswerkstoffe weiterentwickelt, die derzeit zwar geringere Leistungsdichten, jedoch weniger toxische Inhaltsstoffe aufweisen (z. B. BaTiO_3). Für thermoelektrische Wandler sind SiGe Verbindungen in Hochtemperaturanwendungen zukünftig von weiterem Interesse. Alternative Magnetwerkstoffe zu NdFeB bieten in Hochtemperaturanwendungen Verbindungen auf Basis von SmCo, welche jedoch durch den hohen Eintrag von Kobalt entsprechend neue Umweltproblematiken nach sich ziehen.

Während sich mikrotechnisch gefertigte Systeme prinzipiell händisch fraktionieren lassen und damit zunächst eine Aufkonzentrierung der rückzugewinnenden Werkstoffe erlauben, wird die Rückgewinnung der kritischen Werkstoffe mit zunehmendem Miniaturisierungsgrad tendenziell erschwert. Weiterhin ist sowohl für feinwerktechnische als auch mikrosystemtechnische Module für eine geeignete Rückführung in die Kreislaufwirtschaft zu sorgen, um einer Dissipation der Werkstoffe in Langzeitanwendungen mit starker örtlicher Verteilung der Sensoren in Umwelt und großtechnischen industriellen Anlagen entgegenzuwirken.

4.29 Windkraftanlagen

4.29.1 Technologiebeschreibung

Die Gewinnung von elektrischer Energie aus Wind ist eine bewährte Technologie. Dennoch werden aufgrund politischer Förderung global ungewöhnlich hohe Zuwachsraten bis 2035 erwartet. Neue Generatortechnologien könnten den Materialbedarf verändern. Aufbau und Dimension einer Windkraftanlage (WKA) sind in Abb. 4.80 dargestellt.

Generatortechnologien

Senkrecht auftreffender Wind versetzt die speziell geformten Rotorblätter einer Windkraftanlage durch dynamischen Auftrieb in Rotation. Die mechanische Energie der Rotationsbewegung wird im Generator in elektrische Energie umgewandelt. Dazu liegt am Rotor des Generators ein Magnetfeld an. Die Rotation des Magnetfeldes induziert in den Leiterwicklungen des umgebenden Stators einen Stromfluss, so dass elektrische Energie gewonnen werden kann. Laufen Rotor und Magnetfeld synchron, spricht man von einem Synchrongenerator. Eilt der Rotor dem Magnetfeld voraus, bezeichnet man den Generator als Asynchrongenerator. Bei permanentmagnetisch erregten Generatoren wird das Magnetfeld am Rotor durch Anbringung von Dauermagneten (NdFeB-Magneten, s. auch Kapitel 4.38) gewährleistet. In elektrisch erregten Generatoren wird das Magnetfeld über stromdurchflossene Kupferspulen induziert (Lorentzkraft). Dazu wird elektrische Energie benötigt, die allerdings deutlich kleiner als die am Ende gewonnene elektrische Energie ist.

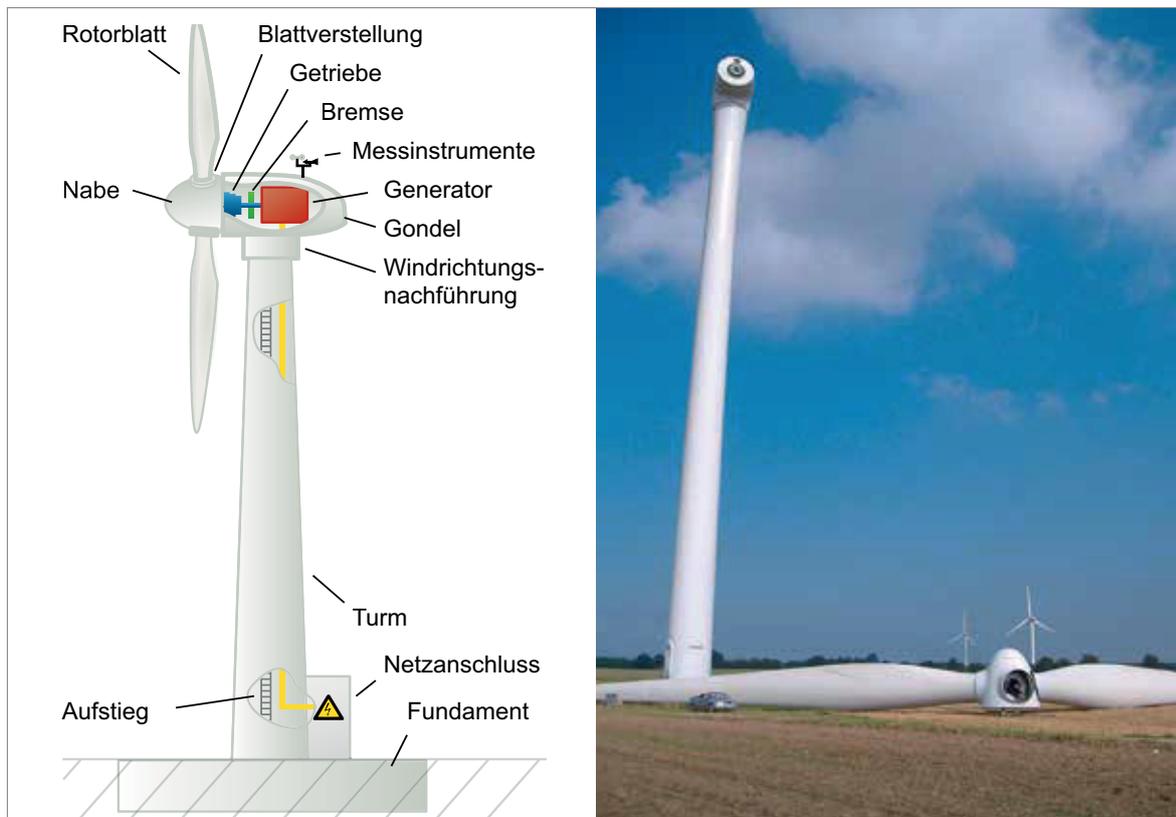


Abb. 4.80: Aufbau und Dimension einer Windkraftanlage (Quelle links: Arne Nordmann, WIKIMEDIA, CC BY-SA 3.0; rechts: Karle Horn, WIKIMEDIA, CC BY-SA 3.0)

Bei direkt angetriebenen und somit getriebelosen Windkraftanlagen („Direct Drive“) ist der Generator direkt an die Rotorwelle angeschlossen und hat somit die gleiche Umdrehungszahl wie die Rotorblätter der Windkraftanlage. Höhere Umdrehungszahlen so genannter High-Speed-Windkraftanlagen werden durch ein Getriebe zwischen Rotor und Generator bewerkstelligt. Dies ermöglicht eine platz-, gewichts-, material- und kostensparende Auslegung des Generators. Ein Getriebe kann allerdings 25 % der Kosten einer Windkraftanlage ausmachen, erhöht Störanfälligkeit und Wartungsbedarf der Anlage und senkt den Wirkungsgrad der Energiegewinnung (VIEBAHN et al. 2014). Als „Hybrid“ zwischen Direct-Drive- und High-Speed-WKA gelten Middle-Speed-Windkraftanlagen mit einem niedrig übersetzenden Getriebe ohne störanfällige Kupplung.

Derzeit werden WKA-Generatoren entwickelt, in denen die elektrischen Wicklungen zur Erzeugung des Magnetfeldes aus Hochtemperatursupraleitern (HTS, s. auch Kapitel 4.37) bestehen. Da diese Hochtemperatursupraleiter einen viel

geringeren elektrischen Widerstand als Kupfer haben, erhöht ihr Einsatz bei gleichem Gewicht die magnetische Feldstärke und somit die Generatorleistung. So könnten in einer 10 MW-Anlage 50 % des Generatorgewichts gegenüber einer permanentmagnetischen „Direct Drive“ Windkraftanlage eingespart werden (BUCHERT 2011, VIEBAHN et al. 2014, BINE INFORMATIONSDIENST 2011a, 2011b).

Ebenfalls in der Entwicklung befinden sich Reluktanz-Generatoren, deren Wirkung nicht auf der Lorentzkraft, sondern auf magnetischem Widerstand (Reluktanz) beruht (VIEBAHN et al. 2014).

Tab. 4.75 fasst derzeit für Windkraftanlagen eingesetzte oder entwickelte Generortechnologien zusammen. Generatorarten, die nicht für Windkraftanlagen relevant sind, werden nicht berücksichtigt.

Tab. 4.75: Verschiedene Antriebstechnologien, die derzeit in WKA im Einsatz sind oder für WKA entwickelt werden (kursiv)

| | AsynchronGeneratoren | SynchronGeneratoren |
|-----------------------------|-----------------------|--|
| Elektrisch erregt | Getriebe (High Speed) | Direct Drive <i>High Temperature Superconductor</i> |
| Permanent-Magnetisch erregt | | Getriebe (High Speed) |
| | | Getriebe (Middle Speed) |
| | | Direct Drive |
| Reluktanz-getrieben | | <i>Reluktanz-Generator</i> |

Kenngößen

Die übliche Kenngröße einer Windkraftanlage ist ihre maximale Leistung („Nennleistung“). Die tatsächlich durch eine Windkraftanlage erzeugte Leistung ist abhängig vom Wind und somit vom Standort sowie von saisonalen und täglichen Änderungen. Ein Kapazitätsfaktor gibt daher das Verhältnis von durchschnittlich erzeugter Leistung zu Maximalleistung an (IEA 2013c).

Onshore und Offshore

Windkraftanlagen an Land („Onshore“) befinden sich bereits in der breiten Anwendung. Mit Windkraftanlagen auf See („Offshore“) eröffnet sich seit einigen Jahren ein neuer Technologiezweig. Da in beiden Segmenten anhaltend hohe Wachstumsraten erwartet werden, betrachten wir in dieser Synopse beide Technologiezweige. Aufgrund unterschiedlicher äußerer Bedingungen werden die Marktanteile der in Tab. 4.75 zusammengefassten Generatortechnologien in beiden Segmenten verschieden sein, wie im Abschnitt 4.29.3 näher diskutiert wird.

Die Vorteile der Offshore-Windenergiegewinnung ergeben sich aus höheren und kontinuierlicheren Windgeschwindigkeiten auf See. Nachteilig sind dagegen höhere Kosten für Installation (Transport, Fundamentierung), Wartung und Netzanschluss (BRADSHAW et al. 2013, IEA 2013c) sowie eine stärkere Belastung der Bauteile durch salzige Luft (Moss et al. 2011).

Offshore-WKA erreichen Kapazitätsfaktoren von 30–45 %. Mit Abstand von der Küste steigt der Kapazitätsfaktor, jedoch auch die Kosten für Installation, Wartung und Netzanschluss (IEA

2013c). Für Onshore-WKA sind Kapazitätsfaktoren von 20–35 % im Jahresdurchschnitt typisch. Sehr geeignete Installationsplätze können 45 % und mehr erreichen (IEA 2013c).

Besonders interessant sind Offshore-Windkraftanlagen für Länder wie Deutschland, in denen wirtschaftlich lohnende Standorte für Windkraftanlagen an Land bereits als ausgeschöpft gelten und somit ein weiterer Ausbau nur Offshore oder durch Repowering stattfinden kann. Repowering bezeichnet den Austausch bereits installierter Windkraftanlagen durch neuere Modelle mit höherer Nennleistung.

4.29.2 Rohstoffinhalt

Materialbedarf Massenrohstoffe

Welche Werkstoffe in welchen Teilen der Windkraftanlagen zum Einsatz kommen, zeigt Abb. 4.81. Verbundwerkstoffe werden in dieser Studie nicht näher betrachtet, da es sich dabei um erdöl-basierte Rohstoffe handelt. In Tab. 4.76 sind Schätzungen zum Materialbedarf pro installierter Nennleistung in Megawatt (MW) zusammengefasst. Die starken Unterschiede in den Werten ergeben sich größtenteils aus anderen Bezugssystemen (On- oder Offshore, mit oder ohne Fundament).

Zusätzlich zum Kupferbedarf für die Windkraftanlage fallen laut HARMSSEN et al. (2013) für Hochspannungsgleichstromkabel 5,7 t/MW Kupfer sowie für den Ausbau des Übertragungsnetzes 2,2 Megatonnen (Mt) Kupfer pro transportiertem Exajoule (EJ) Energie an. Somit werden 95 % des Kupferbedarfs für Windenergie nicht für den Anlagenbau, sondern für den Netzausbau benötigt. Ursache dafür ist, dass günstige Standorte für die

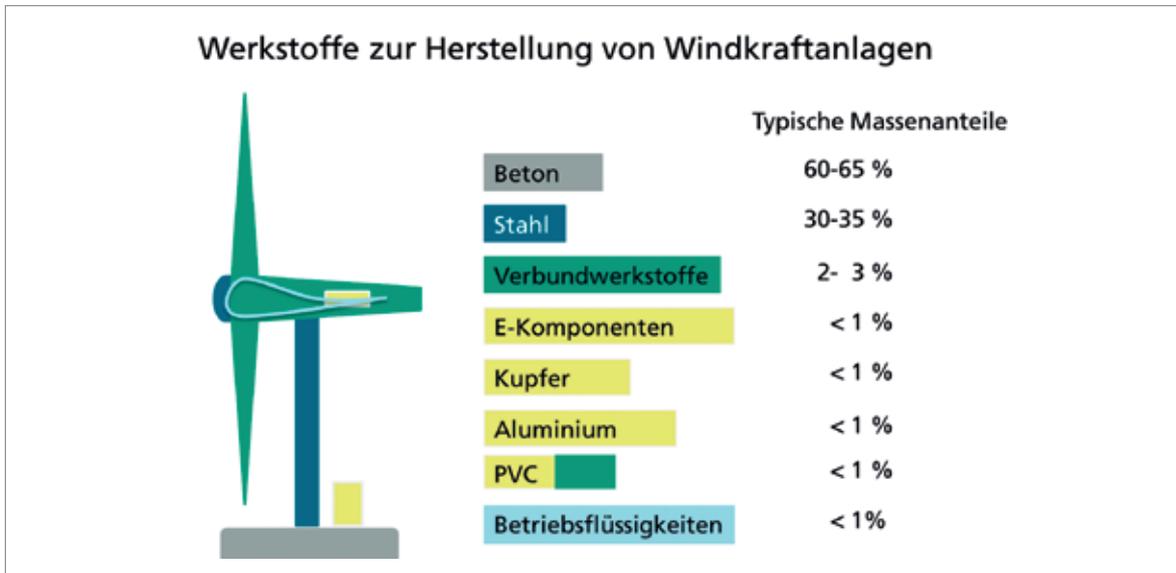


Abb. 4.81: Materialbedarf einer Windkraftanlage (Quelle: SEILER & WOIDASKY 2013)

Tab. 4.76: Materialbedarf für Windenergie in t/MW gemäß verschiedener Quellen: [A] Anhang von (MOSS et al. 2011), [B] (VALPY o. J.), [C] (KLEIJN, VAN DER VOET 2010), [D] Datensätze aus Ecolnvent, [E] (SCHRIEFL et al. 2013), [F] eigene Berechnungen, [G] (HARMSSEN et al. 2013), [H] (VIDAL et al. 2013). Für Prognosen übernommene Werte sind fett hervorgehoben

| Quelle | [A]/[B] | [C]/[D] | [C]/[D] | [E]/[B] | [E]/[D] | [F]/[C] | [G] | [H] |
|-------------|---|-------------------------|----------------|---------------------------------------|---------|---------------|------|---------------------------|
| Details | Getriebe-WKA, Off-shore, ohne Fundament | PM-DD-2 MW-Offshore-WKA | 800-kW-Onshore | Getriebe-WKA, offshore, mit Fundament | | On-shore | | On-/Offshore Durchschnitt |
| Stahl/Eisen | 115,00 | 148,00 | 135,00 | 340,00 | 140,22 | 363,95 | | 130,00 |
| Kupfer | 2,00 | 2,75 | 1,83 | | 2,29 | 4,61 | 2,00 | 1,15 |
| Aluminium | 2,00 | 0,42 | 0,26 | 2,00 | 0,34 | 2,60 | | 3,00 |
| Chrom | 0,9492 | | | | 6,5570 | | | |
| Nickel | 0,7051 | | | | 1,7570 | | | |
| Molybdän | 0,1448 | | | | | | | |
| Mangan | 0,0966 | | | | | | | |
| Zinn | | | | | 0,0004 | 0,1572 | | |
| Blei | | 3,7900 | | | 1,8950 | | | |
| Beton | | 1.050,00 | 306,00 | | | 670,99 | | 400 |
| Kies | | 150,00 | | | | | | |
| Glasfaser | 16,20 | | | | | 11,12 | | |
| Elektronik | 1,50 | | | | | | | |
| Plastik | 2,50 | 2,09 | 1,92 | | | 2,41 | | |
| Epoxidharz | | | | | | 7,37 | | |
| Öl | 1,00 | | | | | | | |

Tab. 4.77: Benötigte Magnetmasse ([A]-[D]) bzw. Seltene Erden-Elementmasse ([F]) für Windkraftanlagen verschiedener Bautypen gemäß verschiedener Quellen ([A] (VIEBAHN et al. 2014), [B] (EUROPEAN COMMISSION 2011), [C] (HOENDERDAAL et al. 2013), [D] (MOSS et al. 2011), [E] (HABIB et al. 2014) [F] (BUCHERT 2011))

| Masse in kg/MW | [A]/[B] | [C] | [D] | [E] | [F] |
|--|---------|-----|-----|-----|---------|
| Permanentmagnetisch erregte Direct Drive WKA | 650 | 642 | 700 | 660 | 160–200 |
| Permanentmagnetisch erregte Getriebe-Middle-Speed- WKA | 160 | | | | 30 |
| Permanentmagnetisch erregte Getriebe-High-Speed-WKA | 80 | | | | 30 |

Gewinnung von Windenergie weit entfernt von den Abnehmern der erzeugten Energie sein können. Da die erzeugte Energie mit den Windstärken zeitlich stark schwankt, ergeben sich eventuell weitere Materialbedarfe für Spannungstransformatoren und lokale Speicher zur Nutzung von Spitzenlasten (IEA 2013c).

Mit steigender Größe der Windkraftanlagen nehmen Materialbedarf und somit Kosten pro erzeugtem MW ab. Dies liegt daran, dass der Rotordurchmesser einer Windkraftanlage quadratisch, die mit der Nabenhöhe steigende Windgeschwindigkeit sogar kubisch in die gewonnene elektrische Leistung eingeht. Dem seit Jahren anhaltenden Trend zu immer größeren Windkraftanlagen (ROHRIG 2014) sind allerdings mit maximal realisierbaren Rotorblattspitzengeschwindigkeiten und Gondelgewichten physikalische Grenzen gesetzt (VIEBAHN et al. 2014). Daneben können bautechnische Neuerungen den spezifischen Materialbedarf senken, beispielsweise die Sandwich-Bauweise des Turms, bei der statt einem dicken Stahlrohr zwei schmalere, ineinandergreifende Stahlrohre mit einem Verbundmaterial wie Epoxidharz zum Einsatz kommen (VDI ZRE 2014). Andererseits erhöht

sich der Marktanteil von Offshore-Anlagen, die aufgrund der anspruchsvolleren äußeren Bedingungen materialintensiver sind (vgl. Tab. 4.76, Spalten 3 und 4). Derzeit gibt es zudem Überlegungen, die Rotorblätter der Offshore-WKA aus Stahl statt aus Verbundstoffen zu fertigen (VDI ZRE 2014). Aufgrund der verschiedenen Tendenzen nehmen wir hier vereinfacht an, dass die Materialbedarfe in t/MW bis 2035 insgesamt konstant bleiben.

Bedarf an Seltenerdelementen

In permanentmagnetisch erregten Generatoren von Windkraftanlagen (s. Tab. 4.75) werden NdFeB-Magneten eingesetzt, welche neben Neodym auch die Seltenerdelemente Dysprosium, Terbium und Praseodym enthalten können (s. Kapitel 4.38). Die getriebelosen Direct-Drive-Windkraftanlagen benötigen aufgrund des großen Generators deutlich höhere Magnetmassen als die High-Speed und Middle-Speed-WKA mit Getriebe. Tab. 4.77 zeigt Schätzungen der benötigten Magnetmasse pro MW, während Tab. 4.78 Annahmen zum Anteil verschiedener Seltenerdelemente gegenüberstellt. Tab. 4.79 fasst schließlich die benötigten

Tab. 4.78: Prozentualer Anteil der Seltenerdelemente an der Magnetmasse ([A]-[D]) bzw. Seltene Erden-Elementmasse ([E]) gemäß ([A] (VIEBAHN et al. 2014), [B] (EUROPEAN COMMISSION 2011), [C] (HOENDERDAAL et al. 2013), [D] (MOSS et al. 2011), [E] (HABIB et al. 2014), [F] (BUCHERT 2011))

| Anteil Seltene Erdmetalle in % | [A]/[B] | [C] | [D] | [E] | [F] |
|--------------------------------|---------|------|-----|-----|-----|
| Neodym (Nd) | 31 | 30,2 | 29 | 30 | 63 |
| Dysprosium (Dy) | 2,3 | 4,5 | 2 | 2 | 15 |
| Praseodym (Pr), Terbium (Tb) | | | | | 22 |

Tab. 4.79: Benötigte Mengen an den Seltenerdelementen Nd, Dy, Pr, Tb für Windkraftanlagen verschiedener Bautypen, welche NdFeB-Permanentmagneten enthalten (vgl. Tab. 4.75), berechnet nach Angaben unterschiedlicher Quellen ([A] (VIEBAHN et al. 2014), [B] (EUROPEAN COMMISSION 2011), [C] (HOENDERDAAL et al. 2013), [D] (MOSS et al. 2011), [E] (HABIB et al. 2014), [F] (BUCHERT 2011))

| Masse in kg/MW | [A]/[B] | [C] | [D] | [E] | [F] |
|--|---------|-------|-------|-------|---------|
| Permanentmagnetisch erregte Direct-Drive-WKA | | | | | |
| Neodym (Nd) | 201,5 | 193,9 | 211,4 | 204,6 | 101–126 |
| Dysprosium (Dy) | 15,0 | 28,9 | 14,0 | 13,2 | 24–30 |
| Praseodym (Pr), Terbium (Tb) | | | | | 35–44 |
| Permanentmagnetisch erregte Getriebe-Middle-Speed-WKA | | | | | |
| Neodym (Nd) | 49,6 | | | | 18,9 |
| Dysprosium (Dy) | 3,7 | | | | 4,5 |
| Praseodym (Pr), Terbium (Tb) | | | | | 6,6 |
| Permanentmagnetisch erregte Getriebe-High-Speed-WKA | | | | | |
| Neodym (Nd) | 24,8 | | | | 18,9 |
| Dysprosium (Dy) | 1,8 | | | | 4,5 |
| Praseodym (Pr), Terbium (Tb) | | | | | 6,6 |

Mengen an Seltenerdelementen in kg/MW aus verschiedenen Quellen für unterschiedliche Bautypen zusammen.

Die fett hervorgehobenen Werte in Tab. 4.77 werden für die Bedarfsprognosen übernommen. Es wird angenommen, dass sich diese Werte bis 2035 nicht ändern, obwohl eine Reduzierung z. B. durch Optimierung der Generatorauslegung denkbar wäre.

Einige Quellen berichten, dass für NdFeB-Magneten in Windkraftanlagen kein Dysprosium benötigt wird, da ausreichend Platz zur Kühlung vorhanden ist (ROSKILL INFORMATION SERVICES 2011). Wir gehen jedoch von einem Dysprosiumanteil von ca. 2 % aus, der auch in den meisten Quellen zu finden ist (vgl. Tab. 4.78). Da es zahlreiche Forschungsanstrengungen gibt, um den Dysprosiumanteil in NdFeB-Magneten zu reduzieren (s. Kapitel 4.38), nehmen wir für 2035 nur im Szenario „Hoher Dy-Anteil“ 2,0 % Dy an. Im Szenario „Moderater Dy-Anteil“ werden 1,5 % Dy (entsprechen 25 % Einsparung) und im Szenario „Niedriger Dy-Anteil“ 1,0 % Dy (entsprechend 50 % Einsparung) angenommen. Da sich Nd und Dy substituieren, wird der Neodymgehalt mit sinkendem Dy-Anteil steigen. Nimmt der Neodymgehalt um 1 % (absolut)

zu, ändert er sich relativ betrachtet um 3,3 %, was hier vernachlässigt wird, indem wir von 30 % Nd in allen drei Szenarien ausgehen. Substitutionsmöglichkeiten durch Pr und Tb werden in der finalen Auswertung in Kapitel 4.38 diskutiert.

Die in der Entwicklung befindlichen Hochtemperatursupraleiter-Windkraftanlagen (HTS) benötigen Yttrium, Lanthan und Cer (s. Kapitel 4.37). Allerdings sind die Bedarfe von ca. 0,002 t/MW im Vergleich zur Permanentmagnetentechnologie sehr gering (BUCHERT 29.08.11).

4.29.3 Foresight industrielle Nutzung

Ende 2014 war global eine elektrische Leistung von 370 GW in Form von Windkraftanlagen installiert, wovon 51,5 GW 2014 neu angeschlossen wurden (GWEC 2015). Für den weiteren Ausbau der Windenergiegewinnung gelten politische Rahmenbedingungen als größte Wachstumstreiber. Als größtes Hemmnis wird derzeit die Anpassung der technischen Rahmenbedingungen (Stromverteilungsnetz, Elektrizitätsspeicher) an die wetter- und standortabhängige Energieerzeugung durch Windkraftanlagen betrachtet (IEA 2013c).

Prognosen für die Entwicklung der Windenergie werden im World Energy Outlook der IEA (International Energy Agency) sowie im Global Wind Energy Outlook von GWEC (Global Wind Energy Council) und Greenpeace beschrieben. In beiden Quellen werden jeweils drei Szenarien für geringen, moderaten und starken Ausbau der Windenergie gezeichnet. Entsprechende Daten für das Jahr 2035 werden in Tab. 4.80 gegenübergestellt. Zum Vergleich enthält diese auch ein Szenario, welches einen extrem hohen Ausbau der Windenergie beschreibt (KLEIJN & VAN DER VOET 2010).

Das niedrigste Szenario im Global Wind Energy Outlook (GWEO New Policies) ist an das moderate Szenario im World Energy Outlook (IEA New Policies) angelehnt. Das moderate Szenario im Global Wind Energy Outlook (GWEO Moderate) geht bereits von einer höheren Windverstromung aus als das ambitionöseste Szenario des World Energy Outlook (s. Tab. 4.80). Verglichen mit extremen Szenarien (z. B. KLEIJN & VAN DER VOET (2010)) liegen GWEC et al. (2014) und IEA (2013c) jedoch relativ nah beieinander.

In GWEC et al. (2014) werden die Neuinstallationen im Jahr 2035 aufgeführt, wobei das Repowering, also das Ersetzen älterer Windkraftanlagen durch neuere Modelle, in diesen Zahlen bereits berücksichtigt ist. Da die Zahl der jährlichen Neuinstallationen für die Herangehensweise dieser Studie benötigt wird, werden für die Bedarfsprognosen die drei Szenarien aus GWEC et al.

(2014) als Szenarien für geringen, moderaten und starken Ausbau der Windenergie verwendet.

Marktanteil verschiedener Technologien

Der Bedarf an Seltenen Erden für Windkraftanlagen hängt vom Marktanteil permanentmagnetischer Antriebstechnologien ab (vgl. Tab. 4.75). Bezüglich aller weiteren Werkstoffe wird in der Literatur nicht nach verschiedenen Technologien, sondern grob nach Nennleistung und Standort (On- oder Offshore) unterschieden (vgl. Tab. 4.76).

Elektrisch erregte High-Speed-Asynchrongeneratoren mit Getriebe haben On- wie Offshore fortbestehend bedeutende Marktanteile, müssen diese aber teilweise an die neueren Technologien abgeben. Dies zeigt sich beispielsweise an den vier weltweit größten Herstellern von Windkraftanlagen 2013 (REVE 2014). Das dänische Unternehmen Vestas (13,1 % Marktanteil 2013) baute ehemals ausschließlich Asynchrongenerator-WKA, bietet derzeit aber zusätzlich permanentmagnetisch erregte High-Speed-WKA mit Getriebe an (VIEBAHN et al. 2014). Siemens (7,4 % Marktanteil) hat in der Vergangenheit ebenfalls Asynchrongenerator-WKA gebaut, setzt mittlerweile aber genau wie der chinesische Anbieter Goldwind (11 % Marktanteil) auf permanentmagnetisch erregte Direct-Drive-Anlagen. Der deutsche Hersteller Enercon (9,8 % Marktanteil) baut dagegen seit 1992 elektrisch erregte Direct-Drive-Anlagen und wird dabei bleiben.

Tab. 4.80: Prognosen für das Wachstum der Windenergiegewinnung aus IEA (2013c), GWEC et al. (2014) und KLEIJN & VAN DER VOET (2010). Daten, die für die Prognosen der vorliegenden Studie übernommen wurden, sind fett hervorgehoben

| Szenarien | Wachstumsraten 2014 – 2020 – 2030 | 2035 durch Windkraft erzeugte Energie (TWh) | Bis 2035 angewachsene Windkraftkapazität in TW | 2035 Neu installierte Windkraftleistung inkl. Repowering in TW |
|----------------------|-----------------------------------|---|--|--|
| IEA Current Policies | 6 – 6 – 6 | 2.251 | | k.A. |
| IEA New Policies | k.A. | 2.774 | 1,130 | k.A. |
| IEA 450 | k.A. | 4.337 | | k.A. |
| GWEO New Policies | 12 – 7 – 4 | 2.695 | 1,025 | 0,068390 |
| GWEO Moderate | 14 – 10 – 6 | 4.740 | 1,804 | 0,122049 |
| GWEO Advanced | 15 – 13 – 6 | 6.586 | 2,506 | 0,162564 |
| Kleijn et al. 2010 | 14 – 14 – 14 | 54.167 | 24 | k.A. |

An den 2013 gebauten Windkraftanlagen hatte die Direct-Drive-Technologie einen Marktanteil von 28,1 % (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY 2014, REVE 2014). Enercon ist der einzige größere Hersteller von elektrisch angeregten Direct-Drive-Windkraftanlagen und hatte 2013 einen Marktanteil von 9,8 % (REVE 2014), so dass angenommen werden kann, dass ca. 18,2 % der 2013 gebauten Windkraftanlagen direkt angetrieben durch einen mit NdFeB-Magneten angeregten Generator waren.

Den Direct-Drive-Windkraftanlagen werden in verschiedenen Studien bis 2017 jährliche Wachstumsraten von durchschnittlich ca. 15 % prognostiziert (TRANSPARENCY MARKET RESEARCH 2011, MARKETS AND MARKETS 2012), was über dem Durchschnitt der prognostizierten jährlichen Wachstumsraten für Windenergie von 2014 bis 2020 ist (vgl. Tab. 4.80).

Welche Technologie in Zukunft welchen Marktanteil erobern kann, hängt jedoch von vielen Faktoren ab. Die Verfügbarkeit und die Preise der Seltenen Erden werden dabei eine große Rolle spielen. Zu beachten ist hierbei, dass China im Jahr 2035 mit einem globalen Anteil von 30 % Marktführer im Bereich Windenergie sein wird (IEA 2013c). Da China derzeit über die meisten Abbaustätten für Seltene Erden verfügt, ist anzunehmen, dass die Verfügbarkeit dieser Materialien in China als weniger kritisch betrachtet wird. Wahrscheinlich

werden also Technologien mit NdFeB-Magneten in China eine generell größere Verbreitung finden als beispielsweise in Europa.

Weiterhin wird sich die Standortwahl (On- oder Offshore) wesentlich auf die Technologiewahl auswirken. 2035 wird ca. 20 % der von Windkraftanlagen erzeugten Primärenergie von Offshore-WKA stammen (IEA 2013c), während es 2013 lediglich 2,1 % waren (REVE 2014). Aufgrund dieses steigenden Marktanteils am Gesamtbestand ist davon auszugehen, dass der Anteil der Offshore-Anlagen an den 2035 neu gebauten Anlagen noch etwas höher als 20 % ist. Permanentmagnetisch erregten Direct-Drive-Windkraftanlagen wird vor allem in diesem Segment eine große Zukunft zugeschrieben, da ihre geringe Wartungsanfälligkeit im Offshore-Bereich aufgrund des hohen Aufwands einer Wartung auf See ein entscheidender Vorteil ist und die höheren Kosten der Technologie ausgleichen kann. Aber auch permanentmagnetische Middle-Speed-Windkraftanlagen sollen im Offshore-Segment an Bedeutung gewinnen (VIEBAHN et al. 2014). Dagegen werden elektrisch erregte Direct-Drive-Anlagen und permanentmagnetisch erregte High-Speed-Windkraftanlagen hauptsächlich im On-Shore-Segment bedeutsam sein. Sollten die in der Entwicklung befindlichen Hochtemperatursupraleiter-Windkraftanlagen (HTS) bis 2035 marktreif sein, werden sie vor allem den permanentmagnetisch erregten Direct-Dri-

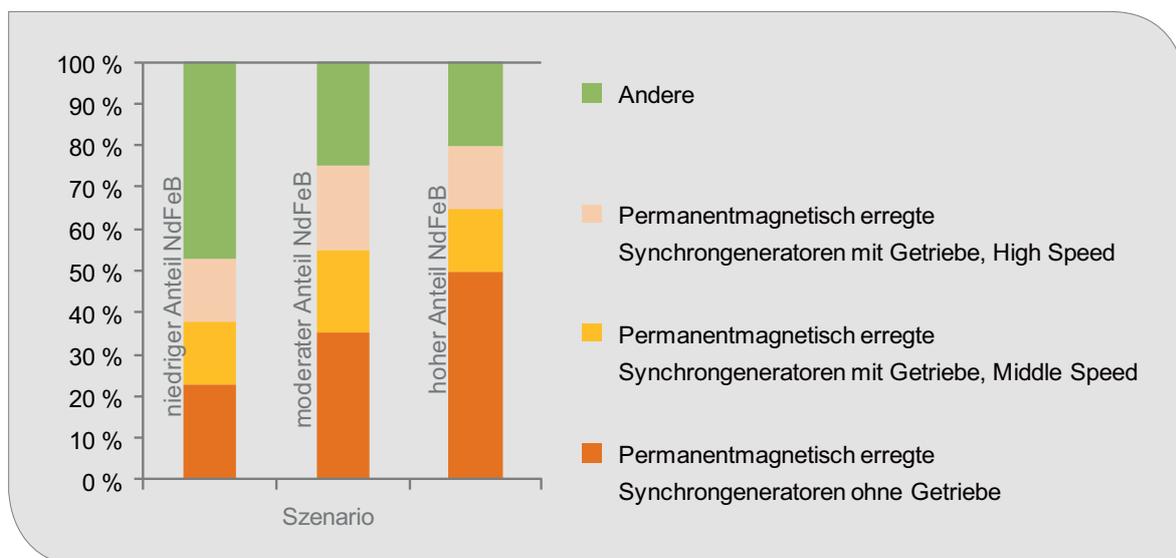


Abb. 4.82: Annahmen des Technologieanteils permanentmagnetisch erregter Antriebstechnologien an 2035 weltweit neu gebauten WKA in Szenarien für geringen, moderaten und hohen Anteil der permanent-magnetischen Technologien

ve-Windkraftanlagen Marktanteile streitig machen (VIEBAHN et al. 2014).

Basierend auf diesen Betrachtungen wurden die in Abb. 4.82 zusammengefassten drei Szenarien mit geringem, moderatem und hohem Anteil permanentmagnetisch erregter Windkraftanlagen entworfen. Im Szenario „geringer Anteil permanentmagnetisch erregter Technologien“ wird davon ausgegangen, dass die permanentmagnetisch erregte Direct-Drive-Technologie ihren Marktanteil gegenüber 2013 (ca. 18,2 %) bis 2035 nur geringfügig ausbauen kann oder aber Marktanteile an die HTS-Technologie abgeben muss. Im Szenario mit hohem Anteil wird dagegen angenommen, dass 2035 nahezu alle zugebauten Windkraftanlagen in China und alle zugebauten Offshore-Anlagen weltweit mit permanentmagnetisch erregter Direct-Drive-Technologie ausgestattet sind. Die Technologien mit mäßigen Magnetgehalten haben im moderaten Szenario einen Anteil von jeweils 20 %, in den Szenarien mit einem klaren Trend hin zu weniger oder mehr Magnetverwendung jeweils 15 %.

4.29.4 Foresight Rohstoffbedarf

Abb. 4.83 und Abb. 4.84 zeigen den Bedarf an Neodym und Dysprosium für Permanentmagneten in den 2035 neu gebauten Windkraftanlagen nach den verschiedenen Szenarien für (a) den Ausbau der Windenergie, (b) den Anteil der permanentmagnetisch erregten Antriebstechnologie sowie (c) den Dysprosiumgehalt in den Magneten. Alle drei Effekte beeinflussen den Dysprosiumbedarf etwa gleichstark. Die weitere Auswertung erfolgt in Kapitel 4.38. In Tab. 4.81 sind neben oberer und unterer Grenze die Werte übernommen, die sich aus Kombination der jeweils moderaten Szenarien ergeben und am plausibelsten erscheinen. Bei den Produktionsdaten wurden auch die Substitute Praseodym und Terbium berücksichtigt (Details s. Kapitel 4.38).

Tab. 4.81 gibt einen Überblick des Bedarfs an Rohstoffen für neu installierte Windkraftanlagen in 2035. Abgesehen von Nd und Dy betragen die geschätzten Rohstoffbedarfe 2035 weniger als 10 % der Produktion 2013. Zu beachten ist allerdings, dass der Kupferbedarf für den durch Windenergienutzung bedingten Stromnetzausbau das 20-fache des direkten Bedarfs für Windkraftanlagen betragen kann, woraus sich ein relevanter Gesamtbedarf für 2035 ergeben könnte (HARMSSEN et al. 2013).

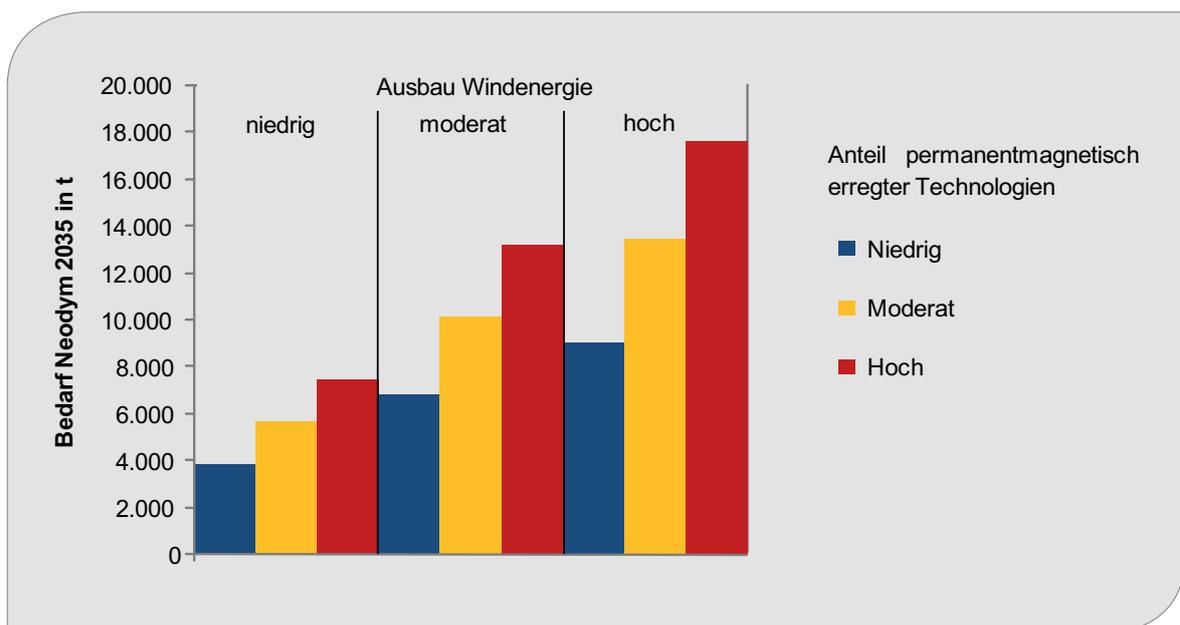


Abb. 4.83: Bedarf an Neodym (Nd) in t (Metall) für Permanentmagneten in 2035 gebauten Windkraftanlagen nach verschiedenen Szenarien

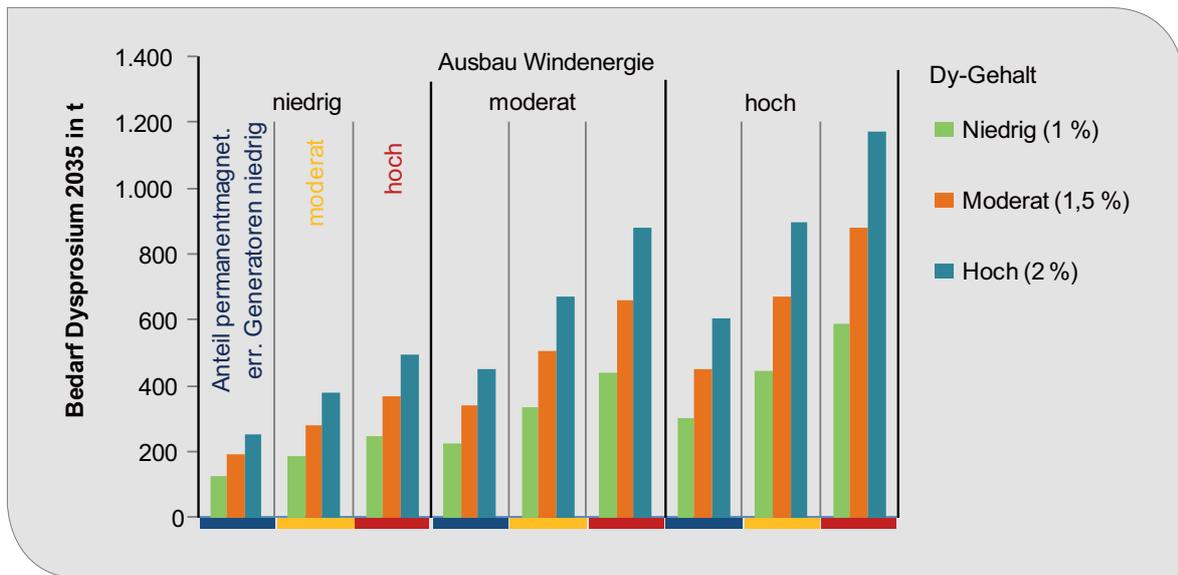


Abb. 4.84: Bedarf an Dysprosium (Dy) in t (Metall) für Permanentmagneten in 2035 gebauten Windkraftanlagen nach verschiedenen Szenarien

Tab. 4.81: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf für neu gebaute Windkraftanlagen in t

| Rohstoff | Produktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|-----------|----------------------------------|-------------|---------------------------------------|
| Rohstahl | 1.655.549.570 | 17.510.000 | 41.496.660 (23.252.600–55.271.760) |
| Kupfer | 18.365.341 (B) 21.446.333 (R) | 103.000 | 244.098 (136.780–325.128) |
| Aluminium | 47.811.880 (R) | 103.000 | 244.098 (136.780–325.128) |
| Chrom | 13.422.102 (B) ¹ | 48.884 | 115.849 (64.916–154.306) |
| Nickel | 2.601.745 (B) 1.955.132 (R) | 36.313 | 86.057 (48.222–114.624) |
| Molybdän | 270.739 (B) | 7.457 | 17.673 (9.903–23.539) |
| Mangan | 16.900.000 ² | 4.975 | 11.790 (6.606–15.704) |
| Zinn | 289.790 (B) 362.996 (R) | 8.096 | 19.186 (10.751–25.555) |
| Nd, Pr | 36.600 ³ | gering | 10.100 (3.800–17.600) |
| Dy, Tb | 2.330 ³ | gering | 500 (130–1.170) |

B: Bergwerksförderung, R: Raffinadeproduktion

¹ Quelle: berechnet aus Chromit, USGS 2015d, ² Quelle: USGS 2015c

³ Metallproduktion berechnet aus den SEO, Schätzung inkl. illegaler Förderung in China (Quelle: KINGSNORTH 2015)

4.29.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Falls zukünftig Verfügbarkeitsengpässe der Selten-erdelementen Neodym, Dysprosium, Praseodym

und Terbium auftreten werden, wird dies global nicht zwangsläufig den Ausbau der Windenergiegewinnung beeinträchtigen, sondern eher ein Ausweichen auf Technologien, welche wenig oder gar keine Seltenerdelemente benötigen, begünstigen.

Laut IEA (2013c) kann die wetterabhängige Stromerzeugung aus Wind- und Solarenergie 2035 nur 2 % der verlässlichen Stromerzeugungskapazität beisteuern. Somit reduziert ihr Ausbau den Bedarf an wetterunabhängigen Kraftwerken nicht signifikant. Aus deren geringerer Auslastung folgt allerdings ein niedrigerer Bedarf an Rohstoffen für die Energieerzeugung. Die gesunkene Auslastung kann durch geringeren Verschleiß auch einen reduzierten Materialbedarf für Bau und Instandhaltung der Kraftwerke bedingen, allerdings weit weniger als eine vollständige Substitution konventioneller Kraftwerke.

Durch die hohen Lebenszeiten von Windkraftanlagen (ca. 20 Jahre) fallen derzeit noch wenige Windkraftanlagen zur Entsorgung bzw. zum Recycling an. Im Zuge des Repowerings in Deutschland abgebaute Anlagen wurden in der Vergangenheit meist in Schwellen- und Entwicklungsländer exportiert (VDI ZRE 2014). Die Recyclingquote liegt derzeit bei 80–90 % bezogen auf die Gesamtanlage (SEILER & WOIDASKY 2013). Eine verbesserte Verwertung der Verbundwerkstoffe, die für die Rotorblätter zum Einsatz kommen, wird derzeit erforscht (SEILER & WOIDASKY 2013). Günstig für das Recycling der Seltenerdelemente ist die im Vergleich zu anderen Anwendungen große Magnetmasse von 0,3 bis 3 t pro Anlage, bei welcher eine Demontage des Generators und eine von Stahl- und Kupferschrott getrennte Sammlung ökonomisch und logistisch realisierbar ist.

Chemie-, Prozess-, Fertigungs- und Umwelttechnik, Maschinenbau

4.30 Synthetische Kraftstoffe

4.30.1 Technologiebeschreibung

Die nur begrenzt zur Verfügung stehende Ressource Erdöl und die Entwicklung des Rohölpreises führt dazu, dass die gegenwärtige Rohstoffbasis für die Kraftstoffversorgung nicht nachhaltig ist. Zur Verbesserung dieser Situation gibt es verschiedene Ansätze, einer davon ist die Verbreiterung der Rohstoffbasis durch so genannte XtL-Technologien zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe. Dabei nutzt die GtL-Technologie (Gas-to-Liquid) Erdgas als Rohstoffbasis, CtL (Coal-to-Liquid)

Kohle und BtL (Biomass-to-Liquid) Biomasse wie Holz, Stroh oder organische Abfälle aus der Land- und Forstwirtschaft. Seit größere Mengen regenerativen Stroms zur Verfügung stehen, werden auch PtL (Power-to-Liquid) Verfahren entwickelt, bei denen durch Elektrolyse Wasserstoff hergestellt wird, welcher mit CO₂ zu Kohlenwasserstoffen umgesetzt wird.

Die XtL-Technologien besitzen unterschiedliche technische Reifegrade. Die längste Historie besitzt die Kohleverflüssigung (CtL), welche als Fischer-Tropsch-(FT) Synthese 1925 von Hans Tropsch und Franz Fischer am Kaiser-Willhelm-Institut für Kohleforschung in Mülheim an der Ruhr entwickelt und in der Kriegswirtschaft Deutschlands bis 1945 kommerziell zur Kraftstoffsynthese genutzt wurde. Mit dem Aufschwung der Petrochemie verlor sie an Bedeutung. In Südafrika, das während der Apartheid mit Versorgungsproblemen zu kämpfen hatte, wird die Technologie seit 1950 kommerziell zur Herstellung von Kraftstoffen aus Kohle (CtL) und Erdgas (GtL) eingesetzt. Das in der langjährigen Entwicklung und Nutzung gewonnene Know-how hat die südafrikanische Firma Sasol zu einem der globalen Technologieführer bei CtL- und GtL-Verfahren aufsteigen lassen. Daneben gilt auch die Firma Shell international als einer der Know-how-Träger. Das Unternehmen betreibt im malaysischen Bintulu eine Raffinerie zur Herstellung hochwertiger Kraftstoffe aus Erdgas und mischt seiner Premium-Dieselmarke V-Power 5 % GtL-Diesel bei.

Eine noch junge Entwicklung ist die BtL-Technologie, bei der die Herausforderung in der chemisch sehr heterogenen Zusammensetzung der Biomasse liegt. Die BtL-Technologie wird noch nicht in kommerziellen Großanlagen genutzt. Im Jahr 2009 wurde in Freiberg, Sachsen, von der Firma Choren Industries, die weltweit erste kommerzielle Pilotanlage mit einer Produktionskapazität von 15.000 t in Betrieb genommen.

Alle XtL-Verfahren arbeiten nach dem gleichen Verfahrensprinzip: In der ersten Stufe wird aus dem eingesetzten Rohstoff Kohle, Erdgas oder Biomasse Synthesegas erzeugt, ein Gemisch von Wasserstoff (H₂) und Kohlenmonoxid (CO). Nach der Gasreinigungsstufe wird das hochreine Synthesegas in der Fischer-Tropsch-Synthese direkt oder über Zwischenprodukte wie Dimethylether, Wachse o. ä. zu Kraftstoff konfektioniert (verglei-

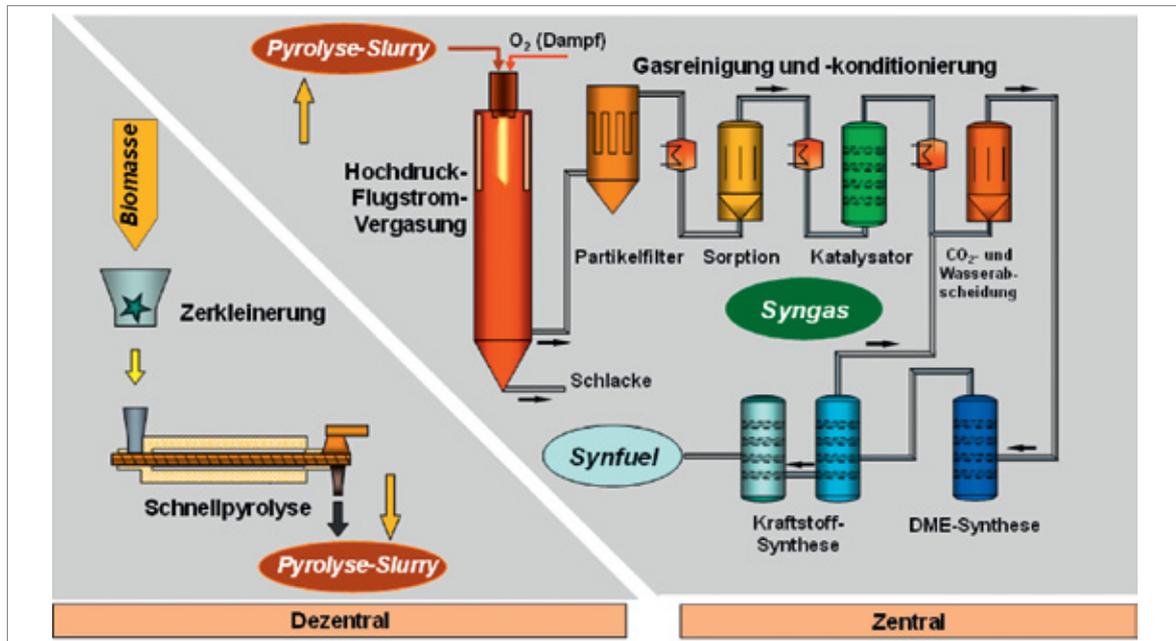


Abb. 4.85: Prozessschema der Bioliq Anlage am KIT (Quelle: N. DAHMEN, KIT/IKFT)

che Abb. 4.85). Dabei kann die Synthese maßgeschneidert gefahren (z. B. ohne aromatische Verbindungen mit einer definierten Kettenlänge der Kohlenwasserstoffe) und ein breites Spektrum an Kraftstoffen (Diesel, Benzin) und Kraftstoffqualitäten hergestellt werden. Für die Zukunft sind besonders Designerkraftstoffe für fortgeschrittene energieeffiziente und emissionsarme HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) Verbrennungsmotoren interessant, an denen die großen Automobilbauer zurzeit arbeiten.

4.30.2 Rohstoffinhalt

Die Anlagen für die Produktion von xTL-Kraftstoffen werden in normalem Stahl ausgeführt. In dieser Analyse gilt das Augenmerk dem Katalysator des Fischer-Tropsch-Reaktors. Als katalytisch aktives Material wird Kobalt genutzt. Darin sind geringe Mengen Rhenium oder ein Platinmetall, bspw. Platin, Ruthenium, Palladium oder Rhodium, als Promotoren eingelagert, welche den Reduktionsprozess verbessern und die Oberfläche des Kobalts aktiv halten sollen (DRY 2002). Die Promotorenanteile betragen weniger als 1 %. In der genauen Zusammensetzung des Katalysators steckt das eigentliche Know-how, das von den Unternehmen als Betriebsgeheimnis angesehen wird. Wegen des vergleichsweise hohen Preises

wird versucht, einerseits die Menge an Kobalt im Katalysator gering zu halten und andererseits die verfügbare Oberfläche des Kobalts zu maximieren. Dies geschieht durch das Auftragen von Kobaltdispersionen auf Gerüstmaterialien mit großen Oberflächen wie Aluminiumoxid, Siliciumdioxid oder Titandioxid. Der Kobaltanteil am gesamten Katalysatorgewicht beträgt ca. 20 % (DRY 2002).

Die Angaben zur benötigten spezifischen Katalysatormenge des FT-Aggregats schwanken. Als Daumenregel werden 100–200 Tonnen Kobalt für eine Anlage angenommen, die 10.000 Barrel pro Tag produziert (CDI 2006). Die Katalysatoren sind etwa vier Jahre im Einsatz und müssen dann ausgetauscht werden (CDI 2006). Die Lebensdauer von GtL- und CtL-Anlagen beträgt ca. 30 Jahre (IEA ETSAP 2010).

4.30.3 Foresight industrielle Nutzung

Anlagen zur Kohleverflüssigung (CtL) laufen seit Jahrzehnten in Südafrika und decken rund ein Drittel des nationalen Kraftstoffbedarfs. In drei Fabriken erzeugt der südafrikanische Konzern Sasol rund 25,5 Millionen Liter Diesel, Benzin und weitere Ölprodukte pro Jahr; das sind 160.000 Barrel/Tag.

Tab. 4.82: 2013 installierte GtL Anlagen und Kapazitäten

| Name | Standort | Betreiber | Kapazität (Barrel/Tag) |
|------------|-----------|-----------------------|------------------------|
| Pearl | Qatar | Shell | 120.000 |
| Oryx | Qatar | Sasol/Qatar Petroleum | 34.000 |
| Bintulu | Malaysia | Shell MDS | 14.700 |
| Mossel Bay | Südafrika | PetroSA | 45.000 |
| | | | 213.700 |

Bei steigenden Ölpreisen erfahren insbesondere GtL-Technologien weltweit einen Aufschwung. Seit 1992 betreibt PetroSA eine GtL Anlage mit 45.000 Barrel/Tag im südafrikanischen Mossel Bay unter Lizenz von Sasol (PETROSA 2015). Nach dem schon erwähnten Betrieb von Shell in Malaysia (1993) nahm 2005 die Anlage Oryx den Betrieb auf. Sie liegt ebenso wie die GtL-Großanlage Pearl, die 2012 fertiggestellt wurde, in Ras Laffan Industrial City, 80 km nördlich von Doha in Qatar (O'BRIEN 2013). Insgesamt wurden so im Jahr 2013 ca. 213.000 Barrel pro Tag produziert, s. Tab. 4.82.

Die oben erwähnte Firma Choren war 2011 in die Insolvenz geraten und über ihre Demonstrationsanlage zur Produktion von Biokraftstoff aus Synthesegas auf Basis von Holz nicht hinausgekommen (KOOP 2011). Bei dem als „SunFuel“ bezeichneten Produkt handelte es sich um einen Biokraftstoff der zweiten Generation, was bedeutet, dass er nicht aus Nahrungsmittelpflanzen hergestellt wird. Als Grundstoff für SunFuel dient Holz. Die Biomasse wurde verschwelt und reagierte unter Zufügung von Sauerstoff in einem Flugstromreak-

tor zu einem Synthesegas. Das Verfahren wurde als Carbo-V-Verfahren bezeichnet. Die Technologiepatente wurden von der Linde Engineering Dresden erworben (ERNHOFER 2012). Forest BtL in Finnland baut eine BtL-Anlage in Lizenz von Linde: Mit der kommerziellen Produktion, 130.000 t Biodiesel und Naphtha, soll voraussichtlich Ende 2016 begonnen werden; als Einsatzmaterial dienen 1,5 Mio. t Holz (LINDE ENGINEERING 2013).

Die Chancen der XtL-Technologien liegen in der weltweit seit vielen Jahrzehnten durchschnittlich deutlich steigenden Nachfrage nach Kraftstoffen.

Die BP Studie zum „Energy Outlook 2035“, geht von einer Steigerung des Kraftstoffbedarfs bis 2035 von 1,2 % pro Jahr aus (BP 2015). Dies ergibt sich trotz eines Ausbaus der Fahrzeugflotte in den Schwellen- und Entwicklungsländer durch weitere Kraftstoffeinsparungen durch verbesserte Motorentechnik und Hybridfahrzeuge.

Im Zeithorizont bis 2035 muss davon ausgegangen werden, dass wasserstoffgetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge marktreif werden. Dies wird

Tab. 4.83: Prognostizierte Mengen an XtL Kraftstoffen für 2035

| | Einheit | 2013 | 2035 | | |
|--------------------|---------|------------|-----------------------|---------------------------|--------------|
| | | | New Policies Scenario | Current Policies Scenario | 450 Scenario |
| Gas-to-liquids | mb/d | 0,1 | 0,7 | 1 | 0,5 |
| | [t/a] | 29.300 | 35.000.000 | 50.000.000 | 25.000.000 |
| Coal-to-liquids | mb/d | 0,2 | 1,1 | 1,6 | 1 |
| | [t/a] | 10.001.000 | 55.005.500 | 80.008.000 | 50.005.000 |
| Biomass-to-liquids | mb/d | gering | 1,1 | | |
| | [t/a] | gering | 54.000.000 | | |

das Gesamtvolumen an benötigten Kraftstoffen nicht dramatisch verändern, sondern von Kohlenwasserstoffen zu Wasserstoff verlagern.

4.30.4 Foresight Rohstoffbedarf

Wie groß der Kraftstoffanteil 2035 ist, der mit XtL-Technologien hergestellt wird und welche Bedeutung bis dahin dem Erdöl noch zukommt, hängt von einigen Schlüsselfaktoren ab. Dazu zählen:

- das Preisniveau von Erdöl,
- die Preisrelation zwischen Erdöl und Erdgas,
- die Preisrelation zwischen Erdöl und Kohle,
- der Marktreife von BtL-Technologien und die erzielten Skaleneffekte bei der technischen und wirtschaftlichen Effizienz der Anlagen,
- der Marktreife und Effizienz der Herstellung von Ethanol aus Lignozellulose,
- der steuerlichen Förderung von Biokraftstoffen.

Bei einem Kobaltbedarf von im Mittel 15.000 t pro Mio. bpd ergibt sich für das Jahr 2013 ein Kobaltinventar in den FT-Aggregaten der XtL-Anlagen von ca. 4.500 t und ca. 43.000 t im Jahr 2035. Wenn dieses Inventar seit 2013 proportional ausgebaut wird, errechnet sich daraus ein Katalysatormehrbedarf von ca. 2.000 t pro Jahr. Da im Jahr 2013 keine größere XtL Anlage in Betrieb genommen wurde, war der Kobaltbedarf gering.

Bei einem angenommenen Promotorengehalt (Rhenium, Platin, Ruthenium, Palladium oder Rhodium) in den Katalysatoren von 1 % ergibt sich ein Promotorenbedarf von 20 t/a. Das wären etwa 10 % der Produktion von Platin im Jahre 2013. In der Praxis werden sowohl Platinmetalle als auch Rhenium eingesetzt. Der abgeschätzte Promotorenbedarf verteilt sich deshalb auf meh-

reere Metalle. Trotzdem gehen von den XtL-Technologien erhebliche Nachfrageimpulse auf diese Metalle aus.

4.30.5 Recycling, Ressourcen-effizienz und Substitution

Die Katalysatoren werden recycelt, die Wertstoffe Kobalt und die Promotoren zu 90 % zurückgewonnen (BRUMBYA et al. 2007) und wieder eingesetzt. Es entsteht also lediglich bei der Erstausrüstung der FT-Anlage ein nennenswerter Bedarf an Katalysatormaterial.

4.31 Meerwasserentsalzung

4.31.1 Technologiebeschreibung

Im Meerwasser sind durchschnittlich 3,5 % (35.000 ppm) Salz enthalten. Für den Menschen kann ein Salzgehalt im Trinkwasser von maximal 500 ppm toleriert werden. Meerwasser ist daher ohne vorherige Aufbereitung nicht nutzbar. Aber auch Industrieanlagen sind auf salzfreies Prozesswasser angewiesen.

Nach Angaben der International Desalination Association (IDA 2016) gab es 2015 weltweit über 18.400 Entsalzungsanlagen, die eine Kapazität von nahezu 87 Mio. Kubikmeter pro Tag aufweisen und dabei ca. 86,5 Mio. Kubikmeter Wasser pro Tag produzierten.

Die Entsalzung erfolgt im großtechnischen Maßstab mit ausgereiften Verfahren, die zu 56 % für Seewasser, zu 24 % für Brackwasser, zu 8 % für Flußwasser und zu ca. 6 % für Abwasser eingesetzt werden (KOSCHIKOWSKI 2011). Grundsätzlich kann zwischen Destillationsverfahren, wie die mehrstu-

Tab. 4.82: Globale Produktion Rohstoffbedarf für XtL-Anlagen in t

| Rohstoff | Produktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|----------|---------------------------|-------------|----------------------|
| Kobalt | 129.763 (B) 85.904 (R) | gering | 2.000 |
| Platin | 187 (B) | gering | 20 |

B: Bergwerksförderung

R: Raffinadeproduktion

fige Blitzverdampfung, und Membranverfahren unterschieden werden, wobei die Umkehrosmose die führende Technologie darstellt (RÖMPP o. J.).

Bei der mehrstufigen Blitzverdampfung (MSF-Verfahren von englisch multi-stage-flash) wird das zugeführte Meerwasser auf eine Temperatur von ca. 115 °C erwärmt, häufig mit der Abwärme eines kalorischen Kraftwerks. Das im so genannten Brine-Heater aufgeheizte Salzwasser verdampft dann in nachgeschalteten Entspannungsstufen unter Vakuum, der Wasserdampf schlägt sich als Kondensat innerhalb dieser Stufen an mit Kühlflüssigkeit gefüllten Rohrleitungen nieder und wird als salzfreies Wasser abgezogen.

Das durch den Verdampfungsprozess immer stärker mit Salz angereicherte Wasser wird auch Brine (Salzlake) genannt und in einem nachgeschalteten Wärmeübertrager auf die Kondensationstemperatur (≈ 40 °C) des Dampfes des zugeführten Frischwassers abgekühlt. Es dient dann anschließend in den Rohrleitungen als Kühlflüssigkeit. Zuletzt wird dem Brine frisches Salzwasser zugeführt und erneut durch die Abwärme der Gasturbine aufgeheizt. Der gesamte Vorgang stellt also einen geschlossenen Kreislauf dar. Der Überschuss des sich im Kreislauf konzentrierenden Salzes wird

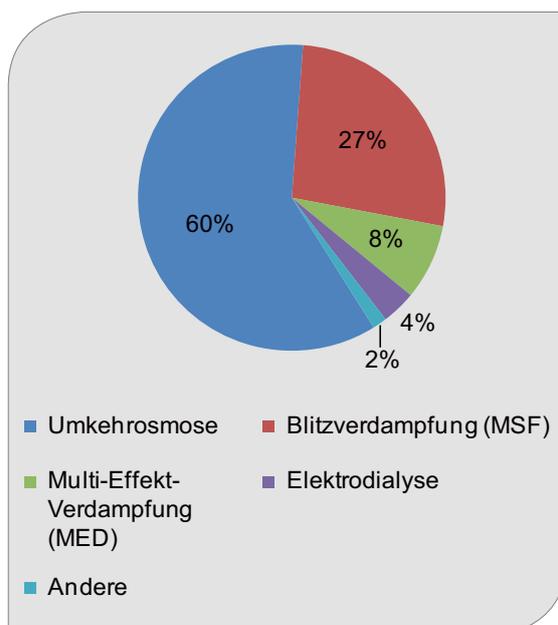


Abb. 4.86: Verfahren zur Meerwasserentsalzung 2010
(Quelle: eigene Darstellung basierend auf KOSCHIKOWSKI 2011)

wieder ins Meer zurückgeführt (RÖMPP o. J., WIKIPEDIA 2015c). Großanlagen, wie die Meerwasserentsalzungsanlage Sorek in Israel, können mit dem Verfahren täglich über 600.000 Kubikmeter Trinkwasser aus dem Meerwasser gewinnen (TALBOT 2015).

Das am weitesten verbreitete Verfahren zur Meerwasserentsalzung ist die Umkehrosmose (vergleiche Abb. 4.86). Die Entsalzung mit Umkehrosmose verläuft nach folgendem Grundprinzip:

- Abpumpen von Meereswasser,
- Vorbehandlung des einfließenden Wassers (Beimischung von KoagulierungsmitteIn, Flockung, Sedimentierung und Filtration),
- Zweistufiger Umkehrosmose-Prozess (Beschickung der Membranen durch Hochdruckpumpen) und
- Einleitung von „Brine“ ins Meer.

Die Meerwasserentsalzung wird trotz ihres geringen Innovationsgrades aus zwei Hauptgründen als Zukunftstechnologie betrachtet:

- Angesichts des hohen Bevölkerungswachstums in ariden Gebieten und in Küstennähe entsteht eine Deckungslücke in der Versorgung mit Süßwasser, die durch Entnahme fossilen Grundwassers nicht nachhaltig geschlossen werden kann. (Die Wasserbedarfsschätzungen gehen von einer Menge von 1000 l pro Kopf und Tag für Haushalte, Industrie und Landwirtschaft aus.) Nur die Meerwasserentsalzung birgt in vielen Regionen, darunter im Nahen Osten, in Nordafrika, Spanien und Nordchina aber auch regional in den USA, das Potenzial, diese Deckungslücke zu schließen.
- Der hohe Energiebedarf für die Meerwasserentsalzung erfordert intelligente, komplexe systemische Innovationen, die die eingeschränkte Verfügbarkeit nicht erneuerbarer Energieressourcen berücksichtigen.

Die Meerwasserentsalzung kann grundsätzlich mit anderen fossil befeuerten Kraftwerkstypen gekoppelt werden, wobei die Dampfturbinen erst Strom erzeugen und der Abdampf dann anschließend zur Eindampfung von Meerwasser genutzt wird. Auch die Kombination mit Kernenergie wird diskutiert (STIELER 2005).

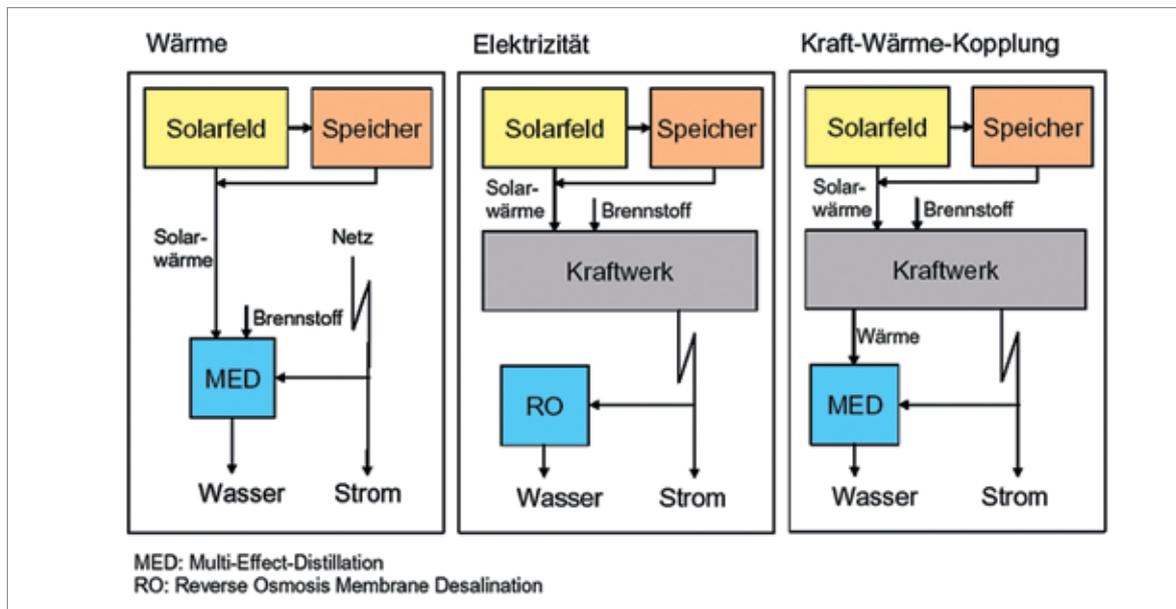


Abb. 4.87: Meerwasserentsalzung im Systemverbund mit solarthermischen Kraftwerken (Quelle: DLR 2007a)

In Abb. 4.87 ist die Meerwasserentsalzung im Systemverbund mit solarthermischen Kraftwerken (vgl. Kapitel 4.20) dargestellt. Dieser intelligente Systemverbund trägt der Koizidenz von geringem Wasserdargebot bei gleichzeitig hoher Solarstrahlung Rechnung. Angesichts des hohen Energiebedarfs für die Meerwasserentsalzung scheint diese Kopplung als besonders zukunftsfähig. An einigen Standorten mag auch eine Kopplung mit Windenergie aussichtreich sein, da die tägliche Land-/Seewindabfolge eine vergleichsweise zuverlässige regenerative Energiequelle ist (IRENA 2012b, DLR 2007).

Daneben gibt es noch andere Ansätze, wie z. B. ein Chip, in dem ein kleiner Teil der Chloridionen zu Chlor umgesetzt werden und dadurch eine ionenarme Zone entsteht. Dadurch wandern Ionen im elektrischen Feld in einen bestimmten Bereich und konzentrieren sich, während auf der anderen Seite des Chips teilentsalztes Wasser entsteht. Entwickler sind die University of Texas und die Philipps-Universität in Marburg (KLEMPERT 2014).

4.31.2 Rohstoffinhalt

Hinsichtlich des Rohstoffbedarfs für die Meerwasserentsalzung sind korrosionsfeste Werkstoffe, Membranen und zahlreiche Wasserchemikalien

(Anti-Fouling, Anti-Scaling, Korrosionskontrolle) von Bedeutung.

Nicht rostende Stähle haben einen Chromgehalt von mindestens 12 %. Das Chrom bildet eine dünne Passivschicht, die sich selbst nach Verletzung wieder schließt. Mit einer Erhöhung des Chromanteils und der Zugabe von Nickel und Molybdän wird die Korrosionsfestigkeit weiter erhöht (INFORMATIONSTELLE EDELSTAHL ROSTFREI 2006). Der Anlagenbauer Outokumpu setzt beispielsweise auf die Qualität 254 SMO™ und SAF 2507®. Eine grundsätzliche Alternative zu Stahl sind Titanlegierungen. Hierauf setzt z. B. die Firma Allegheny Ludlum. Unter 250 °C und bei pH-Werten über 1 unterliegen palladiumlegierte Titanwerkstoffe nicht der Spaltenkorrosion. Die Preise für die wesentlichen Werkstoffe für die Meerwasserentsalzung unterliegen teilweise starken Schwankungen. Die Entwicklung alternativer Werkstoffe ist deshalb ein wichtiges Forschungsfeld.

Eine grobe Abschätzung des Bedarfs an korrosionsfesten Werkstoffen kann anhand punktueller Informationen zu einzelnen Anlagen vorgenommen werden. In der Anlage Ras Az Zawr in Saudi-Arabien wurden neben ca. 10.000 Tonnen rostfreier Duplex-Stahlprodukte auch 6.200 Tonnen Titanrohre verbaut (NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL o. J.). Die Meerwasserentsalzungsanlage

Tab. 4.85: Beispielhafte Zusammensetzung von korrosionsfesten Werkstoffen [Gew.-%]

| | SAF 2507® | 254 SMO® | SAF 2304® | 2205 | NIROSTA® | Allegheny Ludlum Grade 5 | Allegheny Ludlum Grade 7 |
|-------------|-----------|----------|-----------|--------|-----------|--------------------------|--------------------------|
| | Sandvik | | | | Outokumpu | Ludlum | Ludlum |
| EN/DIN | 1.4410 | 1.4547 | 1.4362 | 1.4462 | 1.4404 | 3.7164 | 3.7235 |
| Basis | Eisen | Eisen | Eisen | Eisen | Eisen | Titan | Titan |
| Chrom | 25,0 | 20,0 | 23,0 | 22,0 | 23,0–25,0 | | |
| Nickel | 7,0 | 18,0 | 4,8 | 5,7 | 16,0–18,0 | | |
| Molybdän | 4,0 | 6,1 | 0,3 | 3,1 | 3,5–5,0 | | |
| Stickstoff | 0,27 | 0,20 | 0,10 | 0,17 | 0,4–0,6 | < 0,05 | < 0,03 |
| Kohlenstoff | 0,02 | < 0,02 | < 0,03 | < 0,03 | < 0,03 | < 0,08 | < 0,08 |
| Kupfer | | 0,5–1,0 | | | | | |
| Mangan | | | | | 3,5–6,5 | | |
| Aluminium | | | | | | 6,0 | |
| Vanadium | | | | | | 4,0 | |
| Palladium | | | | | | | 0,20 |
| Andere | 0,001 | | | | < 1,1 | < 0,615 | < 0,70 |

Quellen: ALLEGHENY LUDLUM 1999, SANDMEYER STEEL COMPANY 2008, METAL SUPPLIERS ONLINE 2008, OUTOKUMPU 2008, THYSSENKRUPP STAINLESS 2008

Al Hidd in Bahrain benötigte 2.200 t Duplex Stainless Steel von Outokumpu (OUTOKUMPU 2006). Bei der Anlage MARAFIQ in Saudi-Arabien entfielen mit 10.000 t (8.000 t Duplex Grade SAF 2304® bzw. 2.000 t Duplex Grade 2205) rund 60 % des gesamten Stahlbedarfs in Höhe von 16.500 t auf rostfreien Stahl. Die Anlage produziert 800.000 m³ Trinkwasser pro Tag mit MED-Technologie (OUTOKUMPU 2013).

Die Membranen für Umkehrosmose bestehen in der Regel aus Zelluloseacetat bzw. Polyvinylidenfluorid (PVDF), was vom Standpunkt des Ressourcenverbrauchs weitgehend unkritisch ist. Der Chemikalienbedarf für eine Entsalzungsanlage ist in Tab. 4.86 zusammengestellt (HORVARTH & STOKES 2011).

Hinsichtlich des Ressourcenbedarfs ist Zink-Orthophosphat als Korrosionsschutzmittel von Interesse. Durch eine Vorbehandlungsstufe mit Flockungsfiltration oder Ultrafiltration lässt sich Fouling verringern.

Tab. 4.86: Chemikalienbedarf einer Meerwasserentsalzungsanlage

| Chemikalie | Gebrauch | Verbrauch [kg/Mio. Liter] |
|-----------------|----------------|---------------------------|
| Schwefelsäure | pH-Einstellung | 81 |
| Salmiaklösung | Desinfektion | 8,4 |
| Calciumcarbonat | pH-Einstellung | 26 |
| Kohlendioxid | Fällung | 26 |
| Natriumhydroxid | Reinigung | 6,5 |
| Andere | | 7,5 |

Andere enthält u. a. Eisenchlorid (Koagulant), Zinkorthophosphat (Korrosionsschutzmittel), Fluorosilikatsäure (Fluoridierung der Membran) nach HORVARTH & STOKES (2011)

4.31.3 Foresight industrielle Nutzung

Abb. 4.88 zeigt den Anstieg der installierten Kapazitäten der weltweiten Meerwasserentsalzungsanlagen von 1990 bis 2019 (TALBOT 2015). Nach

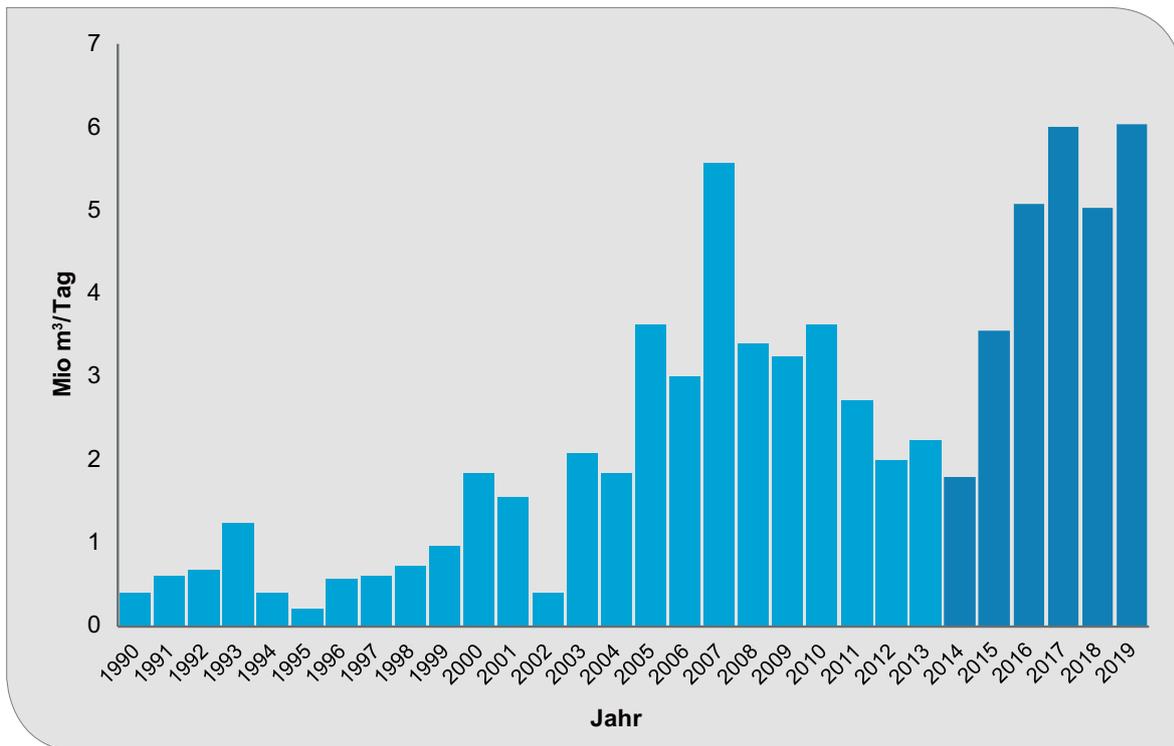


Abb. 4.88: Jährlich installierte globale Meerwasserentsalzungskapazität in m³ pro Tag seit 1990 (dunkelblau = Prognose von FROST & SULLIVAN 2015b)

durchschnittlich ansteigenden Kapazitäten von 1990 bis zum Jahr 2007 gab es in den letzten Jahren einen Rückgang, der laut Prognosen aus der Literatur beendet sein könnte. So rechnen (FROST & SULLIVAN 2015b) mit Wachstumsraten von 13,1 % von 2015 bis 2020. Damit würde sich die kumulierte Entsalzungskapazität von derzeit 87 Mio. m³/d im Jahr 2015 auf 127 Mio. m³/d im Jahr 2019 erhöhen.

Zur Abschätzung der industriellen Nutzung werden zwei Projektionen entwickelt.

- In Projektion A wird ein jährlicher Zubau von 5 Mio. m³/d bis zum Jahr 2035 angenommen.
- In Projektion B wird von 2015–2019 eine Steigerung von 13 %/a, von 2020–2035 ein Wachstum um weitere 3,7 %/a, entsprechend dem Weltwirtschaftswachstum der letzten Jahre, zugrunde gelegt.

Die installierte Anlagenkapazität entwickelt sich von 80 Mio. m³/d 2013 in Projektion A bis 2035 auf 190 Mio. m³/d und in Projektion B bis 2035 auf 307 m³/d. Der jährliche Zubau beträgt in Projek-

tion A ca. 5 Mio. m³/d für 2035, in Projektion B ist er bis zum Jahr 2035 auf 11 Mio. m³/d gewachsen.

4.31.4 Foresight Rohstoffbedarf

Der gesamte Materialbedarf im Jahr 2035 wird anhand der zukünftig erwarteten Gesamtkapazität für die beiden Projektionen abgeschätzt. Die Hälfte des Bedarfs entspricht der Nachfrageverteilung gemäß der Anlage MARAFIQ in Saudi-Arabien. Jeweils zu einem Viertel sind der hochlegierte NIROSTA-Stahl und die zwei Allegheny Ludlum Titanlegierungen anteilig angesetzt worden.

Die Projektionen A und B unterscheiden sich um den Faktor 2. Von entscheidender Bedeutung für den zukünftigen Materialbedarf ist zum einen die Frage, ob beim Bau der Meerwasserentsalzungsanlagen Stahl oder Titan eingesetzt wird, zum anderen welche Legierungen jeweils verwendet werden:

- In der Bedarfsvorschau nach Projektion B beträgt der Eisenbedarf mit 59.000 t nur den Bruchteil eines Promilles der heutigen Eisen-

Tab. 4.87: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf für Meerwasserentsalzung in t

| Rohstoff | Produktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfvorschau 2035 Projektion A | Bedarfvorschau 2035 Projektion B |
|-----------|--------------------------------|-------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Rohstahl | 1.655.549.570 | 12.300 | 27.000 | 59.000 |
| Titan | 235.700 (R) | 8.100 | 17.600 | 39.000 |
| Chrom | 13.422.102 (B) ¹ | 6.000 | 13.000 | 28.600 |
| Nickel | 2.601.745 (B) 1.955.132 (R) | 2.300 | 5.000 | 11.000 |
| Molybdän | 270.739 (B) | 500 | 1.100 | 2.400 |
| Mangan | 16.900.000 ² | 430 | 940 | 2.100 |
| Aluminium | 47.811.880 (R) | 260 | 560 | 1.200 |
| Vanadium | 77.573 (B) | 170 | 375 | 820 |
| Palladium | 205 (B) | 9 | 19 | 41 |

B: Bergwerksförderung

R: Raffinadeproduktion

¹ Quelle: berechnet aus Chromit, USGS 2015d

² Quelle: USGS 2015c

produktion. Bei Titan würde mit rund 39.000 t Titan-Metall immerhin rund ein Sechstel der heutigen Titan-Metallproduktion benötigt werden.

- Die Legierungselemente Chrom, Nickel, Molybdän, Mangan, Aluminium und Vanadium erreichen auch in der dynamischen Bedarfsvorausschau keine kritischen Werte. Auch bei ausschließlicher Verwendung von molybdänlegierten Stählen würde sich der Bedarf an Molybdän bei ca. 2 % der Produktion des Jahres 2013 bewegen.
- Der Palladiumbedarf in Höhe von 41 t in der Projektion B könnte 2035 über ein Fünftel der Jahresproduktion 2013 erreichen. Auch in der moderateren Bedarfvorschau in der Projektion A wären die 19 t Palladiumbedarf für den gesamten Palladiummarkt relevant.

Insgesamt liegt der zukünftige spezifische Ressourcenbedarf für die Meerwasserentsalzung in einer Größenordnung, die keine Engpässe aufgrund des Ausbaus dieser Technologie bis zum Jahr 2035 bei den benötigten Rohstoffen, mit Ausnahme des Palladiums in Projektion B, erwarten lässt. Der gesamte zukünftige Bedarf nach korrosionsfesten Werkstoffen kann in dieser punktuellen Abschätzung allerdings nicht ermittelt werden. Diese Werkstoffe sind auch für etablierte marine Techniken wie Schiffe, Bohrseln, Hafenanlagen, Unterwasserpipelines usw. erforderlich.

4.31.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Da bei Titan-Metall und Palladium merkliche Nachfrageimpulse auf die Rohstoffmärkte wahrscheinlich sind, stellt sich auch die Substitutionsfrage. Korrosionsschutz für Meerwasserentsalzanlagen ist nicht zwingend auf Palladium oder Titan angewiesen, weshalb bei einem Ansteigen der Palladium- oder Titan-Metallpreise mit einem Ausweichen auf andere Titanlegierungen bzw. Stahlqualitäten zu rechnen wäre.

Die korrosionsfesten Werkstoffe in der Meerwasserentsalzung lassen sich grundsätzlich gut recyceln (OUTOKUMPU o. J.). Aufgrund der hohen Wachstumsraten bei der Installation und rund 25 Jahren Anlagenlebensdauer entlastet das Recycling die Primärrohstoffmärkte aber nur mit einem hohen Zeitverzug.

4.32 Festkörper-Laser für die industrielle Fertigung

4.32.1 Technologiebeschreibung

Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) bezeichnet eine Technologie zur Erzeugung/Generierung eines stark gebün-

delten Lichtstrahls hoher Intensität. Das optisch aktive Material liegt zwischen zwei Spiegeln, von denen einer halbdurchlässig ist. Eine stehende Welle läuft zwischen den beiden Spiegeln hin und her. Die kohärente Laserstrahlung ist parallel und kann durch optische Linsen auf kleinste Flächen fokussiert werden, so dass sehr hohe Energiedichten entstehen. Der eigentliche Laser besteht aus einem Wirts- und dem aktiven Lasermaterial.

Abb. 4.89 zeigt einen typischen Nd:YAG-Laser zur Metallbearbeitung:

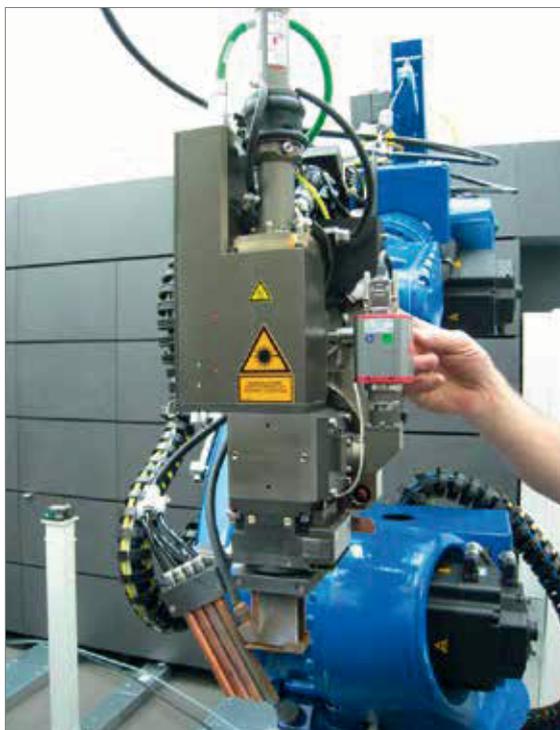


Abb. 4.89: Nd:YAG-Laser zur Metallbearbeitung
(Quelle: Reinold Tomberg, WIKIMEDIA)

Der weltweit dominierende Marktsektor für Laseranwendungen sind Laser zur industriellen Materialbearbeitung (meist für die Fertigung). Hochleistungslaser ermöglichen eine bewegliche, schlanke und umweltfreundliche Fertigung. Sie kommen im großen Maßstab u. a. in der Automobilindustrie zum Einsatz und sind ein Schlüsselement für „Industrie 4.0“, die Digitalisierung und Flexibilisierung der Produktion von morgen.

Haupttechnologien sind CO₂-Laser, Direkte Dioden Laser, Festkörperlaser einschließlich Faserlaser und Excimerlaser (EPIC 2015, VDMA 2013). In Festkörperlasern werden typischerweise monokristalline Kristalle als Wirtsmaterial verwendet, die meist mit dreiwertigen Ionen der Seltenen Erden oder Übergangsmetalle als aktivem Lasermaterial dotiert sind. Zu den Anregungsarten gehören Laserdioden, Bogen- oder Blitzlampen. Die Emissionswellenlänge liegt typischerweise bei 1 µm (Bandbreite: ca. 0,3–3 µm). Bei den Festkörperlasern werden die Bauformen Stab- („Rod“), Scheiben- („Disk“) und Faser- („Fiber“)-Laser unterschieden.

Tab. 4.88 zeigt gängige aktive Lasermaterialien und Wirtsmaterialien für Festkörperlaser im Überblick:

Tab. 4.88: Wichtige Materialien für Festkörperlaser, YAG - Y₃Al₅O₁₂ (Granat), YLF - YLiF₄, LiCAF - LiCaAlF₆, LiLuF - LiLuF₄, LiSAF - LiSrAlF₆, LiSGAF - LiSrGaF₆
(Quelle: PASCHOTTA 2008a und b)

| Ion | Typische Wirtsmaterialien |
|-------------------------------|--|
| Neodym (Nd ³⁺) | YAG, YVO ₄ , YLF, SiO ₂ |
| Ytterbium (Yb ³⁺) | YAG, Wolframate, SiO ₂ |
| Erbium (Er ³⁺) | YAG, SiO ₂ |
| Thulium (Tm ³⁺) | YAG, SiO ₂ , Fluoridglas |
| Holmium (Ho ³⁺) | YAG, YLF, SiO ₂ |
| Praseodym (Pr ³⁺) | SiO ₂ , Fluoridglas |
| Cerium (Ce ³⁺) | YLF, LiCAF, LiLuF, LiSAF, and ähnliche Fluoride |
| Titan (Ti ³⁺) | Saphir |
| Chrom (Cr ²⁺) | Zink Chalkogenide wie ZnS, ZnSe und ZnS _x Se _{1-x} |
| Chrom (Cr ³⁺) | Al ₂ O ₃ (Rubin), LiSAF, LiCAF, LiSGAF |
| Chrom (Cr ⁴⁺) | YAG, MgSiO ₄ (Forsterit) |

Technologisch am bedeutsamsten sind Ytterbium- und Neodym-dotierte Wirtsmaterialien für Stab- und Scheibenlaser sowie Erbium- und Ytterbium-dotierte Wirtsmaterialien speziell für Faserlaser (auch als Co-Dotierung).

Herstellung

Nahezu alle Nd-YAG Laserkristalle werden mittels des Czochralski-Verfahrens hergestellt. Bei diesem Verfahren liegt das Ausgangsmaterial zunächst als Schmelze knapp oberhalb seiner Schmelztemperatur vor. Dann wird ein Kristallisationskeim eingebracht und langsam unter fortwährender Wahrung des Kontaktes mit der Schmelze nach oben gezogen, wodurch ein Kristall gezüchtet wird. Die Herstellung eines Einkristallkörpers in einer kontinuierlich überwachten Umgebung dauert alleine vier bis fünf Wochen. Es gibt derzeit kein anderes großtechnisches Verfahren, mit dem Nd:YAG in ausreichender optischer Reinheit und Homogenität für die Verwendung in einem Lasersystem hergestellt werden kann. Mit Hilfe von Diamant-Bohrern werden aus dem Einkristall Rohstäbe extrahiert, weiterbearbeitet und letztlich fein geschliffen, poliert und mit einem Anti-Reflexionsüberzug versehen (RODITI 2015).

Anwendung

Zu den Bearbeitungsverfahren von Materialien mit Lasern, insbesondere von Metallen, gehören das Schneiden, das Verbinden (inkl. Schweißen), die Oberflächenbehandlung (inkl. Gravierung), die Formgebung und das Prototyping. Diese Anwendungen benötigen Prozessgase, die Entfernung von Rückständen sowie die Optimierung von Laserleistung und Pulsdauer (EPIC 2015).

Die vier Laserhaupttypen für die industrielle Fertigung haben folgende Anwendungsgebiete:

- CO₂-Laser im mittleren Leistungsbereich (1–6 kW) werden vor allem zum Schneiden von Stahlblechen, im großen Leistungsbereich (über 6 kW) zum Schweißen von Metallen und im niederen Leistungsbereich zum Schneiden, Bohren und Schweißen von Nichtmetallen eingesetzt (VDMA 2013). Die Strahlqualität ist gut, kann aber nur bei Direktkontakt von Laseremissionskopf und Werkstück effizient übertragen werden (EPIC 2015).
- Festkörperlaser mit Leistungen oberhalb von 0,5 kW werden überwiegend zum Schneiden und Schweißen, insbesondere von Karosserieblechen in der Automobilindustrie, eingesetzt. Hier kommen zunehmend dünne

Scheibenlaser zum Einsatz, die auf die Übertragung von gepulsten Laserstrahlen hoher Leistung hin optimiert worden sind. Festkörperlaser mit Leistungen unterhalb von 0,5 kW dienen dem Feinschneiden und Feinschweißen, so auch zum Punktschweißen in der Elektronikindustrie (VDMA 2013). Die Anregung („Pumpen“) mittels Diodenlasern führt zu besserer Strahlqualität, höherer Leistungsstabilität, längeren Wartungsintervallen und höherer Effektivität (i. e. nach EPIC (2015) die Generierung eines harmonischen Laserstrahls bei geringer Output-Leistung oder sehr hohe Peak-Power Pulse).

- Faserlaser generieren, durch Diodenlaser angeregt, einen stabilen Single-Mode Strahl. Für ultrakurze Pulse mit Pulsdauern im Femtosekundenbereich können Pulsspitzenleistungen von einigen Hundert Megawatt erzielt werden. Dadurch kann ohne Aufschmelzen des Werkstoffes gebohrt und geschnitten werden, was die Laserbearbeitung von transparenten Medien (Gläser) und Keramiken ermöglicht (EPIC 2015).
- Diodenlaser mit Leistungen von weniger als 0,5 kW kommen zum Schweißen von Kunststoffen, Metallfolien, zum Lötten und Mikrohärtens zum Einsatz. Die Leistungsklasse von über 1 kW dient dem Härtern, Auftragsschweißen, dem Wärmeleitungsschweißen und dem Hartlöten in der Automobilproduktion, von über 6 kW dem Aufbringen von Verschleißschutzschichten (VDMA 2013).
- Excimerlaser tragen durch die kurze Wellenlänge des Lichtstrahls im UV-Bereich und die kurze Pulsdauer Energie lokal begrenzt in das Bearbeitungsmaterial ein. Sie sind für Strukturierungen von Kunststoffen, Keramik sowie in der Elektronik im Submikronbereich geeignet (VDMA 2013). Eine neue Anwendung von Excimerlasern ist das Umkristallisieren (Annealing) von amorphem Silizium in eine hoch leitfähige Kristallschicht bei der Produktion von Aktiv-Matrix-Displays z. B. für Mobiltelefone und Flachbildschirme (COHERENT LASERSYSTEMS 2013).

Hochleistungslaser sind inzwischen in zahlreichen Industriebranchen etabliert. Haupteinsatzgebiete sind die Automobilindustrie, Schiffswerften, Flugzeugbau, Stahlindustrie und Elektronikindustrie. Der Wandel zur Industrie 4.0 begünstigt die Ausweitung der Anwendung von Hochleistungslasern.

Durch die Entwicklung von Faserlasern sind die Türen für neue Anwendungsgebiete eröffnet.

Technische Innovationen finden hauptsächlich auf den Gebieten Diodenlaser-Pumpen, optische Strahlführung, Laserwirtsmaterialien, reflektierende, dispersive und fokussierende Elemente sowie Strahlübertragung statt. Laser mit Leistungen im Petawatt-Bereich und Pulsenergie im Kilojoule-Bereich werden entwickelt (EPIC 2015), ebenso wie kostengünstige Ultrakurzpulslaser und Hochleistungs-Ultrakurzpulslaser (u. a. durch die Amphos GmbH, ein Spin-Off von Fraunhofer ILT und RWTH Aachen).

Die Laserindustrie stellt nicht nur Laserkomponenten her, sondern sie entwickelt und integriert Laser in Wertschöpfungsketten der verarbeitenden Industrie. Der Markt für solche Kundenlösungen ist etwa 2,5 Mal so groß wie für Laserkomponenten. Europäische Firmen dominieren die gesamte Laserwertschöpfungskette (Laserstrahl-Generierung, Laserstrahl-Überbringung, Prozessumgebung und Werkstück-Handling). Marktführer bei Lasern für die Materialbearbeitung ist die Deutsche Firma Trumpf mit 3,42 Mrd. US\$ Umsatz, entsprechend 30 % Marktanteil im Jahr 2014. Auch Rofin und Jenoptik gehören zu den neun umsatzstärksten Firmen (EPIC 2015). Deutschland verfügt über einen leistungsfähigen Maschinen-, Anlagenbau- und Fahrzeugbau und sieht sich als Vorreiter auf dem Weg zur Industrie 4.0. Das Forschungsinstitut für Mineralische und Metallische Werkstoffe – Edelsteine/Edelmetalle in Idar-Oberstein wird als Nr. 1 in Europa bei der Kristallzüchtung angesehen.

4.32.2 Rohstoffinhalt

Gesamtdarstellungen zum Rohstoffinhalt von Lasern für die industrielle Fertigung liegen nicht vor. Hinweise auf besondere Materialbedarfe liefert folgende Übersicht:

- Bei den aktiven Lasermaterialien ragen die dreiwertigen Ionen der Seltenen Erden (Nd, Yb, Er, Tm, Ho, Pr, Ce) heraus, bei den Wirtsmaterialien Yttrium als Bestandteil von Granaten (YAG), Lithiumfluoriden (YLF) und Vanadaten (vgl. Tab. 4.89). Erbium und Ytterbium kommen auch gemeinsam als Dotierungsmittel vor.
- Hochtemperatur- und Chemikalienresistente Tiegel für die Züchtung hochreiner Kristalle wie Nd:YAG bestehen in der Regel aus dem Platingruppenmetall Iridium (OVERTON 2013).
- Eine Hauptkomponente in Faser- und Festkörperlasern sind Diodenlaser Pumpeinheiten (GaAs). Diese Diodenlaser werden auch als Stand-Alone System in industriellen Anwendungen, z. B. für die Kennzeichnung verwendet (EPIC 2015).
- Helium und Neon sind aktive Lasermaterialien in Helium-Neon-Lasern. Helium ist auch ein Schlüsselement in CO₂-Lasern, bei denen die angeregten CO₂-Atome durch den Stoß mit Helium-Atomen moderiert werden (OVERTON 2013). Neon oder Helium werden als inertes Puffergas in Excimerlasern verwendet (COHERENT LASERSYSTEMS 2010).

Tab. 4.89 fasst quantitative Angaben, aus denen sich der Rohstoffinhalt in Faser- und Festkörperlasern abschätzen lässt, zusammen:

Die Abmessungen der Laserbauformen variieren beträchtlich. Stäbe sind zwischen 50 und 250 mm

Tab. 4.89: Materialeigenschaften und Bauformen von Laser-Materialien, Wirtsmaterial, Dotierung und Wellenlänge von Nd:YAG und Yb:YAG nach FEE-LASER CRYSTALS (2015) und RODITI (2015), von Er:SiO₂ und Yb: SiO₂ nach ZHU & PEYGHAMBARIAN 2010. Dichte von YAG nach Laser Materials Corporation 2008, von SiO₂-Glasfaser nach WALLEMBERGER et al. 2001

| | Nd:YAG | Yb:YAG | Er:SiO ₂ | Yb:SiO ₂ |
|---------------|--|--|------------------------------|-----------------------------|
| Wirtsmaterial | Y ₃ Al ₅ O ₁₂ | Y ₃ Al ₅ O ₁₂ | SiO ₂ | SiO ₂ |
| Dotierung | 0,1–2,5 at.-% Nd ³⁺ | 0,1–20 at.-% Yb ³⁺ | 0,5–6 at.-% Er ³⁺ | 1,8 at.-% Yb ³⁺ |
| Wellenlänge | 1.064 nm | 1.029–1.040 nm | 2.940 nm | 1.060–1.080 nm |
| Dichte | 4,55 g/cm ³ | 4,55 g/cm ³ | 2,15–2,68 g/cm ³ | 2,15–2,68 g/cm ³ |

lang und haben einen Durchmesser von 1–16 mm (FEE-LASER CRYSTALS 2015, LASER MATERIALS CORPORATION 2008, RODITI 2015), aber auch dünnere und kürzere Exemplare sind kommerziell erhältlich. Scheiben haben typischerweise einen Durchmesser von 5–45 mm und eine Dicke von 0,1–1 mm (FEE-LASER CRYSTALS 2015, RODITI 2015), wovon vier bis zehn in einem Lasersystem kombiniert werden. Single-Mode Fasern für Faserlaser haben typischerweise eine Länge von 1.000–25.000 mm, der Durchmesser des aus Fasern bestehenden Kerns liegt bei 10–200 µm, mit Bewehrung vom Laserdioden-Pumpen liegt der Durchmesser bei rund 200–500 µm (IPG PHOTONICS 2015, NKT PHOTONICS 2013, SPECTRA-PHYSICS 2015, SPEISER 2014). Single-Mode Fasern werden üblicherweise zu Multi-Faser Outputs gebündelt, deren Durchmesser typischerweise bei ca. 0,2–1 mm liegt.

4.32.3 Foresight industrielle Nutzung

Angesichts der Diversität von Anwendungssektoren und Technologien gilt es, mehrere Lasermärkte zu unterscheiden. Nach dem Wert der Laserkomponenten entfielen in 2014 rund 34 % (entsprechend 3,3 Mrd. US\$) des Gesamtmarktes in Höhe von 9,8 Mrd. US\$ auf Laser für die Materialbearbeitung, nach dem Wert für Lasersysteme waren es gar 49 % (entsprechend 11,6 Mrd. US\$) des Gesamtmarktes in Höhe von 23,7 Mrd. US\$ (EPIC 2015). Hinsichtlich der Technologien teilte sich der Markt für Lasersysteme zur Materialbearbeitung in 2014 wie folgt auf: 34 % für CO₂-Laser, 17 % für Festkörperlaser, 13 % für direkte Dioden-Laser und 36 % für Faserlaser. Mehr als 60 % des Lasermarktes für industrielle Materialbearbeitung basiert auf Hochleistungsdiodenlasertechnologie auf GaAs-Basis (EPIC 2015).

Die Firma Rofin verkaufte 2013 rund 5.380 Laser, davon 2.125 Laser für die Makrobearbeitung (214,6 Mio. US\$) und 3.255 Laser für die Mikrobearbeitung und für Beschriftungsanwendungen (272,7 Mio. US\$) (ROFIN 2014). Aus diesen Werten lässt sich ein Stückpreis von 101.000 bzw. 83.700 US\$ pro Laser errechnen. Mit einem Umsatzanteil der Firma Rofin von ca. 5 % (EPIC 2015) errechnet sich die Zahl verkaufter Laser für die industrielle Materialbearbeitung insgesamt zu 89.400 Stück. Legt man zur Hochrechnung der Daten von ROFIN (2014) die Marktanteile von Lasern für

die industrielle Materialbearbeitung nach EPIC (2015) zu Grunde, dann enthält man Stückzahlen von 33.000 bis 138.000 Lasern je nachdem, ob der Komponenten- oder der Systemmarkt angesetzt wird. Weiterhin ist bekannt, dass alleine für die Kennzeichnung und Gravierung in 2011 rund 33.000 Laser (BELFORTE 2012) und für das Schneiden rund 5.000 Laser verkauft (HAUSKEN 2012) wurden. Nach unserer Schätzung lag die jährlich verkaufte Anzahl an Lasersystemen für die Materialbearbeitung in 2013 bei rund 80.000 Stück (Bandbreite: 50.000–130.000).

Faserlaser sind seit mehreren Jahren ein stetig wachsender Teil des Lasermarktes. Es wird prognostiziert, dass Faserlaser und Festkörperscheibenlaser weiter Marktanteile aufbauen, teilweise durch Ersatz von CO₂-Lasern in Anwendungen wie dem Schneiden von Metallblechen. Bei den Festkörperlasern ersetzen Scheibenlaser zunehmend Stablaser (EPIC 2015).

Der Gesamtmarkt für Laser zur Materialbearbeitung wächst nach Optech-Consulting bis 2020 noch mit dem 1,5-fachen des weltweiten Brutto-sozialproduktes.

- Projektion A: Legt man die Wachstumsprognose der OECD (2012) bis 2030 in Höhe von 2,4 bis 3,5 % pro Jahr zu Grunde, so errechnet sich mit 3 % BSP-Wachstum pro Jahr bis 2035 eine BSP-Steigerung auf 192 % im Vergleich zu 2013. Setzt man den Wachstumsfaktor für Laser zur Materialbearbeitung bis 2020 mit 1,5, von 2021 bis 2028 mit 1,4 und von 2029 bis 2035 mit 1,3 an, so wächst der Lasermarkt für die Fertigung bis 2035 auf 247 % im Vergleich zu 2013.
- Sollten sich die Wachstumsraten von vor der Finanzkrise 2008 fortschreiben (ca. 8 %), so ergäbe sich bis 2035 ein Lasermarkt für die Materialbearbeitung in Höhe von 544 % im Vergleich zu 2013.

Die Marktanteile der verschiedenen Technologien liegen nach unserer Schätzung im Jahr 2035 für CO₂-Laser bei 10 %, für Dioden-Laser und Festkörper-Laser jeweils bei 20 % und für Faser-Laser bei 50 %.

4.32.4 Foresight Rohstoffbedarf

Der Rohstoffbedarf ist gemäß Tab. 4.90 anhand der beiden Marktprojektionen und folgender Annahmen über Marktanteile und Geometrien berechnet worden.

- Dotierung von YAG mit Nd 1 at.-%, mit Yb 5 at.-%; von SiO₂ mit Er 2 at.-%, mit Yb 1,8 at.-% (jeweils gleiche Marktanteile der Dotierungen).
- Stab mit Länge von 100 mm und Durchmesser von 5 mm, 6 Scheiben pro Laser jeweils mit einem Durchmesser von 20 mm und einer Dicke von 0,25 mm sowie Faserlaser mit einer Länge von 10.000 mm und einer Dicke von 0,5 mm.
- Marktanteile 2035: Faserlaser 50 %, Festkörperlaser 20 %. Bei Festkörper-Lasern gleiche Marktanteile für Stab- und Scheibenlaser.

Tab. 4.90: Globale Produktion (Metallproduktion berechnet aus den SEO, Schätzung inkl. illegaler Förderung in China laut KINGSNORTH 2015) und Rohstoffbedarf für die Herstellung von Lasern für die industrielle Fertigung in t (die Ytterbium-Nachfrage setzt sich aus den Beiträgen für YAG und Glasfasern zusammen)

| Rohstoff | Produktion 2015 | Bedarf 2013 | Bedarfsvor-schau 2035 |
|-----------|-----------------|-------------|-----------------------|
| Yttrium | 5.500 | 15,1 | 43,8–96,4 |
| Neodym | 28.900 | 0,04 | 0,12–0,26 |
| Ytterbium | < 700 | 1,26 | 4,5–7,7 |
| Erbium | 600 | 1,01 | 3,7–8,2 |

Die Projektionen lassen nur einen kleinen Beitrag von Lasern für die Fertigung zur gesamten Rohstoffnachfrage für Yttrium und Neodym erwarten. Etwas anders verhält es sich mit den Dotierungselementen Ytterbium und Erbium. Die exakten Produktionszahlen sind nicht bekannt, der relative Nachfrageimpuls durch Laser für die Materialbearbeitung scheint bis 2035 jedoch nennenswert werden zu können. Die untere Projektion ist ein wenig realistischer als die obere, d. h. wir erwarten Nachfrageimpulse für Ytterbium und Erbium in

Höhe des oberen einstelligen Prozentbereichs der heutigen Produktion. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass nur mit Produktinhalten und nicht mit Prozessbedarfen gerechnet wurde.

Auch wenn die spezifischen Materialbedarfe an Erbium und Ytterbium mit großen Unsicherheiten behaftet sind, so können stärkere Wachstumsraten als die hier zugrundegelegten moderaten Annahmen diesen Faktor bei weitem überkompensieren. Insgesamt besteht ein Bedarf nach soliden Daten zum spezifischen Materialbedarf für Laser zur Materialbearbeitung und auch für andere Einsatzzwecke. Nicht gelungen ist eine Quantifizierung der Galliumnachfrage, obwohl geschätzte 60 % der Laser für die Materialbearbeitung durch GaAs gepumpt werden. Eine obere Abschätzung der Galliumnachfrage durch Laser insgesamt wäre ggf. möglich, indem vom gesamten optoelektronischen Einsatz (80 t Gallium, +/- 38 Tonnen im Jahr 2010 für LED, Laser, Solarzellen nach DEHNAVI (2013)) die Anteile für LED und Solarzellen abgezogen würden. Nicht untersucht wurden die Rohstoffbedarfe an Iridium für Tiegel zum Züchten der YAG-Kristalle sowie der Bedarf an den Edelgasen Helium und Neon für Helium-Neon-Laser, CO₂-Laser bzw. Excimerlaser. Die Nachfrage nach Helium übersteigt ihr Angebot. Rund 75 % der globalen Produktion stammen aus den USA (OVERTON 2013). Es wird erwartet, dass die Nachfrage nach Neon dessen Angebot ab 2014 übersteigen wird. 70 % des global produzierten Neons stammt aus Russland und der Ukraine. Im Zuge der Konfrontation beider Länder ist das globale Neon-Angebot deutlich gesunken (BETZENDAHL 2014).

4.32.5 Recycling, Ressourceneffizienz, Substitution

Laserkristalle, die in der industriellen Fertigung eingesetzt werden, werden in großem Umfang im Wirtschaftskreislauf gehalten.

Zur Prozessausbeute des Czochralski-Verfahrens zur Kristallzüchtung liegen keine aktuellen Informationen vor. Dies gehört in der Regel zu den Betriebsgeheimnissen der Unternehmen.

Laser ersetzen viele andere Technologien und erfahren selbst kaum Konkurrenz durch andere Technologien. Allerdings wagen selbst Marktanalysten keine kurz- bis mittelfristigen Prognosen,

wie sich die Laser-Technologien untereinander ersetzen werden (HAUSKEN 2012).

4.33 Nanosilber

4.33.1 Technologiebeschreibung

Silber wird aufgrund seiner antimikrobiellen Eigenschaften schon seit Jahrhunderten in zahlreichen Produkten des täglichen Lebens sowie der Medizin eingesetzt und gewinnt noch zunehmend an Bedeutung. Der Einsatz erfolgt in fester, gelöster, kolloidaler und zunehmend in nanopartikulärer Form, wobei die Silberpartikel wiederum in freier oder gebundener Form vorliegen können.

Unabhängig davon, ob Silber als wasserlösliches Salz oder als Silber-Nanopartikel eingesetzt wird, ist für die Wirkung immer das Silberion und dessen Konzentration entscheidend. Es entfaltet auf drei Arten die bakterizide Eigenschaft. Zum einen reagieren Silberionen mit schwefel- und phosphathaltigen Enzymen der Zellwand und führen dort zur Störung des transmembrösen Stoffwechsels. Zum anderen werden sie wie essenzielle Calciumionen von den Zellen aufgenommen und an schwefel- und phosphathaltige Makromoleküle gebunden. So können sie auch an die DNA andocken und damit die Reproduktion verhindern. Zum Dritten verringern sie die Adhärenz der Mikroorganismen an Oberflächen.

Während Silber beim Einsatz als wasserlösliches Salz als Ion vorliegt und somit verfügbar ist, liegen bei nanopartikulärem Silber komplexere Verhältnisse vor. Es müssen die Verfügbarkeit der Partikel sowie auch die Bildung von Silberionen berücksichtigt werden. Von MORONES et al. (2005) wurden für gramnegative Mikroorganismen drei Wirkmechanismen für freie Silber-Nanopartikel identifiziert:

- Bindung an und Einlagerung in die Zellwand, wodurch wichtige Funktionen, wie beispielsweise die Permeabilität, gestört wird;
- Bindung an Schwefel- und Phosphat-haltige Moleküle im Zellinneren (z. B. DNA, S-haltige Enzyme) und Störung von deren Funktion;
- Freisetzung von Ag-Ionen, die wiederum antibakteriell wirken.

In der Untersuchung von MORONES et al. (2005) zeigte sich auch, dass für die untersuchten gramnegativen Bakterien nur Partikel bis 10 nm toxisch waren.

Herstellung

Die Silber-Nanopartikel werden durch sehr unterschiedliche Verfahren in sehr unterschiedlichen Qualitäten hergestellt. Einerseits durch einfache Reduktion von Silbersalzlösungen und andererseits durch komplexe chemisch-physikalische Methoden, z. B. Wasserstoff-Reduktion, Vacuum Evaporation on Running Liquids (VERL-Methoden) (DIETZEL 2004). Trägermaterialien von Nanosilber können Zeolithe, Gläser und Oxidpartikel (z. B. TiO_2) sein. Der hohe Anspruch liegt u. a. darin, die Nanopartikel reproduzierbar herzustellen und so an Oberflächen zu binden, dass sie aktiv bleiben aber nicht in die Umwelt gelangen (GÜNTHER 2006). Emissionen in die Umwelt von Nanopartikeln sind derzeit analytisch kaum nachweisbar (BURKHARDT 2008).

4.33.2 Rohstoffinhalt

Zusätzlich zur Bergwerksförderung von ca. 25.000 t im Jahr 2013 findet im erheblichen Umfang eine Nutzung von Silberschrotten statt (ca. 6.000 t). Die wesentlichen Einsatzbereiche des weltweit im Jahre 2013 etwa 30.600 t konsumierten Silbers sind in Abb. 4.90 dargestellt. Die wichtigsten industriellen Anwendungen liegen in der Elektrotechnik und Elektronik (Feinsilberkontakte oder -legierungen bzw. Verbundwerkstoffe mit Silber), in der Löttechnik (bleifreie Weichlote und Hartlote mit guter Oxidationsbeständigkeit) und in der Dünnschichttechnik (Galvanisieren, Sputtern für CDs). In der Medizintechnik wird Silber z. B. in der Dentaltechnik oder in medizinischen Kunststoffen benutzt. Die Anwendung als Nanosilber macht ca. 1 % aus, das sind ca. 280 t.

Die fungiziden, bakteriziden und herbiziden Wirkungen des Silbers sind seit dem Mittelalter bekannt. Heutzutage sind vor allem im asiatischen Markt anorganische antimikrobielle Additive populär, seitdem 1983 die ersten Silber-Zeolithe von Shinagawa Fuel Co. entwickelt wurden. Wegen ihrer Haltbarkeit und thermischen Stabilität werden sie in Textilien und Kunststoffen eingesetzt

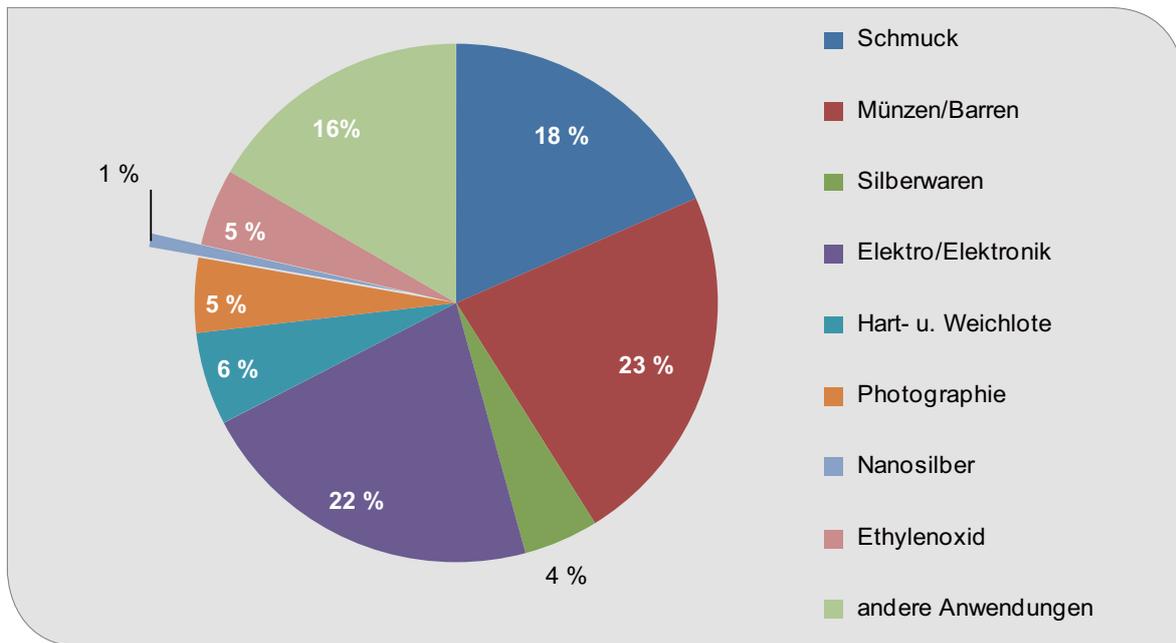


Abb. 4.90: Verbrauch von Silber weltweit 2013
(Quelle: Eigene Darstellung nach GFMS 2014 und SNWG 2014)

und auch als Schutz vor Infektionen mit Methicillin-resistenten *Staphylococcus aureus* (MRSA, so genannten „Krankenhaus-Keimen“). In Asien wird Nanosilber in vielen Anwendungsbereichen eingesetzt, vom Reisanbau bis zum Einweben von nanosilberhaltigen Fasern in Socken oder Unterwäsche. Es werden auch Produkte angeboten, in deren Oberfläche Silberpartikel eingebettet sind. Diese Beschichtungen sollen das häufig als Nanopartikel vorliegende Silber langsam abgeben und antibakteriell wirken. Zu diesen Produkten gehören Kühlschränke, Lichtschalter, Zahnbürsten, Badezimmermöbel oder Kücheneinrichtungen. Zum Teil wird Nanosilber aber auch nur aus Werbegründen genannt (HUND-RINKE et al. 2008, MARKT 2011).

Die Silberkonzentration in Additiven, die zur Einstellung antibakterieller Eigenschaften in Produkten eingesetzt werden, liegen deutlich unter 2 % (HUND-RINKE et al. 2008). Da sich schon bei Konzentrationen von weniger als 0,1 % Farbe und Transparenz merklich verändert, wird aber beispielsweise in der Farb- und Lackindustrie Silber in einem Konzentrationsbereich von maximal 100 ppm verwendet.

4.33.3 Foresight industrielle Nutzung

Bei der industriellen Anwendung bioziden Silbers dominiert die Wasseraufbereitung, hier werden aber fast ausschließlich Silberionen eingesetzt, zum Teil auf Feststoffen fixiert. Für Nanosilber werden vor allem Anwendungen in der bioziden Ausrüstung von Textilien und Kunststoffen gesehen (BLASER 2006). Weitere wichtige Anwendungen sind Farben und Lacke, Wasch- und Reinigungsmittel und die Medizintechnik. Steigende Patentzahlen am Europäischen Patentamt und Unternehmensaufkäufe dokumentieren ein steigendes industrielles Interesse an biozidem Silber (vergleiche Abb. 4.91).

4.33.4 Foresight Rohstoffbedarf

Die Abschätzung des Silberbedarfs für Nanosilber ist schwierig, da es schon für die heute verwendeten Mengen keine Marktübersicht gibt. Das liegt teilweise an dem Wettbewerb zwischen den Herstellern, andererseits aber auch an den sehr unterschiedlichen Märkten: während der deutsche Markt auf 2008 auf ca. 8–10 t silberhaltige Additive (= ca. 200 kg Silber) beziffert wird, sollte das

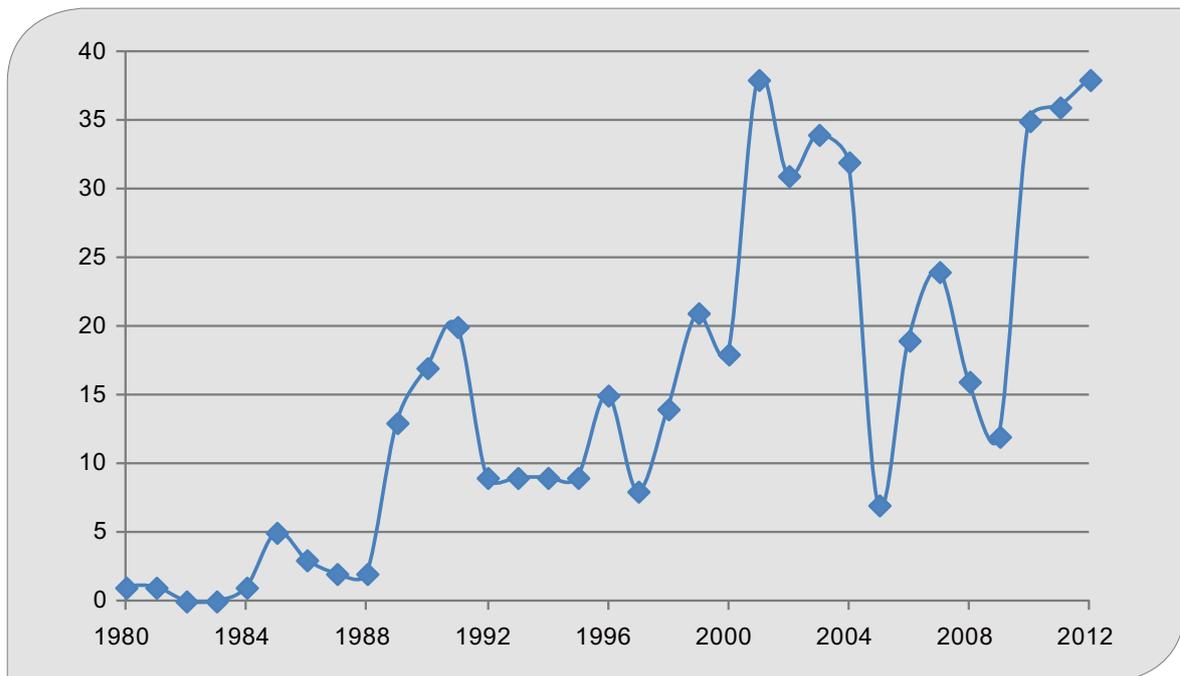


Abb. 4.91: Patente zu Silber als Biozid am Europäischen Patentamt
(Quelle: FRAUNHOFER ISI)

japanische Marktvolumen für Additive bei jährlich 500 t liegen (HUND-RINKE et al. 2008).

In der Literatur genannte Produktionswerte für Nanosilber liegen bei einigen hundert Tonnen (500 t nach NOWACK & MUELLER (2008) bzw. 320 t nach NOWACK et al. (2011)). Wie oben erwähnt, geht diese Studie davon aus, dass Nanosilber ca. 1 % des Gesamtsilberverbrauchs ausmacht, das sind ca. 280 t Nanosilber für 2013 (vergleiche Tab. 4.91).

Die Abschätzung des weltweiten Einsatzes an Nanosilber für 2035 ist aus denselben Gründen wie für 2013 sehr unsicher. Inwieweit die derzeit in Westeuropa und den USA geführte kritische Diskussion (BUND 2009, FoE 2009) zur Nanotechnologie und die Befürchtungen vor einer Resistenzbildung bei Mikroorganismen durch den breiten Silbereinsatz die Marktentwicklung dämpfen, ist

noch nicht sicher absehbar. Auf der anderen Seite hat Nanosilber das Potenzial, stärker toxischere organische Biozide zu substituieren. Unterstellt man ein Wachstum von ca. 6 %, das in einer Studie für die Jahre 2013 bis 2015 für das Silver Institute vorausgesagt wurde (CRU CONSULTING 2014), auch bis zum Jahre 2035, errechnet sich ein Wert von 1.000 Tonnen für das Jahr 2035.

4.33.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Das Recycling von Nanosilber wird aus wirtschaftlichen Gründen in der Regel nicht betrieben.

Tab. 4.91: Globale Produktion für Silber (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf für Nanosilber in t

| Rohstoff | Weltproduktion 2013 (Bergwerksförderung) | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|----------|---|-------------|----------------------|
| Silber | 26.241 | 280 | 1.000 |

Medizintechnik

4.34 Medizinische Implantate

4.34.1 Technologiebeschreibung

Medizinische Implantate dienen dazu, Körperfunktionen zu unterstützen oder wieder herzustellen. Es handelt sich dabei also um Prothesen und, weil Implantate im Körper verbleiben, um sog. Endoprothesen. Wengleich auch in der Tiermedizin Implantate eingesetzt werden, haben sie im Vergleich zur Humanmedizin eine verschwindende wirtschaftliche Bedeutung. Die Anwendungen medizinischer Implantate sind vielfältig, darunter Zahnimplantate, Gelenkersatz (orthopädische Implantate), Glasaugen, Nägel, Platten, Drähte zur Knochenfixierung, Hirnschrittmacher, Herzschrittmacher, künstliches Herz, Schädelrekonstruktion, Arzneimitteldepots, Brustimplantate der plastischen Chirurgie und RFID-Chips zur Überwachung von Körperfunktionen, um nur einige zu nennen (HUNT et al. 2012).

Eine Zukunftstechnologie, von der allerdings keine Nachfrageimpulse nach metallischen oder mineralischen Rohstoffen ausgehen, ist das „Tissue

Engineering“. Dies ist eine Technologie, die aus körpereigenem Gewebe Ersatz für Weichteile zu züchten trachtet, beispielsweise Hautlappen oder Herzklappen.

Aus dem großen Feld der Prothetik werden orthopädische Implantate näher betrachtet, da diese der mengenmäßig größte Nachfragemarkt für biokompatiblen Materialien darstellen – historisch und in absehbarer Zukunft (HUNT et al. 2012). Die Hauptursache für das Einsetzen von orthopädischen Implantaten ist Arthrose, ein stark mit zunehmendem Alter korrelierendes Leiden. Endoprothesen, insbesondere Hüft- und Kniegelenkimplantate sind heute effektive Mittel zur Schmerzlinderung und zur signifikanten Minderung von körperlicher Behinderung in schwerwiegenden Fällen von Arthrose (OECD 2011, 2015).

Abb. 4.92 zeigt die Teile von künstlichen Hüft- und Kniegelenken. Hüftgelenkimplantate bestehen aus den in den Beckenknochen zu verankernden Hüftpfannenelementen und dem Schaft mit Gelenkkopf für den Oberschenkelknochen. Für die Dauerhaftigkeit des Implantats sind neben der sicheren Verbindung mit den Knochen die tribologischen Eigenschaften der Gleitfläche zwischen Kopf und Pfanne entscheidend. Trotz der hohen Belastung darf kein die Funktion störender Verschleiß auftreten.

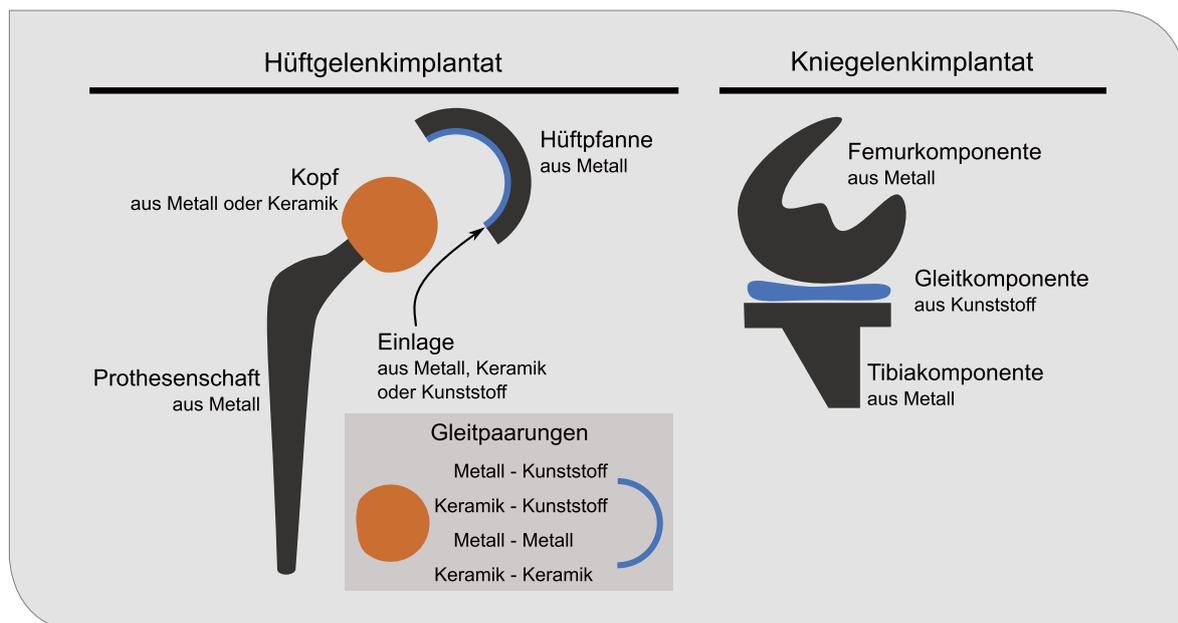


Abb. 4.92: Schematische Darstellung der Komponenten von Hüft- und Kniegelenkimplantate (eigene Darstellung nach BONESMART.ORG 2015a, 2015b, 2015c, AAOS 2015a, 2010, 2015b, HUNT et al. 2012, KNEERELACEMENTCOSTS.COM 2013, OPERATION-ENDOPROTHETIK.DE)

ten. Dies wird durch die Wahl hoch verschleißfester Werkstoffe erreicht. Die technischen Anforderungen an Kniegelenkimplantaten sind gleichartig (BONESMART.ORG 2015a, 2015c, OPERATION-ENDOPROTHETIK.DE, AAOS 2015a, 2015b). Die Kosten für Hüft- und Kniegelenkprothesen liegen zwischen ca. 2.000 und ca. 13.000 US\$ (Medianwert für Hüftprothesen ca. 4.800 US\$, für Knieprothesen ca. 6.100 US\$; ROBINSON et al. 2012).

4.34.2 Rohstoffinhalt

Sowohl bei Hüft- als auch bei Knieprothesen können die Teile, die in direkter Verbindung mit den Knochen stehen, sowohl aus Titan als auch Edelstahl oder einer Kobalt-Chrom-Molybdän-Legierungen bestehen (STIFTUNG WARENTEST 2006, BONESMART.ORG 2015b, HUNT et al. 2012).

Obwohl Titan in seiner mechanischen Eigenschaft ein nahezu ideales Material für die Verankerung der Prothesen ist, ist es allerdings wenig verschleißfest und eignet sich deshalb nicht als Werkstoff für Gleitpaarungen. Als Werkstoffe für Gleitpaarungen kommen Kobalt-Chrom-Molybdän-Legierungen (CoCrMo) und Keramiken, auch in Kombination mit ultrahochmolekularem Polyethylen (UHMWPE), zum Einsatz (AAOS 2010, 2015a, 2015b, KNEEREPLACEMENTCOSTS.COM 2013, STIFTUNG WARENTEST 2006, BONESMART.ORG 2015b). Früher genutzte Superlegierungen auf Nickelbasis wurden wegen häufiger Komplikationen durch Nickelallergien verdrängt (ANGERER et al. 2009). Verschleißfeste und biokompatible Werkstoffe für Gleitpaarungen sind (TÜV 2006, AAOS 2015b, 2015a, EPRD 2015, NJR 2014):

- CoCrMo / UHMWPE (Metall – Kunststoff)
- Keramik / UHMWPE (Keramik – Kunststoff)
- CoCrMo / CoCrMo (Metall – Metall)
- Keramik / Keramik

Die Verschleißrate nimmt in der Aufzählung von oben nach unten zu. Die Gleitpaarung Metall-Metall wird nach Berichten zur häufigeren Notwendigkeit für Folgeoperationen nur noch wenig genutzt (POOLMAN et al. 2015, NJR 2014, COHEN 2011).

Die CoCrMo-Werkstoffe sind auf Kobalt basierende biokompatible Superlegierungen mit typischerweise 66 % Kobalt, 28 % Chrom, 6 % Molybdän und geringem Kohlenstoffanteil von unter 0,35 %. Sie zählen zu den nickelfreien Stellite, Superlegierungen, die besonders hohe Verschleißfestigkeit aufweisen. Durch die Kombination von Titan-Legierungen für den Hüftgelenkschaft und CoCrMo für den Gelenkkopf werden die spezifischen Stärken beider Werkstoffe vereint (HUNT et al. 2012, ANGERER et al. 2009).

UHMWPE ist ein ultrahochmolekularer Polyethylen-Kunststoff mit hoher Druckfestigkeit und besten tribologischen Eigenschaften. Er besitzt einen niedrigen Reibbeiwert (wie Teflon) und ist selbstschmierend. UHMWPE dient als Gelenkpfanneinsatz, in welchem der Gelenkkopf (aus CoCrMo oder Keramik) gleitet (ANGERER et al. 2009, HUNT et al. 2012).

Eine Hüftprothese hat ein Gesamtgewicht von ca. 450 bis 900 g, je nach Materialauswahl und Größe (DEPUY ORTHOPAEDICS 2008). Bei Kniegelenkprothesen liegt das Gewicht bei ca. 280 bis 425 g (bonesmart.org 2015c), bis zu 500 g inkl. Zement (LEE et al. 2005).

Tab. 4.92: Abgeschätzte Metallgehalte von Hüft- und Kniegelenkprothesen (basierend auf ANGERER et al. 2009, DEPUY ORTHOPAEDICS 2008, LEE et al. 2005, BONESMART.ORG 2015c)

| Metall | Gewicht/[g] | | | |
|--------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------|----------------------|
| | Hüftprothese mit Titanschaf | Hüftprothese mit CoCrMo-Schaft | Knieprothese, Titan | Knieprothese, CoCrMo |
| Kobalt | 140 | 720 | | 277 |
| Chrom | 60 | 300 | | 125 |
| Molybdän | 15 | 70 | | 27 |
| Titan | 435 | | 280 | |
| Summe | 650 | 1.090 | 280 | 430 |

Für ein modernes, nickelfreies, künstliches Hüftgelenk mit einem CoCrMo Gelenkkopfdurchmesser von 36 mm, mit Schaft und Gelenkpfanne aus Titan wurden die in Tab. 4.92 zusammengestellten Richtwerte für den Metallgehalt abgeschätzt. Legierungsmetalle im Titan sind dabei vernachlässigt. Das Gewicht des UHMWPE Kunststoffes in der Titanpfanne kommt hinzu. Ebenfalls in Tab. 4.92 sind alternative Schätzungen für eine Hüftprothese mit CoCrMo-Schaft sowie Knieprothesen aus Titan sowie CoCrMo.

4.34.3 Foresight industrielle Nutzung

In Deutschland werden jährlich ca. 430.000 Eingriffe zur Implantation, Revision, Wechsel und Entfernung von Endoprothesen durchgeführt. Das Niveau ist weitgehend stabil seit 2008 und teilt sich in ca. 255.000 Hüft- und ca. 175.000 Kniegelenkeingriffe auf (DESTATIS 2009a, 2009b, 2009c, 2009d, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015). Allerdings gehört Deutschland mit zuletzt (2013) fast ca. 280 Hüft- bzw. ca. 190 Kniegelenkoperationen pro 100.000 Einwohner im internationalen Vergleich zu den Spitzenreitern (OECD 2015).

Die Unterschiede in der Häufigkeit dieser Eingriffe sind sehr groß (OECD 2011, 2015) und hängen nicht zuletzt von den hohen Kosten der Operationen, verbunden mit den jeweils geltenden Regelungen zur Kostenübernahme durch Krankenkassen (insb. bzgl. Selbstbeteiligung). Der

OECD-Durchschnitt liegt momentan bei ca. 160 Hüft- und 120 Kniegelenkersatzoperationen pro 100.000 Einwohnern (siehe Abb. 4.93), wobei die Werte für Mexiko nur 8 Hüft- bzw. 3 Kniegelenkersatzoperationen pro 100.000 Einwohnern betragen (OECD 2015). In China, wo eine Operation dieser Art ca. 7.000 US\$ kostet, werden lediglich ca. 50.000 Hüft- und Kniegelenkoperationen pro Jahr durchgeführt (HUANG et al. 2012), was ungefähr ein Drittel der Zahl in Großbritannien entspricht (NJR 2014), trotz der bedeutend größeren Bevölkerung Chinas. Pro 100.000 Einwohner liegt dies weit unter dem Niveau Mexikos. Unter der Annahme, dass der Großteil der weltweit durchgeführten Knie- und Hüftgelenkoperationen in den OECD Ländern zusammen mit China stattfinden, wurden weltweit in 2013 ca. 2 Mio. Hüft- und ca. 1,7 Mio. Kniegelenkoperationen durchgeführt.

Die alternde Bevölkerung und die steigende Lebenserwartung, nicht nur in den entwickelten Industrienationen, lässt den Bedarf nach prothetischen Hilfsmitteln wachsen. In den Entwicklungs- und Schwellenländern ist durch die geringere Lebenserwartung und den höheren Anteil jüngerer Menschen der Bedarf nach prothetischen Hilfsmitteln kleiner. Aber auch aus Kostengründen kann die Bevölkerung dort die Möglichkeiten der Endoprothetik nur begrenzt nutzen. Mit ihrer wirtschaftlichen Entwicklung wird die Nachfrage zunehmen; aber auch in diesen Ländern werden die hohen Kosten die Nachfrage dämpfen. In den OECD-Ländern ist bereits jetzt eine gewisse Sättigung zu beobachten (Abb. 4.93).

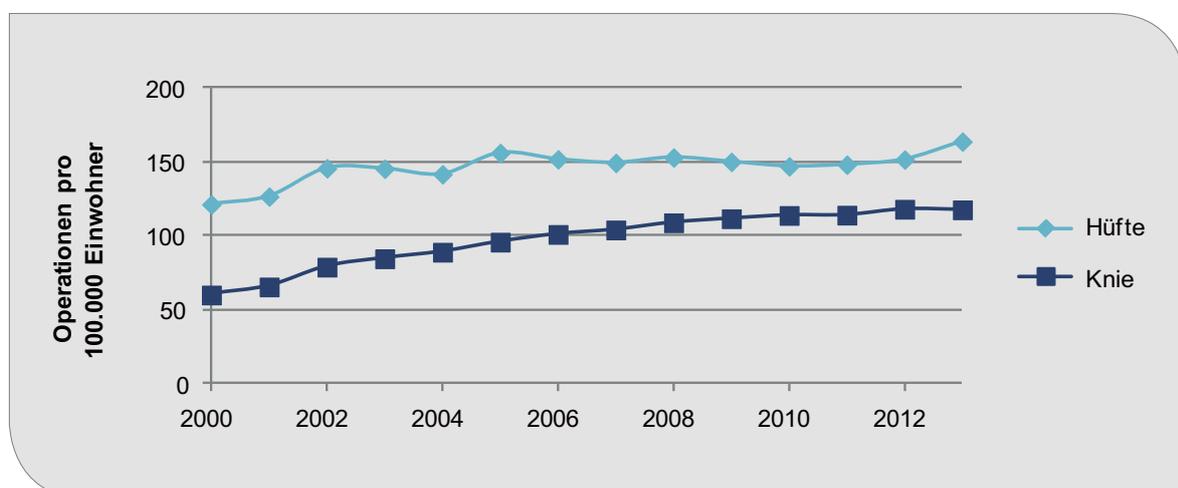


Abb. 4.93: Operationen zu Implantation, Revision, Wechsel und Entfernung von Endoprothesen in den OECD Ländern (Quelle: OECD 2015)

In diesem Geflecht von treibenden und hemmenden Faktoren ist die Abschätzung der globalen Nachfrageentwicklung nach orthopädischen Implantaten bis 2035 hoch spekulativ. Weltweit leiden ca. 10–15 % der Erwachsenen über 60 unter eine Arthrose. Schätzungen zufolge sollte die Zahl der Hüftgelenkoperationen zwischen 2005 und 2030 um 174 % steigen, die für Kniegelenkoperationen gar um 673 % im selben Zeitraum (WITTENAUER et al. 2013). Bei gleichbleibender Steigerung sollten in 2035 ca. 3 Mio. bzw. 10 Mio. Hüft- bzw. Kniegelenkoperationen. Während die Zahl für Hüftgelenkoperationen plausibel erscheint, ist diese Projektion für Kniegelenkoperationen wahrscheinlich zu hoch. Hier gilt zu berücksichtigen, dass der Zeitverlauf der Anzahl von Gelenkersatzoperationen eher einer asymptotischen als eine linear oder exponentiell wachsende Kurve verfolgt (NEMES et al. 2014) und dass die Häufigkeit von Kniegelenkoperationen dann über dem heutigen Niveau für Deutschland auch für sämtliche OECD Länder sowie China und Indien erreicht werden müsste (Bevölkerungsdaten von THE WORLD BANK 2015). Eine Steigerung der Anzahl an Kniegelenkoperationen in der gleichen Größenordnung wie für Hüftgelenkoperationen erscheint als Annahme angemessen, was zu einer Zahl von ca. 2,7 Mio. Kniegelenkoperationen in 2035 führt.

4.34.4 Foresight Rohstoffbedarf

Neben der Anzahl der Prothesen ist die Materialauswahl für den zukünftigen Rohstoffbedarf entscheidend. Bei zementfreien Hüftprothesen wird meist Titan als Prothesenschaftmaterial benutzt, beim zementierten Typ eher Kobalt-Chrom-Molybdän (STIFTUNG WARENTEST 2006). Bei Kniepro-

thesen werden beide Materialien ungefähr gleich oft eingesetzt (KNEEREPLACEMENTCOSTS.COM 2013). Ob eine zementierte oder eine zementfreie Prothese eingesetzt wird, hängt im Wesentlichen von dem Zustand der Knochen des Patienten ab, was auch mit dem Alter korreliert (STIFTUNG WARENTEST 2006). In Deutschland werden v. a. zementfreie Verankerungen gewählt (im Verhältnis von etwa 3:1 im Vergleich zu allen Anderen, EPRD 2015). Dagegen werden in Großbritannien eher zementierte Prothesen eingesetzt (etwa im Verhältnis 1:2, NJR 2014). Da flächendeckende Daten nicht zur Verfügung stehen, wird hier von einem Verhältnis von 3:2 zwischen zementfreien und zementierten (inkl. Hybridverankerung) Prothesen ausgegangen.

Darüber hinaus gibt es noch die Wahl für die Materialien der Gleitpaarung. Auch dies unterliegt zeitlichen und geographischen Schwankungen. Während in Großbritannien eher Metallköpfe benutzt werden (60–65 % in 2010–2014, NJR 2014), kommen in Deutschland mehrheitlich Keramikköpfe zum Einsatz (EPRD 2015).

Legt man die in Tab. 4.92 zusammengestellten Richtwerte für den Metallgehalt sowie die Annahmen zur Materialauswahl als Referenz zugrunde, dann ergibt sich bei einer Produktion von 5,6 Mio. künstlicher Hüft- und Kniegelenke in 2035 der in Tab. 4.93 zusammengestellte Werkstoffbedarf. Spalte zwei der Tabelle enthält die globale Gesamtproduktion des jeweiligen Rohstoffs im Jahr 2013, Spalte drei den Verbrauch für orthopädische Implantate im gleichen Jahr und die letzte Spalte die Nachfrageprojektion für 2035.

Die Projektion zeigt, dass die Impulse, die von der zu erwartenden Nutzung künstlicher Gelenkim-

Tab. 4.93: Globale Produktion 2013 (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf für die Herstellung orthopädischer Implantate in t

| Rohstoff | Produktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|----------|-----------------------------|-------------|----------------------|
| Kobalt | 129.763 (B) 85.904 (R) | 710 | 1.070 |
| Chrom | 13.422.102 (B) ¹ | 310 | 460 |
| Molybdän | 270.739 (B) | 70 | 110 |
| Titan | 235.700 (R) | 820 | 1.240 |

B: Bergwerksförderung

R: Raffinadeproduktion

¹ Quelle: berechnet aus Chromit, USGS 2015d

plantate auf die künftige Nachfrage nach Metallen ausgehen, nicht ausgeprägt sind. Die größten Bedarfe ergeben sich für Kobalt und Titan; dies hält sich aber mit $\leq 1\%$ der heutigen Weltproduktion in Grenzen. Bei den übrigen Metallen ist der projektierte Bedarf im Vergleich zum heutigen Produktionsniveau vernachlässigbar. Selbst bei einer Verdoppelung der Implantatfertigung gegenüber der gerechneten Projektion erreicht bei keinem Metall der Bedarf kritische Werte.

Für Metalle bleibt somit die Fertigung orthopädischer Implantate mengenmäßig eine Anwendungsnische, auch deshalb, weil die hohen Erlöse bei den Implantaten vorwiegend den Prothesen- und weniger den Materialherstellern zugute kommen (HUNT et al. 2012).

4.34.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Das Recycling von Endprothesen ist naturgemäß durch ihren Zweck eingeschränkt. Es stellen sich drei wesentliche Möglichkeiten dar:

- Wechsel der Prothese: Endprothesen werden i. d. R. archiviert und nur nach ausdrücklichem Wunsch dem Patienten übergeben (vgl. KLUSS et al. 2012).
- Tod des Nutzers, Erdbestattung: kein Recycling möglich.
- Tod des Nutzers, Feuerbestattung: Endprothesen werden der Asche entnommen und an spezialisierte Recyclingunternehmen weitergegeben (INCINEA GmbH 2015, ORTHOMETALS 2015).

Die Qualitätsanforderungen an biokompatiblen Materialien für orthopädische Implantate stellen eine große Hürde für die Einführung neuer Werkstoffe. Allerdings ist eine zufriedenstellende Auswahl an geeigneten Materialien, die je nach individuellem Fall eingesetzt werden. Mit Tantal ist auch ein „neues“ biokompatibles Material verfügbar, das die bestehenden Möglichkeiten ergänzt (BONESMART.ORG 2015b, ZIMMER BIOMET 2014).

4.35 Medizinische Tomographie

4.35.1 Technologiebeschreibung

In der medizinischen Diagnostik sind bildgebende Verfahren von besonderer Bedeutung. Begonnen hat dies mit den ersten Durchleuchtungsgeräten nach der Entdeckung der Röntgenstrahlung durch Wilhelm Conrad Röntgen im Jahre 1895. Bei der konventionellen Röntgenaufnahme wird der Körper durchleuchtet und das entstehende Schattenbild auf einem Film oder Schirm angezeigt. Es entsteht eine zweidimensionale Projektion. Im Strahlengang hintereinander liegende Objekte können dabei nicht räumlich aufgelöst werden. Eine Fortentwicklung der Projektionsradiographie sind die Schnittbildverfahren, die eine dreidimensionale Auflösung des bestrahlten Objekts ermöglichen. Die wichtigsten Schnittbildverfahren sind die Computertomographie (CT) und die Magnetresonanztomographie (MRT).

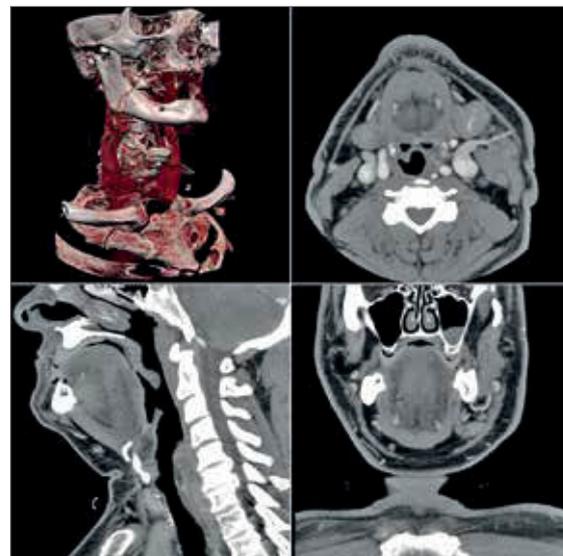


Abb. 4.94: Schnittbilder eines Computertomographen.

Links oben: Dreidimensionale Rekonstruktion; rechts oben: transaxialer Schnitt; links unten: multiplanar reformatierter sagittaler Schnitt; rechts unten: multiplanar koronaler Schnitt (Quelle: Linforest, ChumpusRex, WIKIMEDIA, CC BY-SA 3.0)

Bei der **Computertomographie** wird der schrittweise durch den Tomographen geschobene Körper mit Röntgenstrahlen aus verschiedenen Richtungen durchstrahlt, die Strahlschwächung aufgezeichnet und daraus mathematisch ein dreidimensionales Bild des Objekts rekonstruiert. Bei der technischen Realisierung im Computertomographen sind die Röntgenquelle und der Röntgendetektor, der die Strahlschwächung misst, in einem Abstand von etwa eineinhalb Metern gegenüber angeordnet. Dazwischen liegt der Patient. Strahlungsquelle und Detektor kreisen bis zu 240 Mal pro Minute (PHILIPS 2008) synchron in einem Ring, der Gantry, um die Liege mit dem Patienten im Zentrum (Abb. 4.95). Die Liege wird senkrecht zur Gantry schrittweise verschoben und der Patient so Schnittbild für Schnittbild aufgenommen.

Eine Fortentwicklung des CT arbeitet mit zwei Röntgenstrahlern und zwei Detektoren, die eine höhere Signalfolge erreichen und dadurch auch von bewegten Organen, beispielsweise dem schlagenden Herz, hochaufgelöste scharfe Bilder erzeugen können (Abb. 4.95). In alternativen Konstruktionen sind die Detektoren an der Gantry fest eingebaut und rotieren nicht mit der Röntgenröhre.



Abb. 4.95: Bei einem Dual Source CT rotieren zwei Röntgenröhren gleichzeitig um den Körper. Dargestellt ist hier der Somatom Definition Flash von Siemens.

(Quelle: www.siemens.com/presse)

Das Kernstück des Computertomographen ist neben dem Computer der Röntgendetektor; er besteht aus einem Array von Szintillationskristallen mit nachgeschalteten Fotodioden bzw Fotomultipliern. Die einfallende Röntgenstrahlung erzeugt

im Kristall einen sichtbaren Fluoreszenzlichtblitz. Je nach dessen Intensität entsteht in der korrespondierenden Fotodiode ein elektrisches Signal, welches ortsspezifisch ausgelesen wird und zur mathematischen Berechnung des Schnittbilds beiträgt. Der Szintillator muss zum einen hoch empfindlich sein, um die Strahlenbelastung des Patienten niedrig zu halten. Zum anderen muss das Nachleuchten extrem schnell abklingen, um die sehr kurzzeitigen Änderungen der Röntgenstrahlintensität nicht zu verfälschen.

Konventionell wurde Yttrium-Gadolinium-Oxid (YGO) als Szintillatormaterial eingesetzt. Yttrium und Gadolinium sind Seltenerdmetalle. Die Zusammensetzung neuer Entwicklungen hüten die Hersteller als Betriebsgeheimnis. SIEMENS Healthcare bewirbt seinen Detektor als „UltraFast-Ceramic“ (UFC). Er besteht aus Gadoliniumoxid, Schwefel und anderen Zusätzen und wird pulvermetallurgisch hergestellt (SIEMENS 2004). GE Healthcare spricht bei seinem Szintillator aus 98 % Granat (Halbedelstein) und 2 % Seltene Erden von einem revolutionären Durchbruch nach zwei Jahrzehnten Forschungsarbeit (FROST & SULLIVAN 2007).

Nachteil der CT ist die Strahlenbelastung des Patienten, die ein Vielfaches einer einfachen Röntgenaufnahme erreicht. Die **Magnetresonanztomographie**, auch Kernspintomographie, arbeitet ohne Röntgenstrahlen oder andere ionisierende Strahlung. Bei dieser Technik wird das magnetische Moment von Atomkernen im Körper durch starke äußere Felder beeinflusst. Dabei wird zunächst mit supraleitenden Spulen ein starkes Magnetfeld erzeugt. Die jüngste Generation der medizinischen Kernspintomographen arbeitet mit Feldstärken von bis zu 7 Tesla (7 T). In dem stationären Magnetfeld richten sich die Kerne aufgrund ihres magnetischen Moments aus und beginnen mit einer Präzessionsbewegung um die Achse des stationären Feldes. Wird senkrecht zum stationären Feld zusätzlich ein rotierendes hochfrequentes Wechselfeld mit der Frequenz dieser Präzessionsbewegung eingestrahlt, kommt es zur Resonanz, und das magnetische Moment des Kerns kippt in die Ebene des Wechselfelds. Durch die Wahl der Stärke des stationären Feldes und des Wechselfelds kann gesteuert werden, dass die Kerne bestimmter Stoffe in Resonanz geraten. Das entstehende makroskopische Magnetfeld der gekippten rotierenden Kerne kann nach dem

Induktionsprinzip mit Spulen gemessen werden. Aus der induzierten Spannung und der für jede Gewebeart typischen Abklingzeit des von den Kernen erzeugten Feldes nach dem Abschalten des äußeren Wechselfelds werden Helligkeitsunterschiede berechnet und auf dem erzeugten Schnittbild dargestellt. Durch Vorschub des Patienten wird Schnittbild für Schnittbild aufgenommen. Aus den Schnittbildern kann ein dreidimensionales Abbild des Objekts rekonstruiert werden.

Die MRT liefert gute Ergebnisse bei der Darstellung von Körperteilen mit unterschiedlichem Wassergehalt. Weichteilgewebe enthält viel Wasser, Knorpel weniger. Knochen liefern keine Signale und erscheinen auf dem Bild schwarz. Die MRT hat die Diagnostik von Gehirn und Rückenmark enorm verbessert. Alle Weichteilgewebe und Gelenke lassen sich gut abbilden (PUSCHMANN 2008). Neben CT und MRT gibt es eine Reihe weiterer bildgebender Verfahren, darunter die Ultraschalldiagnostik (Sonographie), welche keinerlei Strahlenbelastung darstellt.

In der Nuklearmedizin werden dem Patienten vor der Untersuchung Radionuklide verabreicht. Beim SPECT werden Gammakameras genutzt, die die aus dem Körper kommende Strahlung aufzeichnen, um dann wiederum rechnerbasierte Schnittbilder oder 3D-Darstellungen zu erstellen. Als Szintillatordetektoren werden häufig Kristalle von Thalliumaktivierten Natriumjodid, NaI:TI, eingesetzt, bei dem NaI mit 0,1 mol-% TI dotiert wird. Systeme für klinische PET benutzen heute in der Regel entweder Wismutgermanat (BGO, $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) oder mit Ce^{3+} dotierte Verbindungen wie Lutetiumyttriumoxoorthosilicat (LYSO, $\text{LuYSiO}_5:\text{Ce}^{3+}$) oder Lutetiumoxyorthosilicat (LSO, $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}^{3+}$) (VALENTINI 2005).

Eine neuere Entwicklung ist die optische Kohärenztomographie, die mit der Sonographie vergleichbar ist, aber mit Licht statt Schallwellen arbeitet. Weitere Entwicklungen sind die Hybridverfahren von PET und SPECT mit CT und MRT.

Die Tomographie ist nicht auf medizinische Anwendungen beschränkt. Auch die Archäologie, die Werkstoffprüfung und andere Disziplinen setzen diese zerstörungsfreien Prüfverfahren ein.

4.35.2 Rohstoffinhalt

Tomographen wiegen mehrere Tonnen und bestehen zu etwa 80 % aus Eisen, Stahl, Kupfer und anderen Nichteisenmetallen.

Tab. 4.94: Materialzusammensetzung des SIEMENS-Computertomographen SOMATOM FLASH (SIEMENS 2011b)

| Stoffe | Anteil in % | Gewicht in kg |
|-------------------------------------|-------------|---------------|
| Eisen und Stahl | 65 | 2.860 |
| Kupfer und andere Nichteisenmetalle | 20 | 879 |
| Blei | 0,003 | 1,45 |
| Edelmetalle | 0,03 | 1 |
| Andere Metalle und Halbmalle | 0,33 | 15 |
| Anorganische Werkstoffe und Keramik | 1,9 | 84 |
| Kunststoffe | 9,2 | 405 |
| Lacke und andere organische Stoffe | 1,6 | 70 |
| Kritische Stoffe (Gd, Be u. a.) | 0,65 | 29 |
| Rest | 1,29 | 57 |
| Gesamt | 100 | 4.400 |

Blei wird für die Röntgenabschirmung der Strahlformung benötigt. In dieser Anwendung stehen keine alternativen Stoffe zur Verfügung. Zur Zusammensetzung des Szintillatordetektors wird in einer Produktinformation gesagt, dass dieser Gadolinium, Schwefel und andere Beimischungen enthält (SCHRÖDER 2004). Aus den dort und in der Produktdeklaration (SIEMENS 2007) gegebenen Informationen errechnet sich eine Gadoliniumoxid- (Gd_2O_3) oder Gadoliniumsulfoxid- ($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$) Menge von etwa einem halben Kilogramm.

Kernspintomographen sind aufgrund ihrer mächtigen Elektromagnete und des massiven Stators, der die erzeugten enormen Kräfte aufnehmen muss, erheblich schwerer als Computertomographen. Der hohe Keramikanteil in Tab. 4.95 ist möglicherweise durch supraleitendes Material der Spulenwerkstoffe bedingt. In Zusammenhang mit Kernspintomographen wird auch eine mögliche Knappheit von Helium als Kühlmedium von sup-

raleitenden Magnetspulen diskutiert (NUTTALL et al. 2012).

Für die Detektoren der Nuklearmedizinischen Verfahren konnte aufgrund der Datenlage keine Abschätzung für die Rohstoffe durchgeführt werden.

Tab. 4.95: Materialzusammensetzung des SIEMENS-Kernspintomographen MAGNETOM Avanto (SIEMENS 2006)

| Stoffe | Anteil [%] | Gewicht [kg] |
|-------------------------------------|--------------|--------------|
| Eisen und Stahl | 45,0 | 3.600 |
| Kupfer und andere Nichteisenmetalle | 32,0 | 2.560 |
| Kunststoffe | 10,4 | 832 |
| Anorganische Werkstoffe und Keramik | 6,7 | 536 |
| Rest | 5,9 | 472 |
| Gesamt | 100,0 | 8.000 |

4.35.3 Foresight industrielle Nutzung

Die Medizintechnik gilt als Wachstumsbranche, wobei das Wachstum vom Export getragen wird. Die großen europäischen Hersteller von Tomographen sind Siemens Healthcare und Philips Healthcare. Die globalen Wettbewerber sind das US Unternehmen GE Healthcare sowie Toshiba Medical Systems im asiatischen Raum (FROST & SULLIVAN 2013). Die FuE-Aufwendungen der Medizintechnik-Hersteller in Deutschland in Höhe von 8 % des Umsatzes weisen die Branche als Spitzentechnologiesektor aus (STATISTA 2014).

Der Weltmarkt für Medizintechnik wird für 2013 auf 285 Mrd. € geschätzt, davon werden 18,8 Mrd. € (24,1 Mrd. US\$ 2012) für bildgebende Systeme ausgegeben. Der Weltmarkt soll der bildgebenden Verfahren soll in den nächsten Jahren um 4,4 % wachsen (FROST & SULLIVAN 2013). Der Umsatz der deutschen Medizintechnikhersteller ist von 2003 bis 2013 im Mittel um ca. 6 % pro Jahr auf 24,6 Mrd. € gewachsen davon gingen 68 % in den Export (STATISTA 2014).

Den Bemühungen um Kostendämpfung im Gesundheitswesen in den industrialisierten Ländern steht ein ungeheurer Nachholbedarf in den Schwellen- und Entwicklungsländern gegenüber. Aussagen, wie weit deren Bedarf bis 2035 gedeckt sein wird, sind spekulativ. Geht man von einer günstigen künftigen Entwicklung von Wohlstand und medizinischer Versorgung in den Entwicklungs- und Schwellenländern aus, könnte der Weltmarkt für Computertomographen mit 5,7 % und Kernspintomographen mit 3,7 % pro Jahr wachsen. Dann würden 2035 fast dreimal so viele Tomographen ausgeliefert wie 2013. Die Projektion dürfte aber eher an der oberen Grenze der möglichen tatsächlichen Entwicklungen liegen.

2015 waren weltweit etwa 60.000 CT im Einsatz, bei einer unterstellten Nutzungsdauer von acht Jahren werden etwa 7.500 Geräte pro Jahr produziert. Hinzu kommen ca. 3.500 MRT (MAGNETICA 2014).

4.35.4 Foresight Rohstoffbedarf

Für Detektoren von Computertomographen wurden mit dem in Kapitel 4.35.2 geschätzten Inventar 2013 weltweit etwa 4 t Gadoliniumoxid verbraucht.

Tab. 4.96: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf für die Herstellung von MRT und CT in t

| Rohstoff | Produktion | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| Rohstahl | 1.655.549.570 | 34.000 | 134.000 |
| Kupfer | 18.365.341 | 15.600 ¹ | 53.000 ¹ |
| Silber | 26.241 | 7,5 ² | 37 ² |
| Gadolinium | 3.600 ³ | 4 | 19 |

¹ Kupfer und Nichteisenmetalle

² Edelmetalle

³ Metallproduktion berechnet aus den SEO, Schätzung inkl. illegaler Förderung in China (Quelle: KINGSNORTH 2015)

Selbst in der Projektion mit der oben genannten Wachstumsrate von 5,7 %/a ergibt sich für 2035 ein unkritischer Bedarfsanstieg an Gadoliniumoxid auf etwa 19 t/a.

Auch bei den für die Herstellung von Tomographen genutzten Edelmetallen und Massenrohstoffen nimmt der künftige Bedarf an bekannten Werkstoffen für die Herstellung von Tomographen keine kritischen Werte an.

Permanentmagnete zeichnen sich dadurch aus, dass sie mit zunehmender Feldstärke wegen des Eigengewichtes sehr schwer werden (10 Tonnen und mehr). Daher werden sie in der Regel nur bis 0,3 Tesla eingesetzt (REISER & SEMMLER 2002) und hier nicht betrachtet.

4.35.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Siemens Healthcare gibt an, das 93 % des Gewichts von gebrauchten MRT stofflich und 7 % energetisch verwertet werden (SIEMENS 2007). Auch werden Teile der Geräte wiederverwendet bzw. nach Aufbereitung wieder eingesetzt (refurbished), so dass unter optimalen Bedingungen ein Gerät 40 % recycelte Teile haben kann (SIEMENS 2011b). Hinzu kommt, dass die Mengen an Gadoliniumoxid in den CT Detektoren weiter reduziert werden konnten, beispielsweise von 0,25 kg/dm² von 2005 auf 0,21 kg/dm² im Jahr 2008 (SIEMENS 2011b).

Werkstofftechnik

4.36 Superlegierungen

4.36.1 Technologiebeschreibung

Als Superlegierungen werden Werkstoffe komplexer Zusammensetzung (Eisen, Nickel, Platin, Chrom oder Kobalt-Basis mit Zusätzen der Elemente Nickel, Eisen, Chrom, Molybdän, Wolfram, Rhenium, Ruthenium, Tantal, Niobium, Aluminium, Titan, Mangan, Zirkonium, Kohlenstoff und Bor) für Hochtemperaturanwendungen bezeichnet. Sie sind zumeist zunder- und hochwarmfest. Ihre Her-

stellung kann sowohl schmelzmetallurgisch, als auch pulvermetallurgisch erfolgen.

Die Güte eines thermodynamischen Kreisprozesses, wie er in Verbrennungsmotoren, Turbinen und Triebwerken technisch realisiert wird, wird durch den Carnot-Wirkungsgrad charakterisiert:

$$(1) \quad \eta_C = 1 - \frac{T_0}{T_E}$$

η_C Carnot-Wirkungsgrad

T_0 Austrittstemperatur

T_E Eintrittstemperatur

Die Gleichung zeigt, der Wirkungsgrad der Arbeitsmaschine ist umso besser, je niedriger die Austrittstemperatur T_0 und je höher die Eintrittstemperatur T_E des Prozesses ist. Da sich die Austrittstemperatur in der Regel nicht unter die Umgebungstemperatur absenken lässt, bleibt für die Wirkungsgradverbesserung nur die Erhöhung der Eintrittstemperatur. Die Werkstoffentwicklung trachtet deshalb, die Warmfestigkeit der Werkstoffe zu steigern. Die heute verwendeten auf Kohlenstoff basierenden Brennstoffe Öl, Gas, Kohle und Biomasse setzen bei der Verbrennung CO₂ frei. Die Verbesserung des Wirkungsgrads und damit die Reduzierung des Brennstoffverbrauchs ist deshalb immer ein Beitrag zum Klimaschutz.

Die Einsatzgrenze hochwarmfester Stähle liegt bei etwa 850 °C. Mit ferritischen rostfreien Stählen lassen sich Einsatztemperaturen bis 1.350 °C erreichen, die Festigkeit ist bei diesen Temperaturen allerdings gering. Diese Stähle sind somit zwar hitzebeständig (korrosionshemmend), aber nicht warmfest (d. h. ohne gute mechanische Eigenschaften). Bei höheren Anforderungen an die Festigkeit wird auf Superlegierungen und Verbundwerkstoffe aus Keramik und Metallen (Cermets) zurückgegriffen.

Die Arbeitstemperaturen warmfester Superlegierungen auf Nickelbasis in Gasturbinen erreichen heute 1.230 °C. Die Einlasstemperaturen zur ersten Schaufelreihe liegt bei Erdgasgefeuerten Turbinen mit 1.550 °C um gut 300 °C höher. Die Schaufeln müssen deshalb gekühlt werden. Durch dauerhafte keramische Beschichtungen werden künftig die Arbeitstemperaturen angehoben werden. Eine 0,2 mm dicke Keramikschiicht senkt die Temperatur des darunter liegenden Materials um 150 °C (MÜLLER 2002).

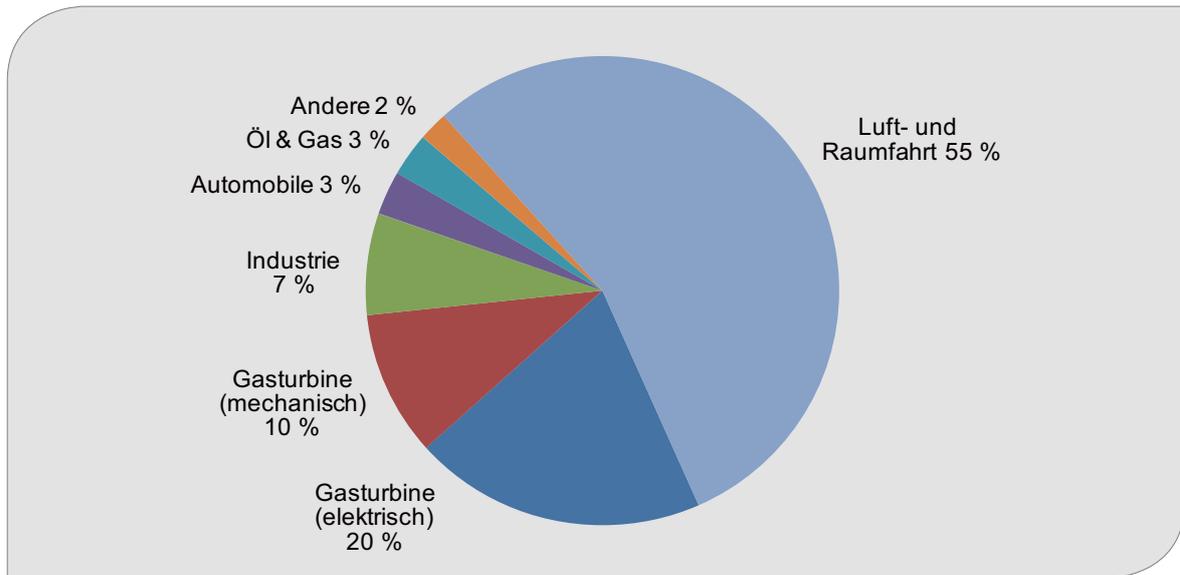


Abb. 4.96: Superlegierungen nach letzter Verwendung 2012
(Quelle: eigene Darstellung nach BEDDER & BAYLIS 2013)

Um eine wirtschaftlich attraktive Standzeit der Bauteile zu erreichen, werden an warmfeste Werkstoffe neben hoher Festigkeit weitere Anforderungen gestellt. Darunter die Beständigkeit gegen Oxidation, Korrosion, Abrasion und eine geringe Kriechneigung. Für Werkstoffe, welche diese anspruchsvollen Anforderungen bei hohen Arbeitstemperaturen erfüllen, hat sich die Bezeichnung „Superlegierung“ eingebürgert. Sie werden schmelzmetallurgisch oder pulvermetallurgisch hergestellt.

Hochtemperatur-Technologien sind in zahlreichen Sektoren, Prozessen und Produkten von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Bei Triebwerken für die Luft- und Raumfahrt, stationären Gas- und Dampfturbinen, Diesel- und Ottomotoren für Kraftfahrzeuge, Heizkesseln für die Gebäudeheizung, in der Eisen- und Stahlindustrie, der Nichteisenmetallerzeugung, der Metallver- und -bearbeitung, der chemischen und petrochemischen Industrie, beim Erschmelzen von Glasprodukten, beim Brennen von Zement und Kalk, um einige zu nennen (vergleiche Abb. 4.96).

4.36.2 Rohstoffinhalt

BEDDER & BAYLIS (2013) geben für 2012 einen Verbrauch von ca. 100.000 Tonnen Superlegierungen an (35 % der High Performance Alloys (HPA)(=

mit 280.000 t). Hierzu gehören Nickel-, Kobalt- und Titanbasierte Legierungen.

Nickelbasislegierungen

Es gibt eine große Zahl von hochwarmfesten Superlegierungen. Die wirtschaftlich bedeutsamsten sind die Nickelbasislegierungen. Sie wurden ursprünglich für Düsentriebwerke entwickelt, um deren Leistung (Schub) und Brennstoffverbrauch zu verbessern. Die Lauf- und Leitschaufeln der Gasturbine dieser Triebwerke erreichen Spitzentemperaturen von über 1.000 °C. Sie werden heute aus Nickelbasis-Superlegierungen gefertigt, ebenso wie der Turbinenrotor, die Brennkammern und die Auslasseinheit mit dem Strahlrohr.

Abb. 4.97 zeigt ein Strahltriebwerk älterer Bauart, bei dem die wesentlichen Komponenten gut erkennbar sind. Heute werden Mantelstromtriebwerke verwendet, mit getrennten koaxialen Wellen für die Verdichter- und Turbinenstufe.

Superlegierungen sind aus der Luft- und Raumfahrt in viele andere Anwendungen vorgedrungen. Beispiele sind Abgasventile in Verbrennungsmotoren, Komponenten von Autoabgaskatalysatoren, Hochtemperaturfedern, Schmiedewerkzeuge, Bohrwerkzeuge bei der Erdöl- und Erdgasförderung und Wärmetauscher. Markennamen für

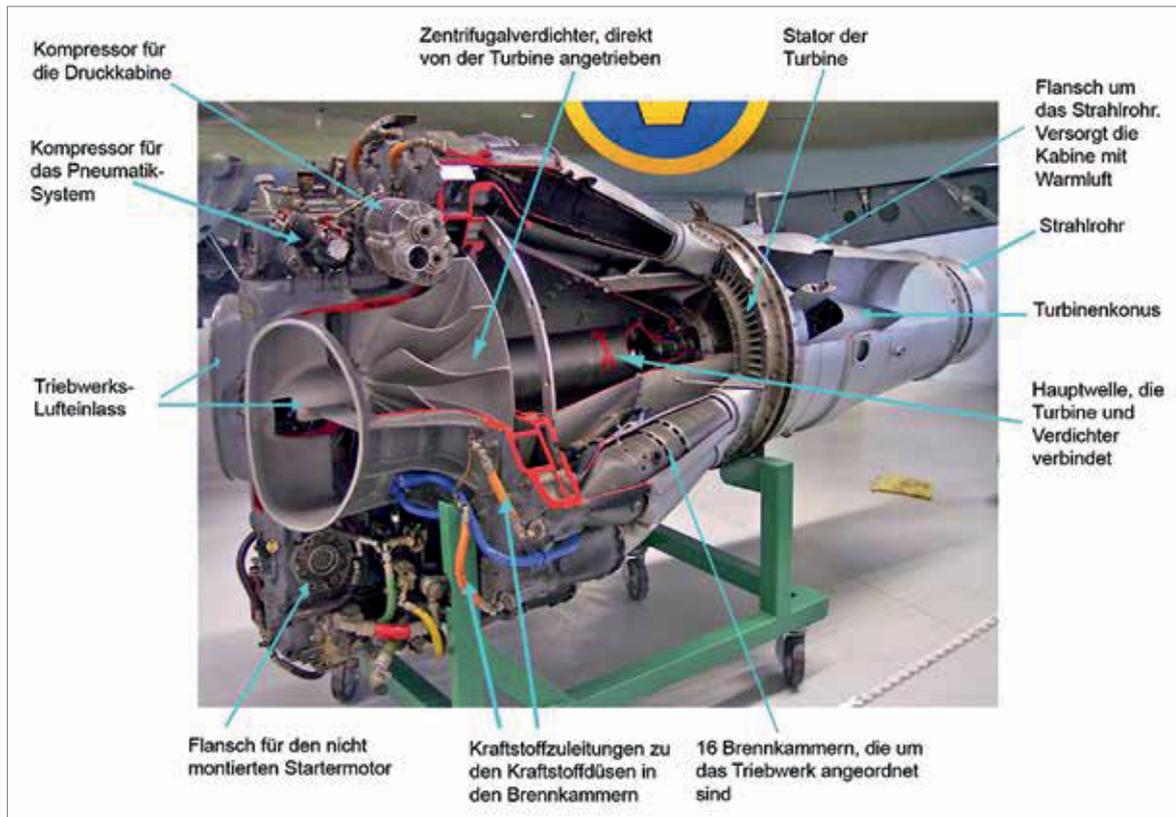


Abb. 4.97: Strahltriebwerk
(Quelle: Ian Dunster, WIKIMEDIA, CC BY-SA 3.0)

Nickelbasis-Superlegierungen sind Inconel®, Incoloy®, Hastelloy®, Nimonic®, Waspaloy®, Cronifer®, Nicrofer®. Die Zusammensetzung von Inconel® mit der Werkstoffnummer 2.4668 ist in Tab. 4.97 beispielhaft für eine warmfeste Superlegierung zusammengestellt.

Tab. 4.97: Zusammensetzung einer warmfesten Inconel® Superlegierung (METALCOR 2016)

| Legierungselement | Gewichtsanteil [%] |
|-------------------|--------------------|
| Nickel | 50–55 |
| Chrom | 17–21 |
| Eisen | Rest |
| Niob | 4,7–5,5 |
| Molybdän | 2,8–3,3 |
| Aluminium | 0,3–0,7 |
| Titan | 0,6–1,2 |
| Kupfer | ≤ 0,30 |
| Silicium | ≤ 0,35 |
| Kohlenstoff | 0,02–0,08 |

Der hohe Chromanteil sorgt für die Korrosions- und Zunderbeständigkeit (Oxidation) des Werkstoffs. Molybdän, Wolfram und Kobalt werden zur Erhöhung der Festigkeit zulegiert. Titan und Aluminium behindern durch die Bildung intermetallischer Phasen das Kriechen des Werkstoffs. Auch kleine Mengen an Cer, Hafnium, Zirkon und Yttrium werden als Korrosionsinhibitoren verwendet (DUBBEL 1983). Rhenium, ein Metall mit dem zweithöchsten Schmelzpunkt nach Wolfram, wird in Anteilen von 3–6 % für bestimmte hoch belastete Bauteile, bspw. in Strahltriebwerken, als Legierungsbestandteil zugesetzt (KONTER 2012). Roskill geht davon aus, dass 75 % des Rhenium in Nickelbasislegierungen verbraucht werden, weshalb kontinuierlich versucht wird, Rhenium einzusparen (BEDDER & BAYLIS 2013).

Kobaltbasislegierungen

Eine weitere Gruppe von Superlegierungen sind die Kobaltbasislegierungen. Sie zeichnen sich durch hohe Verschleißfestigkeit aus, weisen aber

eine niedrigere Zeitstandfestigkeit auf. Die Zeitstandfestigkeit ist jene Zugspannung, die bei einem Werkstoff auf einer bestimmten Temperatur (bspw. 600 °C) über eine bestimmte Beanspruchungszeit (bspw. 10.000 Stunden) zum Bruch führt. Die Zeitstandfestigkeit bestimmt die zulässige Betriebsdauer eines Bauteils. Eine verbreitete Legierungsgruppe sind Stellite®. Ihre Beständigkeit gegen Abrieb und Korrosion geht auch bei höheren Temperaturen nicht verloren. Hauptlegierungsbestandteil ist Chrom. Je nach Anwendung werden Molybdän, Wolfram, Nickel und andere Metalle zulegiert. Ihre Anwendung sind Bauteile, die hohen Verschleißbelastungen ausgesetzt sind, beispielsweise Schneidwerkzeuge, Laufschiene von Kettensägen, Auskleidungen von Waffenläufen und Gleitpaarungen von künstlichen Gelenken. Richtwerte für die Zusammensetzung von Stellite enthält Tab. 4.98 (CM 2008).

Tab. 4.98: Zusammensetzung von verschleißfesten Stellite-Superlegierungen (CM 2008)

| Legierungselement | Gewichtsanteil [%] |
|-------------------|--------------------|
| Kobalt | 45,00–65,00 |
| Chrom | 25,00–30,00 |
| Molybdän | ≤ 1,00 |
| Wolfram | 2,00–15,00 |
| Eisen | ≤ 3,00 |
| Nickel | ≤ 3,00 |
| Silizium | ≤ 2,00 |
| Mangan | ≤ 1,00 |
| Kohlenstoff | 0,25–3,30 |

Titanlegierungen

Die Nutzung von Titanlegierungen begann um 1950 und damit 50 Jahre nach den ersten Versuchen mit Nickel- und Kobaltbasislegierungen. Ursprünglich auf die Luft- und Raumfahrtindustrie beschränkt ist Titan aufgrund seines nicht zu über-treffenden Verhältnisses von Festigkeit zu Gewicht in unzählige Anwendungen vorgedrungen. Heute stehen hochwarmfeste, korrosionsbeständige Titanlegierungen für Arbeitstemperaturen bis 600 °C zur Verfügung (ULLMANN 2011). Sie erreichen damit beinahe die Einsatzgrenze hochwarmfester Stähle. Tab. 4.99 zeigt die Zusammensetzung der Titanlegierung IMI 829 für Hochtemperatur-Technologien. Als weitere Legierungselemente in spezifischen Anwendungen werden Kupfer, Mangan, Vanadium und andere verwendet.

Tab. 4.99: Zusammensetzung einer warmfesten Titanlegierung (ULLMANN 2011)

| Legierungselement | Gewichtsanteil [%] |
|-------------------|--------------------|
| Titan | 86,45 |
| Aluminium | 5,50 |
| Zinn | 3,50 |
| Zirkon | 3,00 |
| Niob | 1,00 |
| Silizium | 0,30 |
| Molybdän | 0,25 |

Cermets

Ein weiterer Werkstoff für warmfeste und verschleißfeste Werkstoffe sind Cermets. Das sind Metall-Keramik-Verbünde, bei denen in eine

Tab. 4.100: Zusammensetzung von warmfesten Cermets (ULLMANN 2011)

| Legierungselement | Gewichtsanteil | | |
|--|-----------------|------------------|-----------------|
| | Cermet LT-1 [%] | Cermet LT-1B [%] | Cermet LT-2 [%] |
| Chrom | 77 | 59 | 25 |
| Aluminiumoxid Al ₂ O ₃ (Tonerde) | 23 | 19 | 15 |
| Molybdän | – | 20 | – |
| Titandioxid TiO ₂ | – | 2 | – |
| Wolfram | – | – | 60 |

Metallphase keramische Stoffe oder Karbide eingelagert werden, beispielsweise Wolframkarbid in Kobalt, Titankarbid in Nickel, Aluminiumoxid (Al_2O_3) in Chrom, Thoriumoxid (ThO_2) in Wolfram. Durch die Nutzung von Metall als Bindemittel wird die Sprödigkeit behoben, die für reine Keramiken typisch ist. Cermets werden als Hartmetalle in Schneidwerkzeugen für Metall und Stein genutzt, für Hochtemperatur-Technologien (siehe oben), als Kathoden in Elektronenstrahlröhren und als Gleitkugel in Kugelschreibern, um einige zu nennen. Ihre Herstellung erfolgt pulvermetallurgisch. Tab. 4.100 gibt einige Beispiele für die Zusammensetzung hoch warmfester Cermets von wirtschaftlicher Bedeutung wieder. Die Werkstoffe LT-1 und LT-1B weisen bis $1.200\text{ }^\circ\text{C}$ gute Kriech Eigenschaften auf (ULLMANN 2011).

Graphit

Kohlenstoff als Graphit kann in einer inerten oder reduzierenden Arbeitsumgebung bei Temperaturen bis zu $3.000\text{ }^\circ\text{C}$ eingesetzt werden. In einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre allerdings beginnt Graphit oberhalb von $500\text{ }^\circ\text{C}$ zu verbrennen. Dies

schränkt seine Verwendbarkeit in Hochtemperatur-Technologien stark ein.

Graphit kann aus graphitierbaren Kohlenstoffträgern synthetisch hergestellt werden. Graphitierbare Kohlenstoffträger sind Steinkohle, Braunkohle, Erdöl, Petrol- und Steinkohleteerpeche, nicht aber Holz. Die Qualität von synthetischem Graphit ist gleichwertig oder besser als Naturgraphit. Auch wenn die natürlichen Vorkommen endlich sind, zählt Graphit deshalb nicht zu den knappen Rohstoffen.

4.36.3 Foresight industrielle Nutzung

Die Nutzung von Nickel-Chrom-Legierungen geht auf den Beginn des 20. Jahrhunderts zurück. Ihre Nutzung hat seither stetig zugenommen und in jüngerer Zeit durch die Bestrebungen, mit Energieeffizienz und Leichtbau zum Klimaschutz beizutragen und die stark steigenden Kosten für Brenn- und Treibstoffe aufzufangen, neue Impulse erhalten. Anwendungen von Superlegierungen wurden in den vorhergehenden Abschnitten diskutiert. Sie

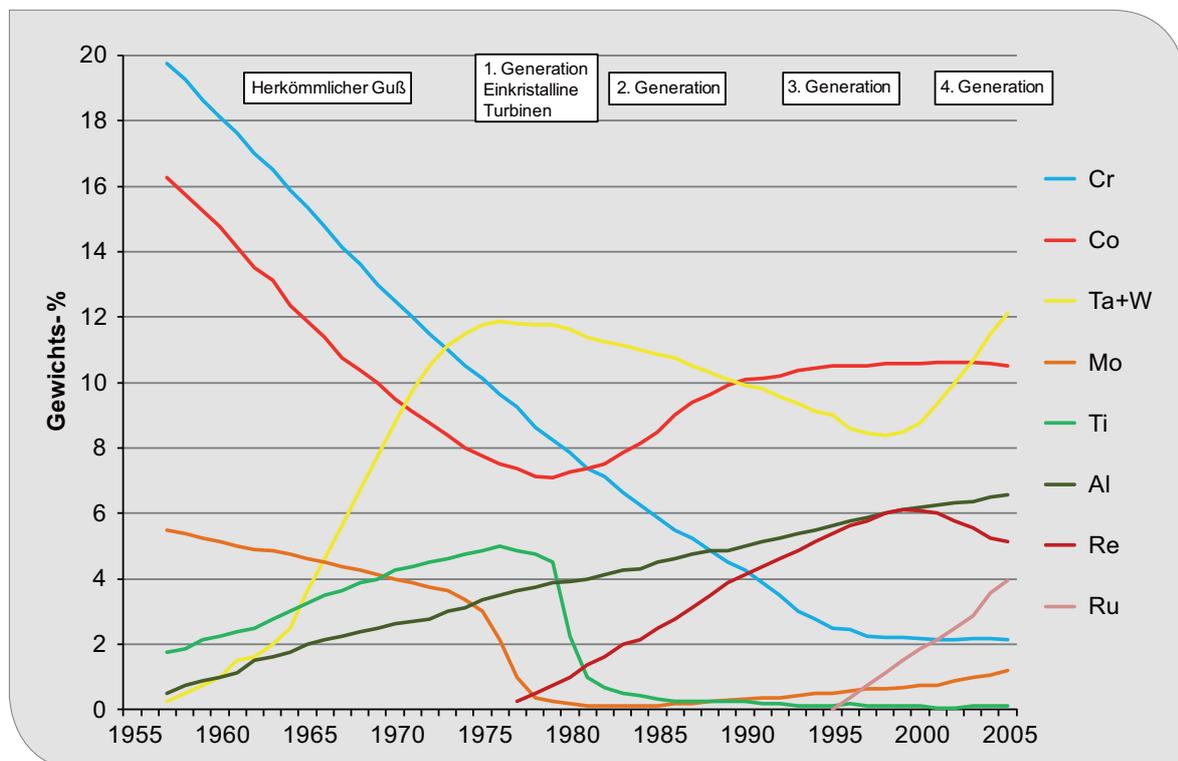


Abb. 4.98: Materialentwicklung im Strahltriebwerksbau (verändert nach CLIFTON 2013)

sind äußerst vielfältig und entziehen sich einer quantitativen Abschätzung des mengenmäßigen Umfangs der heutigen und künftigen Nutzung. Auch die Welthandelsstatistik der Vereinten Nationen (UN COMTRADE) liefert keine verwertbaren Informationen für eine Abschätzung des globalen Bedarfs an Superlegierungen.

Superlegierungen vereinen mehrere vorteilhafte Eigenschaften. Es sind Hightech-Werkstoffe für Hochtemperatur-Technologien. Es wird berichtet, dass durch Ihre Anwendung dramatische Verbesserungen erzielt werden konnten. Nach G. W. Meetham, von Rolls-Royce plc, UK, konnte an einem Strahltriebwerk durch den Einsatz einer Hochtemperatur-Titan Legierung der Treibstoffverbrauch um 13 %, das Gewicht um 18 % und der Schub um 42 % gesteigert werden (ULLMANN 2011). Bei Dieselmotoren hält die gleiche Quelle durch die Nutzung von Hochtemperaturkeramiken eine Steigerung des Wirkungsgrads von 38 auf 65 % für möglich (ULLMANN 2011).

Die herausragende Leistungsfähigkeit von Superlegierungen wird auch künftig in neue Anwendungen vordringen und bestehende Anwendungen zum Standard werden lassen. Ihre Werkstoffentwicklung ist noch keineswegs abgeschlossen (vergleiche Abb. 4.97). Vom Vordringen von Superlegierungen gehen insbesondere Nachfrageimpulse für Nickel, Chrom, Kobalt und Titan aus.

4.36.4 Foresight Rohstoffbedarf

Roskill (BEDDER & BAYLIS 2013) gibt für 2012 einen Verbrauch von ca. 100.000 Tonnen Superlegierungen an. Davon sollen 95 % Nickel bzw. Nichteisenlegierungen sein. Zusätzlich sollen 44 t Rhenium, 350 t Tantal, 4.000 t Niob und 35 t Hafnium in Superlegierungen eingesetzt werden. Werden diese Angaben und die oben genannten Zusammensetzungen für Nickel- und Kobaltbasierte Legierungen unterstellt, ergibt sich, sehr grob abgeschätzt, der in Tab. 4.101 dargestellte Rohstoffverbrauch für 2012.

Das Wachstum des Marktes für Superlegierungen soll 4,5 % pro Jahr betragen, wobei das Wachstum durch die zyklische Nachfrage der Luftfahrtindustrie auch zyklisch verläuft (BEDDER & BAYLIS 2013). Der sich ergebende Bedarf für 2012 ist auch für 2013 angenommen und in Tab. 4.101 ohne weitere Effizienz- oder Recyclingannahmen auf 2035 hochgerechnet worden. Beim berechneten Bedarf für das Jahr 2035 ergeben sich kritisch Verbräuche beim Tantal mit ca. 76 % der Jahresproduktion 2013, aber vor allem beim Rhenium, bei welchem der Bedarf 2035 der 2,5-fachen Menge der Produktion 2013 entspricht.

Tab. 4.101: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf für Superlegierungen in t

| Rohstoff | Produktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|----------|-----------------------------|-------------|----------------------|
| Nickel | 1.955.132 (R) | 46.000 | 127.700 |
| Chrom | 13.422.102 (B) ¹ | 19.000 | 52.600 |
| Kobalt | 85.904 (R) | 3.000 | 8.300 |
| Niob | 56.915 (B) | 4.000 | 11.000 |
| Molybdän | 270.739 (B) | 2.800 | 7.700 |
| Wolfram | 82.000 (B) | 500 | 1.400 |
| Rhenium | 47 ² | 44 | 120 |
| Tantal | 1.300 (B) | 350 | 1.000 |
| Hafnium | 1.510 ² | 35 | 100 |

B: Bergwerksförderung

R: Raffinadeproduktion

¹ Quelle: berechnet aus Chromit, USGS 2015d

² Quelle: USGS 2015e, 2015f

4.36.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Da Superlegierungen, wie oben dargestellt, in großen Turbinen eingesetzt werden und ihre Zusammensetzung in der Regel bekannt ist, werden sie schon heute hochwertig recycelt. Es wird kontinuierlich versucht, besonders knappe Metalle wie Rhenium zu substituieren.

4.37 Hochtemperatursupraleiter

4.37.1 Technologiebeschreibung

Bereits 1911 wurde entdeckt, dass bestimmte Materialien wie beispielsweise Quecksilber in der Nähe des absoluten Temperaturnullpunktes ($-273,15\text{ °C}$) einen supraleitenden Zustand annehmen, d. h. also praktisch keinen elektrischen Widerstand mehr aufweisen. Aufgrund der aufwändigen Kühlung mit flüssigem Helium auf die Betriebstemperatur supraleitender Materialien wurde diese Technologie jedoch nur sehr vereinzelt eingesetzt. Ein entscheidender Durchbruch gelang mit der Entdeckung der so genannten Hochtemperatursupraleiter (HTSL), deren

Sprungtemperaturen oberhalb von 80 Kelvin liegen (Abb. 4.99). Hierdurch wurde die aufwändige und kostenintensive Kühlung mittels flüssigen Heliums durch eine Stickstoffkühlung abgelöst. Die Kosten für den Kühlaufwand konnten hierdurch erheblich reduziert werden.

Die Elektrizitätsverluste liegen in der Größenordnung von 10 % des eingespeisten Stroms. Ursache dafür sind der elektrische Widerstand und andere Verluste. Ein Supraleiter transportiert unterhalb einer bestimmten Temperatur, seiner Sprungtemperatur, den elektrischen Strom nahezu ohne Verluste. Abb. 4.99 zeigt die Entwicklung der Sprungtemperatur TK von Supraleitern.

Bei den Supraleitern wird zwischen Niedrigtemperatursupraleitern und Hochtemperatursupraleitern unterschieden. Niedrigtemperatursupraleiter (LTS) haben eine klar definierte Sprungtemperatur und zeigen einen ausgeprägten Diamagnetismus. Die BCS-(Bardeen, Schrieffer, Cooper) Theorie von 1957 erklärt die Supraleitung bei LTS durch so genannte Cooper-Paare, wobei dieser Effekt bei guten elektrischen Leitern am wenigsten ausgeprägt ist. Der Mechanismus in Hochtemperatursupraleitern (HTS) ist noch nicht vollständig aufgeklärt. Im Gegensatz zu LTS gehen HTS

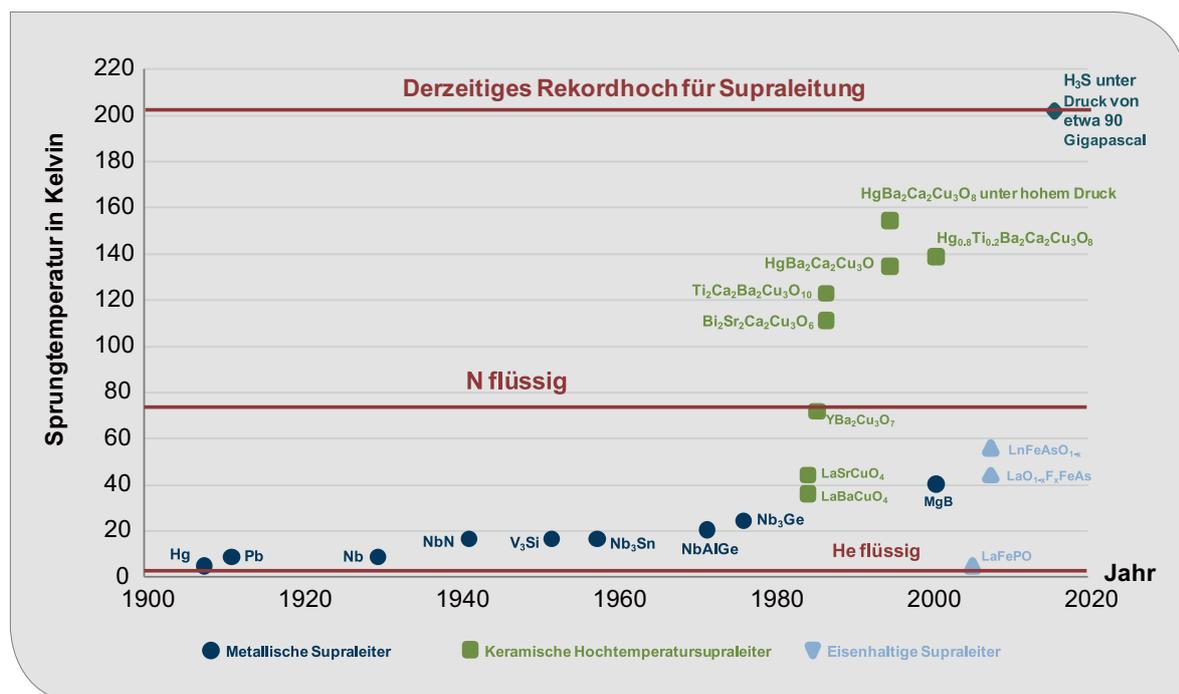


Abb. 4.99: Entwicklung der Sprungtemperatur von Supraleitern (Quelle: eigene Darstellung nach POLLMANN (2011))

nicht sprunghaft, sondern graduell über hybride Zustände in einen supraleitenden Zustand über.

Neben diesen beiden Hauptsupraleitungsarten gibt es auch atypische Supraleitungseffekte, z. B. bei Fullerenen C_{60} und MgB_2 , die aber nicht die Sprungtemperaturen von HTS erreichen. Ausnahme ist womöglich $Na_{0,05}WO_3$ mit einer Sprungtemperatur von 91 K.

Die Grenze für die Einteilung in HTS und LTS ist die Temperatur von flüssigem Stickstoff (77 K), der um etwa einen Faktor 100 billiger und einfacher zu handhaben ist als flüssiges Helium (4 K). Deshalb sind vor allem die Hochtemperatursupraleiter als Zukunftstechnologie interessant.

Zur Gruppe der HTS zählen insbesondere Perovskite (ABX_3). Folgende Hauptklassen von HTS können unterschieden werden (MULHOLLAND et al. 2001):

Die BSCCO (Bismut-Strontium-Calcium-Kupfer-Oxide) werden auch Hochtemperatursupraleiter der 1. Generation genannt ($T_K = ca. 110 K$). Für die Drahtproduktion nach dem Powder-in-tube-Verfahren werden mit Supraleiter-Pulver (BSCCO) gefüllte Silberrohre zu feinen Filamen-

ten gezogen und gewalzt. Die Drahtherstellung ist inzwischen ein reifes, kommerziell eingesetztes Verfahren. Für die meisten kommerziellen Anwendungen kann er mit einem Silberanteil von ca. 70 Prozent aber bestimmte Kostengrenzen nicht unterschreiten (IVSUPRA o. J.).

Die YBCO (Yttrium-Barium-Kupfer-Oxide) werden als Hochtemperatursupraleiter der 2. Generation bezeichnet ($T_K = ca. 93 K$). Supraleitende Bänder der zweiten Generation (2G) haben eine noch höhere Stromtragfähigkeit als ihre Vorgänger. Sie sind außerdem mechanisch robuster, lassen sich einfacher zu Spulen wickeln und können problemlos mit industriellen Verfahren verarbeitet werden. Sie haben inhärent geringere Kosten.

Es gibt noch weitere HTS Materialien, die noch nicht im großen Maßstab kommerzialisierte HTS sind, wie beispielsweise TBCCO (Thallium-Barium-Calcium-Kupfer-Oxide), mit denen erstmalig Sprungtemperaturen über 120 K erreicht ($T_K = ca. 125 K$) wurden, oder MBCCO (Quecksilber-Barium-Calcium-Kupfer-Oxide).

Technische Anforderungen an HTS sind insbesondere kritische Temperaturen über 77 K, hohe magnetische Stromdichte, hohes kritisches Magnet-

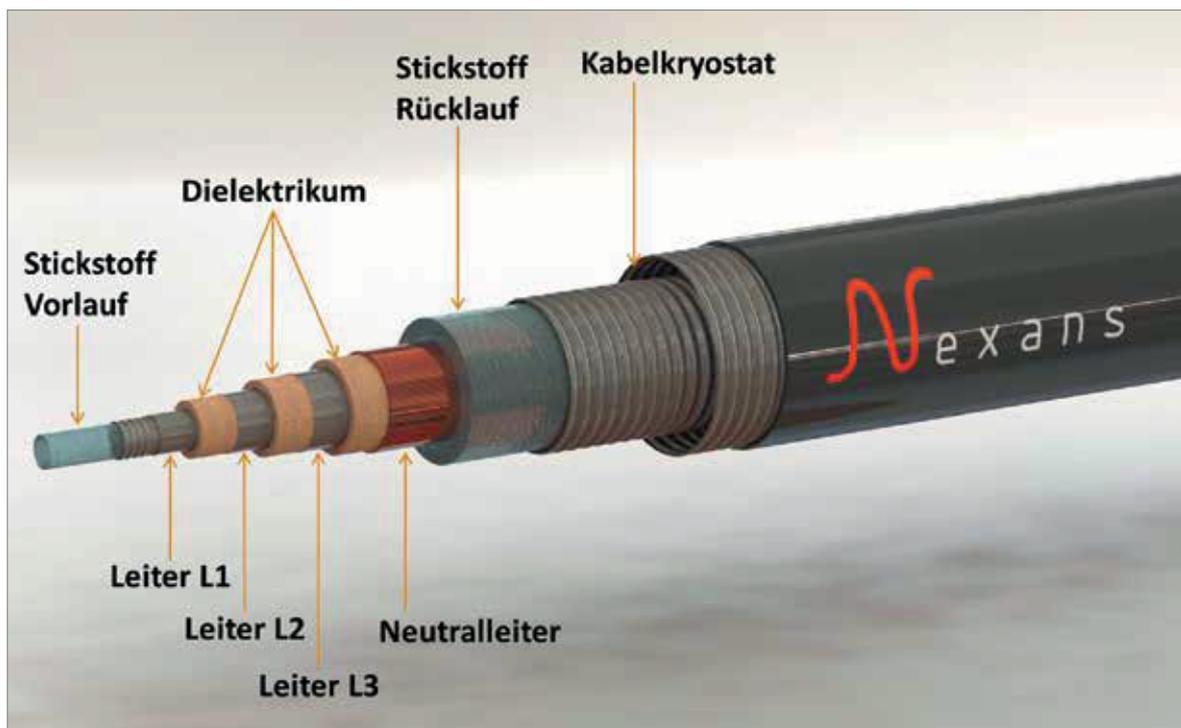


Abb. 4.100: Aufbau eines HTS-Kabels (Quelle: NEXANS)

feld, einfache Herstellung und gute mechanische Eigenschaften. Darüber hinaus stellen sich Fragen nach der Toxizität und der Rohstoffverfügbarkeit.

Für HTS sind vier Haupteinsatzgebiete in der Energiewirtschaft denkbar: Kabel (BINE INFORMATIONSDIENST 2014), Motoren, Generatoren und Transformatoren (BINE INFORMATIONSDIENST 2011b). Sie werden heute auch schon für Kurzschlussstrombegrenzer (BINE Informationsdienst 2011a) eingesetzt. Weitere mögliche Einsatzgebiete von HTS sind: spezielle elektromagnetische Energiespeicher (SMES) wie Schwungräder, Magnetschwebbahn-Technologie, Mobilfunkfilter für das Hochfrequenzband, Magnetic Resonance Imaging (MRI) in der medizinischen Diagnostik und supraleitende Quanteninterferometer (SQUIDs), u. a. für Magnetoencephalographie oder Werkstoffprüfung, Lagersysteme, HochenergieTeilchenbeschleuniger und Supraleitende Mikrochips in Petaflop-Computern (MALOZEMOFF et al. 2006).

Die Abschätzung des Rohstoffbedarfs für HTS wird aufgrund der Datenlage und der vermuteten Mengenrelevanz pragmatisch für die vier Haupteinsatzgebiete in der Energiewirtschaft – Kabel, Motoren, Generatoren und Transformatoren – vorgenommen.

4.37.2 Rohstoffinhalt

HTS-Drähte der 1. Generation basieren auf BSCCO Material, das im Oxide Powder-in-Tube Verfahren in eine Matrix aus Silberlegierung eingefügt wird (vergleiche Abb. 4.101). Die Drähte werden dann extrudiert, wobei Längen über 1 km erreicht werden. Sie sind standardmäßig ca. 4,5 mm breit und 0,3 mm dick (SUMITOMO ELECTRIC 2016).

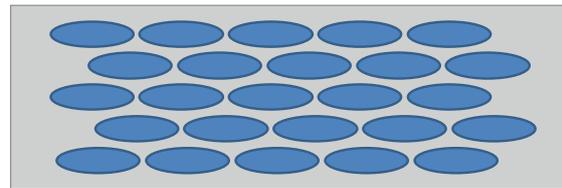


Abb. 4.101: Schematischer Aufbau eines HTS-Leiters der 1. Generation (Quelle: Eigene Darstellung)

HTS-Drähte und -Bänder der 2. Generation (vgl. Abb. 4.102) bestehen aus einem flexiblem Metallsubstrat, Pufferschichten und YBCO-Schichten (ORNL 2007). Als Substratmaterial kommen im Vergleich zu den Silberlegierungen bei HTS der 1. Generation kostengünstige Nickellegierungen zum Einsatz (z. B. Hastelloy C276 mit 57 % Ni, je

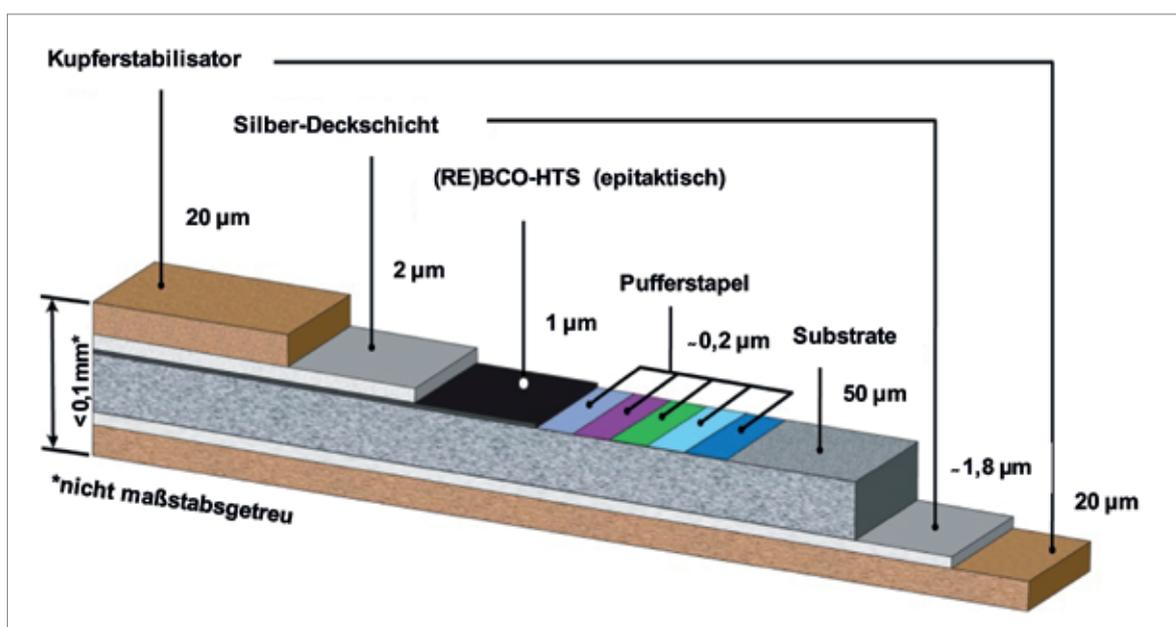


Abb. 4.102: Aufbau von HTS-Drähten der 2. Generation (Quelle: Eigene Darstellung nach SUPERPOWER INC.)

16 % Cr und Mo, 4 % W und max. 2,5 % Co). Als Puffermaterial dienen Yttrium-stabilisiertes Zirkon (YSZ), $Gd_2Zr_2O_7$ (GZO) oder MgO. Die eigentliche HTS-Schicht aus YCBO wird in 1–5 μm Dicke mit einem Höchstmaß an gleichförmiger Ausrichtung abgeschlossen.

Die HTS-Drähte werden je nach Anwendung auf verschiedene Weise zu Kabeln oder Spulen gewickelt (ORNL 2007). Eine grobe Abschätzung des Rohstoffbedarfs kann nur auf Basis einer kärglichen Datenlage vorgenommen werden. Zu Breite und Dicke von HTS der 1. und 2. Generation liegen plausible Richtwerte vor, aber schon bei der Bauform, wie die HTS um die Kabel gewunden sind, gibt es sehr unterschiedliche Angaben.

Tab. 4.102: Abschätzung der Metallanteile von 1 G HTS-Leitern

| | Dichte g/cm^3 | Gew.-% | Spez.Gew. kg/km |
|--------|---------------------------|--------|-----------------------------|
| Ag | 10,5 | 70 % | 5,1 |
| BSSCO | 6 | 30 % | 2,2 |
| davon: | Bi | 41 % | 0,9 |
| | Sr | 17 % | 0,4 |
| | Ca | 8 % | 0,2 |
| | Cu | 19 % | 0,4 |
| | O | 16 % | 0,3 |

Belastbare quantitative Informationen zum Rohstoffgehalt von HTS pro Meter Draht liegen bislang nicht vor, weshalb auf eigene Abschätzungen für 1 G und 2 G HTS Leiter zurückgegriffen werden muss (vergleiche Tab. 4.102 und Tab. 4.103).

4.37.3 Foresight Industrielle Nutzung

Die Durchsetzung von Hochtemperatursupraleitern am Markt hängt von der Nutzung der spezifischen Vorteile und der Minimierung der spezifischen Nachteile von HTS im Vergleich zu marktüblichen Kupferkabeln ab. Folgende Tabelle stellt die Vor- und Nachteile gegenüber:

Tab. 4.104: Vor- und Nachteile von HTS-Kabeln im Vergleich zu Kupferkabeln

| Vorteile | Nachteile |
|---------------------------------|---|
| Faktor 70 leichter als Cu-Kabel | hohe Materialkosten |
| 3–5-fache Leistungsübertragung | (noch) kein wirtschaftlich arbeitendes Kühlsystem |
| kein Aufheizen der Umgebung | sehr spröde |
| 100-fache effektive Stromdichte | aufwändige Produktionstechnik |

Tab. 4.103: Abschätzung der Metallanteile von 2 G HTS-Leitern

| | Schichtdicke μm | Spez. Vol. cm^3/km | Dichte g/cm^3 | Spez.Gew. kg/km |
|-----------|-------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| YBCO | 1 | 4 | 6 | 0,02 |
| davon | Y | | 13 % | 0,00 |
| | Ba | | 41 % | 0,01 |
| | Cu | | 29 % | 0,01 |
| Hastelloy | 50 | 200 | 8,89 | 1,78 |
| davon | Ni | | 57 % | 1,0 |
| | Cr | | 16 % | 0,28 |
| | Mo | | 16 % | 0,28 |
| | W | | 4 % | 0,07 |
| | Co | | 3 % | 0,04 |
| Kupfer | 20 | 160 | 8,92 | 1,4 |

Zurzeit werden nur wenige Kilometer HTS Kabel weltweit produziert (vergleiche Tab. 4.105), daneben aber deutlich mehr km an Drähten.

Tab. 4.105: Kapazitäten und Produktion 2012 von 1 G und 2 G HTS-Kabeln (PRUSSEIT 2014)

| | 1 G | 2 G |
|---------------|-------|-------|
| Kapazität km | 1.200 | 3.700 |
| Produktion km | 1.200 | 850 |

Zurzeit werden zahlreiche Pilotprojekte zur Nutzung von HTS Kabeln zur Stromleitung, in Strombegrenzern und in Windkraftanlagen durchgeführt. Diese werden zum Teil mit 1G, aber auch mit 2G Leitern durchgeführt und können, je nach Rahmenbedingung, auch schon wirtschaftlich sein, etwa wenn städtische Umspannanlagen eingespart werden können wie bei Projekt „Ampacity“ in Essen (BINE INFORMATIONSDIENST 2014).

Es ist sehr schwierig, in der Literatur eine Vorausschau zum Einsatz von Hochtemperatursupraleitern für die verschiedenen Anwendungen zu finden. Zwar liegt eine Studie von Navigat Consulting aus dem Jahre 2006 vor (NAVIGANT 2006), welche

einen Ausblick auf das Jahr 2030 vornimmt; für dieses Jahr wird dabei bei Kabeln eine Nachfrage zwischen ca. 350 km und 4.000 km Kabel weltweit unterstellt.

In einer älteren Studie für die USA, die die wichtigsten Stromverbraucher analysiert,

- Elektromotoren mit mehr als 500 PS Leistung (entsprechend ca. 368 kW),
- Generatoren mit mehr als 100 MVA,
- Transformatoren mit mehr als 20 MVA und
- Übertragungskabel für mittlere Spannungen

wird ein zukünftiger Bedarf für das Jahr 2025 von ca. 30.000 km für die USA abgeschätzt (vergleiche Abb. 4.103), mit einem sich sättigenden Markt am Ende des Projektionszeitraumes. Für das Jahr 2035 lässt sich ein Wert von 40.000 km extrapolieren. Die veröffentlichten Daten in (MULHOLLAND et al. 2001) sind aber nicht geeignet, um die Teilmärkte HTS für Kabel, Transformatoren, Motoren und Generatoren zu differenzieren.

Betrachtet man den globalen Maßstab und nimmt den Faktor des US-Marktes zum Weltmarkt für Kabel aus der Navigant Studie von ca. 6–8 an, so ergibt sich eine globale Nachfrage von ca. 280.000 km. Eine einfache Hochrechnung mit dem Anteil der USA am Weltbruttosozialprodukt

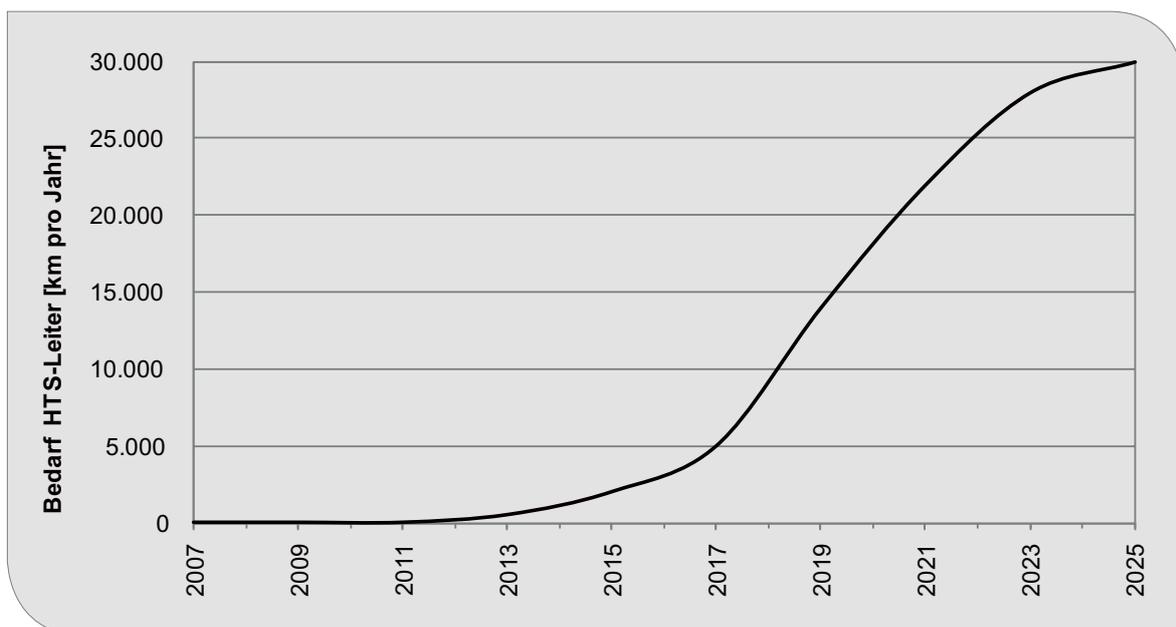


Abb. 4.103: Zukünftiger HTS-Drahtbedarf in den USA bis 2025 in km pro anno (Quelle: Eigene Darstellung nach MULHOLLAND et al. 2001)

ist nicht realistisch, da die Stromerzeugungs- und Stromübertragungssysteme starke länderspezifische Gegebenheiten haben.

Die Entwicklung hängt stark von der Leistungsfähigkeit von HTS-Materialien und ihrem Preis ab.

Folgende Parameter werden in den Projektionen für 2035 variiert:

- Projektion A: Der HTS-Drahtbedarf wird zur Hälfte durch BSCCO und zur Hälfte mit YBCO gedeckt.
- Projektion B: Der Bedarf an HTS Draht wird nur mit YBCO gedeckt.

4.37.4 Foresight Rohstoffbedarf

Die folgende Abschätzung basiert auf den spezifischen Input-Daten der verschiedenen HTS-Typen

und der Materialbedarfe gemäß der USA-Studie (MULHOLLAND et al. 2001).

Wie in Tab. 4.1 dargestellt, benötigen die Hochtemperatursupraleiter im Jahr 2035 keine kritischen Mengen an Rohstoffen. Die zukünftige Aufteilung in BSCCO und YBCO ist sehr unsicher, auch gegenüber TBCCO und MBCCO. Die fieberhafte Forschung lässt bis 2035 auch andere Kandidaten möglich erscheinen, darunter auch MgB_2 , das allerdings kein HTS im eigentlichen Sinne und sehr spröde ist.

Auf der anderen Seite haben Hochtemperatursupraleiter auch das Potenzial, Rohstoffe einzusparen. Beim Vergleich verschiedener Generatoren in Windkraftgeneratoren fand Bäcker (2012), dass kritische Rohstoffe wie Neodym und Dysprosium, daneben aber auch Kupfer und Stahl eingespart werden können (Tab. 4.106).

Tab. 4.106: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Rohstoffbedarf für die Herstellung von Hochtemperatursupraleitern für Motoren, Generatoren, Transformatoren und Kabel in t

| Rohstoff | Produktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 A | Bedarfsvorschau 2035 B |
|-----------|----------------------------------|-------------|------------------------|------------------------|
| Silber | 26.241 (B) | 6 | 720 | 0 |
| Bismut | 17.850 (R) | 1 | 125 | 0 |
| Calcium | 1.500.000 ¹ | 0,2 | 24 | 0 |
| Yttrium | 5.500 ² | 0,0 | 0,4 | 0,9 |
| Strontium | 333.000 ³ | 0,5 | 53 | 0 |
| Barium | 5.431.156 ⁴ | 0,0 | 1,4 | 2,8 |
| Kobalt | 129.763 (B) 85.904 (R) | 0,0 | 6,2 | 12,4 |
| Chrom | 13.422.102 (B) ⁵ | 0,2 | 40 | 80 |
| Molybdän | 270.739 (B) | 0,2 | 40 | 80 |
| Nickel | 2.601.745 (B) 1.955.132 (R) | 0,9 | 142 | 284 |
| Wolfram | 82.000 (B) | 0,1 | 10 | 20 |
| Kupfer | 18.365.341 (B) 21.446.333 (R) | 1,7 | 260 | 400 |

B: Bergwerksförderung

R: Raffinadeproduktion

¹ Quelle: BÜCHEL et al. 1999

² Metallproduktion berechnet aus den SEO, Schätzung inkl. illegaler Förderung in China (Quelle: KINGSNORTH 2015)

³ Quelle: USGS 2015g

⁴ Quelle: USGS 2015b, Bariumproduktion berechnet aus Barytproduktion

⁵ Quelle: berechnet aus Chromit, USGS 2015d

Tab. 4.107: Vergleich von Windkraftgeneratoren (BÄCKER 2012)

| Typ | Kupfer | Permanentmagnet | HTS |
|------------------|----------|-----------------|------------------------|
| Nennleistung | 8 MW | 8 MW | 8 MW |
| Drehzahl | 11,5 rpm | 11,5 rpm | 11,5 rpm |
| Effizienz | 93 % | 95 % | 98 % |
| Größe | | | |
| Durchmesser | 11 m | 7 m | 3,8 m |
| Länge | 2,8 m | 2,6 m | 2,3 m |
| Rohstoffe | | | |
| Kupfer | 80 t | 15,5 t | 8 t |
| Elektrostahl | 330 t | 150 t | 70 t |
| Seltene Erden | 0 t | 2 t (Nd, Dy) | 0,02 t (Y, La, Ce, Gd) |

Die Synopse deckt nur einzelne Teilmärkte für HTS ab. Unter Berücksichtigung von Speziellen Elektromagnetischen Energiespeichern (SMES), Lagersystemen und der MAGLEV-Magnetschwebbahntechnologie aus Japan könnte der Bedarf unterschätzt worden sein.

4.37.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Die HTS-Drähte eignen sich grundsätzlich für das Recycling, was beispielsweise Sumitomo Electric in seinem Internetauftritt bewirbt (SUMITOMO ELECTRIC 2015). Die lange Lebensdauer von Kabeln lassen im Zeitraum bis 2035 aber keine nennenswerten Beiträge von HTS-Drahtrecycling zur Deckung der Rohstoffnachfrage erwarten.

4.38 Hochleistungs-Permanentmagnete

4.38.1 Technologiebeschreibung

Permanentmagnete und Hochleistungs-Permanentmagnete

Permanent- oder Dauermagnete besitzen magnetische Anziehungs- und Abstoßungskräfte. Im Gegensatz zu Elektromagneten haben und behalten Permanentmagnete diese magnetischen Kräfte, ohne dass ein Stromfluss vorliegt. Permanentmagnete werden durch Anlegen eines äußeren Magnetfelds an ein hartmagnetisches Material

erzeugt. Dabei richten sich bereits vorhandene magnetische Domänen (Weiss-Bezirke) innerhalb des Materials entlang des äußeren Magnetfelds aus. Mit der Orientierung dieser Domänen bleibt auch die Magnetisierung des Materials nach Erlöschen des äußeren Magnetfeldes erhalten.

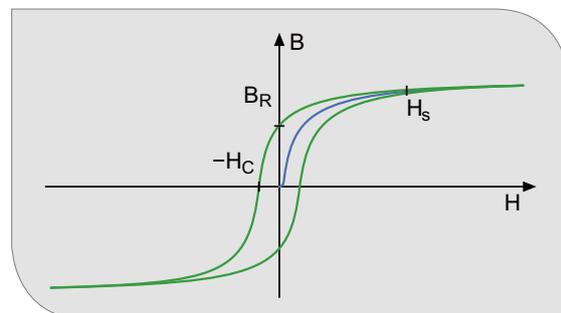


Abb. 4.104: Hysteresekurve eines Permanentmagneten: B : Magnetische Flussdichte, H : Magnetische Feldstärke, B_R : Remanenz, H_C : Koerzitivfeldstärke (Quelle: Walter Dvorak, WIKIMEDIA, gemeinfrei)

Eigenschaften eines hartmagnetischen Materials, die über seine Eignung als Dauermagnet entscheiden, werden in Abb. 4.104 veranschaulicht und im Folgenden erläutert:

- Hohe Remanenz B_R : Die Remanenz B_R ist die nach Verschwinden des äußeren Magnetfelds im Magneten verbleibende Magnetisierung (magnetische Flussdichte B).

- Hohe Koerzitivfeldstärke: Die Koerzitivfeldstärke H_c entspricht der Feldstärke H , die aufgewendet werden muss, um den Magneten vollständig zu entmagnetisieren. Je höher also die Koerzitivfeldstärke, desto größer ist die Beständigkeit des Magneten gegen äußere Magnetfelder.
- Hohe Energiedichte: Das Produkt aus B und H entspricht der magnetischen Feldenergie. Bezogen auf das Volumen ergibt sich die Energiedichte. Die Maximale Energiedichte eines Magnetmaterials gilt als entscheidendes Leistungskriterium.
- Hohe maximale Betriebstemperatur: Bei vielen Anwendungen (z. B. Motoren) sind die Magnete erhöhten Temperaturen ausgesetzt. Jedes hartmagnetische Material ist jedoch durch eine maximale Betriebstemperatur gekennzeichnet, oberhalb welcher die Orientierung der Weiß-Bezirke und damit der Dauermagnetismus merklich und irreversibel verloren gehen. Diese maximale Betriebstemperatur ist wesentlich geringer als die Curie-Temperatur, oberhalb welcher die ferromagnetischen Eigenschaften des Materials nicht fortbestehen können.

Als Hochleistungs-Permanentmagneten gelten Neodym-Eisen-Bor-Magneten (NdFeB-Magneten), deren maximale Energiedichte $(BH)_{max}$ ein Vielfaches der maximalen Energiedichte von Standardmagneten aus Ferriten oder Aluminium-Nickel-Kobalt-Legierungen beträgt. Auch Samarium-Kobalt-Magneten (Sm-Co-Magneten) erreichen nur ca. die Hälfte der maximalen Energiedichte von NdFeB-Magneten (SCHMAL 2010).

Arten und Herstellung von NdFeB-Magneten

Je nach Art der Anwendung können gesinterte oder kunststoffgebundene NdFeB-Magnete zum Einsatz kommen. Kunststoffgebundene NdFeB-Magnete sind preisgünstiger, allerdings auch weniger temperaturbeständig und weniger leistungsfähig. Sie kommen bspw. in Elektrogeräten zum Einsatz, während sich für anspruchsvolle Anwendungen wie Antriebsmotoren von Fahrzeugen oder Generatoren von Windkraftanlagen ausschließlich gesinterte Magneten eignen. 2010 waren ca. 10 % aller gehandelten NdFeB-Magneten kunststoffgebunden (ROSKILL INFORMATION SERVICES 2011).

Zur Herstellung der gesinterten NdFeB-Magnete wird im Induktionsschmelzofen eine NdFeB-Legierung hergestellt. Durch Brechen und Mahlen wird daraus ein Pulver, welches nach Ausrichtung der Körner im Magnetfeld gepresst und gesintert wird. Die so entstandenen Magneten werden durch Schneiden und Schleifen in die gewünschte Form gebracht und anschließend magnetisiert (SCHMAL 2010). Laut LIU & CHINNASAMY (2012) gehen beim Schleifen und Schneiden 20–30 % des Materials verloren. Schleifschlämme sowie Ausschussmagneten werden jedoch recycelt, so dass unter Foresight Rohstoffbedarf angenommen wird, dass die Masse der in einem Produkt enthaltenen NdFeB-Magneten nährungsweise dem Bedarf entspricht.

Kunststoffgebundene Magneten können über HDDR-Verfahren (Hydrogenation, Disproportionation, Desorption, Recombination) hergestellt werden.

Anwendungen von NdFeB-Magneten

Grundsätzlich können Hochleistungs-Permanentmagnete in allen Magnetanwendungen genutzt werden. Insbesondere ihr Einsatz in bürstenlosen permanentmagnetisch erregten Drehstrom-Synchronmotoren eröffnet viele Anwendungsfelder. Tatsächlich benötigt werden NdFeB-Magnete allerdings nur in Bereichen, in denen eine hohe Leistung bei gleichzeitig geringer Masse bzw. geringem Volumen essenziell ist. Bei niedrigeren Anforderungen an die magnetische Energiedichte sind preisgünstige Ferrite eine gängige Alternative. Außerdem sind NdFeB-Magnete für Temperaturen oberhalb von 200 °C nicht geeignet. In Hochtemperaturanwendungen finden daher SmCo-Magnete Verwendung. Ob NdFeB-Magnete in Zukunft in allen Bereichen oder ausschließlich in Anwendungen mit höheren Anforderungen zum Einsatz kommen, wird stark von Preis und Verfügbarkeit der Bestandteile abhängen.

Bisher wurden NdFeB-Magnete weltweit in folgenden Branchen verwendet (ROSKILL INFORMATION SERVICES 2011):

- Konventionelle Automobilindustrie
- Elektromobilität (s. Kapitel 4.2)
- Luftfahrt
- Medizintechnik

- Elektrogeräte (Haushaltsgeräte, Unterhaltungselektronik, Telekommunikation, Datenverarbeitung)
- Elektrische Messinstrumente
- Energieerzeugung (s. Kapitel 4.29)
- Militär
- Industrie

Der Anwendungsbereich Elektrogeräte setzt sich aus vielen verschiedenen Anwendungen mit häufig sehr geringen Anteilen an NdFeB-Magneten pro verkauftes Produkt zusammen. Durch hohe Verkaufszahlen der Massenanwendungen ergeben sich aber insgesamt große Mengen Magnetmaterial. Der Bereich Elektronik lässt sich in die vier Sektoren Haushaltsgeräte, Unterhaltungselektronik, Telekommunikation und Datenverarbeitung unterteilen.

Zur Rubrik Haushaltsgeräte zählen viele Anwendungen, in denen NdFeB-Magnete einfach durch schwächere Magnete substituiert werden können, wie beispielsweise Kinderspielzeug, Verschlüsse und Befestigungen. Ebenfalls als nicht essenziell ist ihr Einsatz in Motoren für z. B. Waschmaschinen oder Kühlschränke einzuschätzen. In Motoren von z. B. Akkuschaubern oder elektrischen Rasierapparaten sind die herausragenden Eigenschaften der NdFeB-Magneten schon eher gefordert. In Klimaanlage, die bisher hauptsächlich Ferrite enthielten, erhöhen NdFeB-Magnete die Energieeffizienz und werden aufgrund strengerer Energiesparvorschriften in Asien vermehrt eingesetzt. Asien wird als größter Wachstumsmarkt für Klimaanlage im Allgemeinen betrachtet. Auch in Europa wird ein gewisses Potenzial vermutet, während die Märkte in USA und Japan als gesättigt gelten (ROSKILL INFORMATION SERVICES 2011).

Im Bereich Büroelektronik und Datenverarbeitung gelten HDD-, CD- und DVD-Laufwerke als eine Hauptanwendung. Hier kommen NdFeB-Magnete im Schwingpulsbetätiger (HDD) und im Rotationsmotor (HDD, DVD, CD) vor. Für Laufwerke wird mit sinkenden Bedarfen an NdFeB-Motoren gerechnet, da erwartet wird, dass HDD-Festplatten zunehmend von SSD-Festplatten ersetzt werden, während gleichzeitig CD- und DVD-Laufwerke durch Online-Datentransfer an Bedeutung verlieren. Daneben spielen Lautsprecher, z. B. in Laptops, eine Rolle. Auch in Schrittmotoren kommen NdFeB-Magnete zum Einsatz. Insgesamt können NdFeB-Magnete somit in Laptops, Desk-

top-Computern, Servern, zentralen Datenspeichern, Druckern, Faxgeräten, Fotokopierern usw. vorkommen.

Ebenso stecken NdFeB-Magnete in Lautsprechern und Laufwerken von Unterhaltungselektronik wie Fernsehern, Audiogeräten, Laptops, Tablets, Computern, mobilen Audio/DVD-Abspielgeräten, Spielkonsolen und Digitalkameras. Außerdem sind sie in Uhren zu finden.

Im Sektor Telekommunikation enthalten u. a. Lautsprecher und Mikrophone NdFeB-Magneten.

Nach starkem Wachstum von einigen Bereichen der Endnutzer-Elektronik in den letzten Jahren wird ein Abflachen der Wachstumskurve erwartet, da die Märkte in Industrienationen allmählich gesättigt sind. In Entwicklungsländern wird dagegen weiterhin mit starkem Wachstum gerechnet (ROSKILL INFORMATION SERVICES 2011).

Ein weiteres großes Anwendungsfeld ist die konventionelle Automobilindustrie. Hier verteilen sich die NdFeB-Magnete wiederum auf eine Vielzahl von Einzelanwendungen in Motoren, Aktuatoren und Sensoren, z. B. für Innenausstattungs-elemente wie Geschwindigkeitsanzeige, Klimaanlage, elektrische Fensterheber, Scheibenwischer oder Sitzversteller aber auch für Motorkomponenten, Servolenkung, ABS und Wirbelstrombremsen. Abb. 4.105 zeigt ein Beispiel.

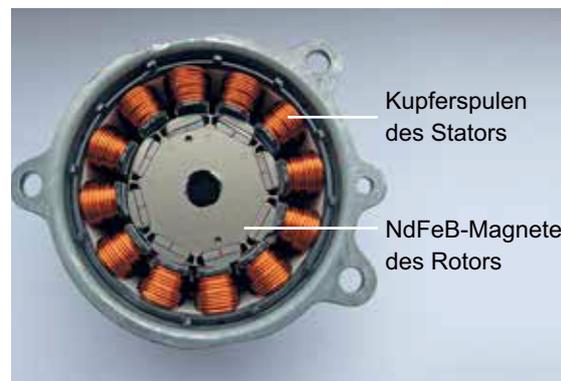


Abb. 4.105: Lenkungsmotor eines PKW
(Quelle: eigenes Werk)

Zusätzlich zu diesen Anwendungen enthalten Elektro- und Hybridautos (s. Kapitel 4.2) sowie elektrisch angetriebene Zweiräder vergleichs-

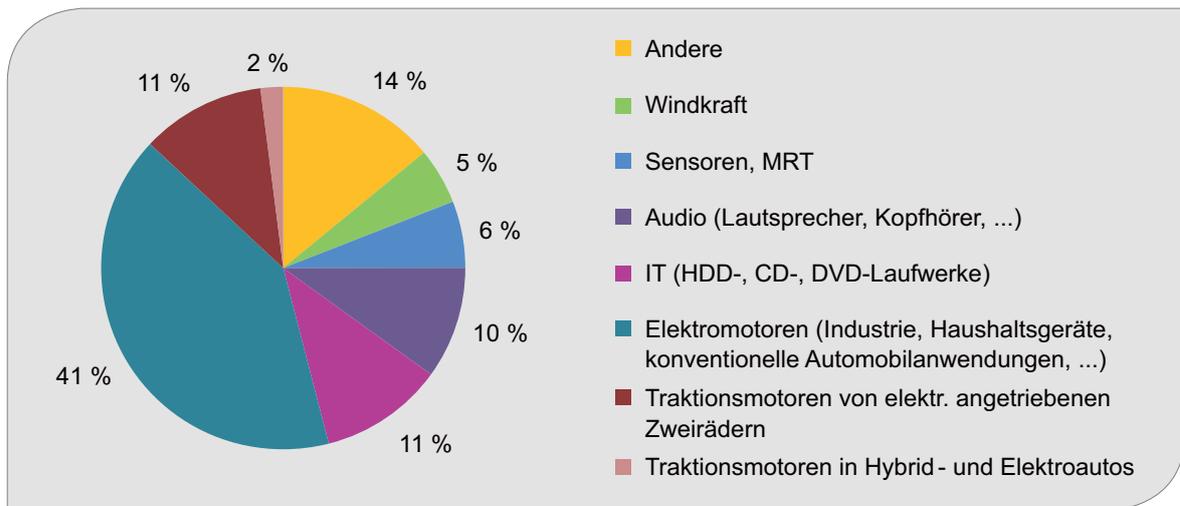


Abb. 4.106: Verwendung von NdFeB-Magneten in verschiedenen Anwendungen 2012 (gesamt: ca. 92.000 t) basierend auf Angaben in (GLÖSER-CHAHOUUD & TERCERO ESPINOZA 2015)

weise große NdFeB-Magnete im Antriebsmotor. Dieser Anwendung wird ein großes Wachstumspotenzial zugeschrieben.

Ein weiteres wichtiges Anwendungsfeld von NdFeB-Magneten sind Industrieapplikationen, wie z. B. Motoren für Injektionsformpressmaschinen und Roboter, aber auch Zugantriebsmotoren. Daneben können NdFeB-Magnete in industriellen Klimaanlage eingesetzt werden. Für magnetische Trennvorrichtungen zur Aufbereitung von Metallen (Recycling) und Mineralen (Bergbau) werden ebenfalls NdFeB-Magnete verwendet.

Auch in der Luftfahrt, Messtechnik und Medizin sind NdFeB-Magnete auf viele kleine Einzelanwendungen verteilt. In der Medizintechnik sind MRT-Geräte als eine mögliche Anwendung mit relativ großen NdFeB-Magneten bekannt. Bisher enthalten MRT-Geräte allerdings hauptsächlich Ferrite.

Im Bereich Militär kommen NdFeB-Magnete z. B. für Radarsysteme, Beschleunigungsmesser, Nachtsichtbrillen und die Fernlenkung von Raketen zum Einsatz. Länder wie die USA betrachten die entsprechenden Rohstoffe daher als strategisch wichtig und legen Speicher an.

Als weiterer Wachstumsmarkt für NdFeB-Magnete gilt ihr Einsatz in Generatoren für Windkraftanlagen (s. Kapitel 4.29), in untergeordneter Bedeutung auch für Laufwasser- und Gezeitenkraftwerke.

Eine weitere Zukunftstechnologie, bei der NdFeB-Magnete eingesetzt werden können, sind magnetische Kühlsysteme, die sowohl für die Tieftemperaturkühlung in der Forschung als auch für Kühlschränke für Heim- und Industrieanwendungen entwickelt werden. Gegenüber konventionellen Kühlgeräten sind magnetische Kühlsysteme 50–60 % energiesparender (SCHÜLER et al. 2011). Mehrere Hersteller haben angekündigt, demnächst magnetische Kühlschränke auf den Markt zu bringen.

Der Anteil verschiedener Anwendungen am Bedarf an NdFeB-Magneten ist in Abb. 4.106 dargestellt.

4.38.2 Rohstoffinhalt

Der Bedarf an NdFeB-Magnetmaterial pro Produkt variiert stark für unterschiedliche Anwendungen, wie Tab. 4.108 zeigt.

Neben den drei Hauptbestandteilen Neodym, Eisen und Bor können NdFeB-Magnete zahlreiche andere Elemente enthalten.

Der Zusatz von Kobalt verbessert die Korrosionsbeständigkeit der NdFeB-Magnete. Durch eine Schutzummantelung aus Nickel oder Epoxidharz kann die Korrosionsbeständigkeit weiter verbessert werden.

Tab. 4.108: Bedarf an NdFeB-Magnetmaterial pro Produkt für verschiedene Anwendungen (ROSKILL INFORMATION SERVICES 2011, BUCHERT ET AL. 2012)

| Anwendung | Bedarf NdFeB |
|------------------------|--------------|
| Elektronik | wenige Gramm |
| E-Bikes | 300–350 g |
| Antriebsmotoren HEV/EV | 1–2 kg |
| Klimaanlagen | 250–500 kg |
| Windkraftanlagen | 0,2–2,0 t/MW |
| MRT-Geräte | 1–3 t |

Praseodym (Pr) wird aus Preisgründen als Substitut für Neodym (Nd) verwendet, allerdings nur bis zu einem Verhältnis von Nd:Pr = 3:1, da höhere Pr-Gehalte die Magneteigenschaften beeinträchtigen würden (BUCHERT et al. 2012). Die Bedarfe an Nd und Pr für NdFeB-Magnete 2010 laut ROSKILL INFORMATION SERVICES (2011) entsprechen dem Verhältnis 3:1. Als durchschnittliches oder übliches Verhältnis wird oft 5:1 genannt (GLÖSER-CHAHOUD, TERCERO ESPINOZA 2015, BUCHERT et al. 2012).

Durch Substitution eines Teils des Neodyms durch Dysprosium (Dy) oder Terbium (Tb) kann die maximale Betriebstemperatur der NdFeB-Magnete von lediglich 80 °C auf 200 °C erhöht werden. In Antriebsmotoren von Elektroautos und in Generatoren von Windkraftanlagen werden daher Dy-haltige NdFeB-Magnete eingesetzt (HOENDERDAAL et al. 2013). Dy verbessert auch den Korrosionswiderstand der Magnete und erhöht ihre Koerzitivfeldstärke.

Terbium hat die gleichen positiven Auswirkungen auf die Magnete, reduziert im Unterschied zu Dy aber nicht ihre Remanenz (SCHÜLER et al. 2011). Bisher verursachte die Leuchttechnik hohe Tb-Nachfragen und damit hohe Tb-Preise, so dass Tb in NdFeB-Magneten kaum eingesetzt wurde. Mit dem Durchsetzen der LED-Technologie, in der Tb keinen Einsatz findet, könnten sich die Verfügbarkeit von Tb und damit sein Einsatz als Substitut für Dysprosium in NdFeB-Magneten erhöhen.

Laut ROSKILL INFORMATION SERVICES (2011) wird den NdFeB-Magneten von einigen chinesischen Herstellern Gadolinium (Gd) beigemischt, um Kosten zu senken, was aber gleichzeitig die Magneteigenschaften beeinträchtigt. Den Anteil verschiedener

Seltener Erden am Gesamtbedarf für Magnete zeigt Abb. 4.107.

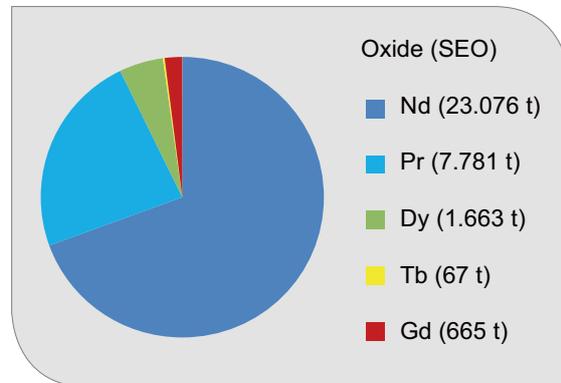


Abb. 4.107: Bedarf an verschiedenen Selteneren Erden für NdFeB-Magnete in 2010, berechnet basierend auf (ROSKILL INFORMATION SERVICES 2011)

Die reine Magnetphase $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ hat eine Massenzusammensetzung von Neodym 27 %, Eisen 72 %, Bor 1 %. In den Magneten sind gesinterte Körner dieser Phase von einer seltenerdreichen Phase umgeben, so dass der Gesamtanteil der Seltenerdelemente bei ca. 32 Massen-% liegt.

Zahlreiche Forschungsprojekte (z. B. das Fraunhofer Leitprojekt Kritikalität Seltener Erden) bemühen sich um eine Reduktion des Bedarfs an Seltenerdelementen, insbesondere am Schweren Seltenerdelement Dysprosium, für NdFeB-Magnete. Dazu zählen produktionstechnische Verfahren wie das Metallpulverspritzguss-Verfahren (Net-Shape-Production), bei dem die Magnete direkt in ihrer benötigten Form hergestellt werden. Dadurch werden Produktionsabfälle durch Schleifen und Schneiden vermieden. Da wir in dieser Synopse von einem vollständigen Recycling der Produktionsabfälle ausgehen, wirken sich diese Einsparungen nicht auf die Bedarfsprognosen aus. Dennoch schätzen wir diese Einsparungen als ökologisch sehr sinnvoll ein, da der Recyclingprozess sehr aufwändig ist.

Materialwissenschaftliche Ansätze sind zum einen die Dysprosium-Layer-Technologie, bei der das verwendete Dysprosium gezielt an Korngrenzen konzentriert wird, so dass mit einer geringeren Gesamtmenge gleiche Materialeigenschaften

erreicht werden. Zum anderen wird beim Grain-Size-Tuning durch Reduktion der Korngrößen des Magnetmaterials bis in den Nanobereich die Koerzitivfeldstärke so verbessert, dass ebenfalls weniger Dy bei gleichbleibenden Magneteigenschaften benötigt wird. Aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums dieser Technologien ist die daraus folgende Dysprosiemeinsparung in praktischen Anwendungen schwer vorherzusehen. In den Kapiteln 4.2 und 4.29 nehmen wir daher jeweils drei Szenarien mit einer Reduktion des Dysprosiolgehalts um 0 %, 25 % und 50 % an. Da sich Neodym und Dysprosium in der Magnetphase gegenseitig substituieren, gehen wir davon aus, dass der Neodymanteil um den Absolutwert des eingesparten Dysprosiums ansteigt.

4.38.3 Foresight industrielle Nutzung

Als Zukunftstechnologien, die den Bedarf an NdFeB-Magneten auf ein kritisches Niveau erhöhen könnten, gelten Elektroautos und Windkraftanlagen, die in den Kapiteln 4.2 und 4.29 analysiert werden, sowie elektrisch angetriebene Zweiräder, deren aktuelle und zukünftige industrielle Nutzung hier näher betrachtet werden soll. Abschließend erfolgt unter „Foresight Rohstoffbedarf“ eine Abschätzung des Bedarfs für alle drei Technologien.

Der Begriff „E-Bike“ wird zum Teil als Überbegriff aller Zweiräder mit Elektromotor verwendet, z. B. (HOENDERDAAL et al. 2013). Im engeren Sinn werden als E-Bikes jedoch nur Fahrräder mit elektrischer Antriebsunterstützung bezeichnet. Ein E-Bike kann also mit Hilfe von Pedalen fortbewegt werden. Der

zusätzliche elektrische Antrieb kann durch einen Drehgriff („Throttle Control“) oder durch das Treten der Pedale gesteuert werden. Zur Abgrenzung pedaltrittgesteuerter elektrischer Fahrräder von der drehgriffgesteuerten Variante gibt es den Begriff „Pedelec“ (kurz für Pedal Electric Bicycle). Weitere elektrisch angetriebene Zweiräder sind Elektro-Motorroller („E-Scooter“) und Elektro-Motorräder. Die unterschiedliche Handhabung der Begriffsabgrenzungen erschwert einen Überblick der vorhandenen Daten. Dies wird verstärkt durch verschiedene ländertypische Bauweisen. Beispielsweise gibt es in China elektrisch angetriebene Motorroller mit zusätzlichen Pedalen.

Die Motorleistung und somit der Magnetbedarf unterscheiden sich zwischen verschiedenen Modellen und noch deutlicher zwischen den drei Klassen (elektrisch angetriebene Roller, Motorräder und Fahrräder mit Antriebsunterstützung). Alle Zweiräder mit Elektromotor haben allerdings gemeinsam, dass sie vor allem in China weit verbreitet sind. So hatte China 2013 einen Anteil von 85 % bei E-Bikes (INSG 2014).

Tab. 4.109 fasst Schätzungen der weltweiten Verkaufszahlen der letzten Jahre sowie Wachstumssprognosen aus verschiedenen Quellen zusammen. Deutlich wird, dass E-Bikes den größten Anteil aller elektrisch angetriebenen Zweiräder ausmachen. Der Vergleich von NAVIGANT (2012) und NAVIGANT (2014) zeigt außerdem, dass die Wachstumserwartungen in den letzten Jahren abgeflacht sind. In den aktuellsten Prognosen (NAVIGANT 2014, 2015) wird für den Verkauf von E-Fahrrädern und E-Motorrädern nur noch 2,5 % jährliches Wachstum angenommen, für E-Roller sogar nur noch 0,8 %.

Tab. 4.109: Schätzungen zu verkauften E-Bikes, E-Motorrädern und E-Scootern, aktuell und zukünftig, nach [1] (INSG 2014), [2] (NAVIGANT 2012), [3] (NAVIGANT 2014), [4] (NAVIGANT 2015)

| | Verkaufte Produkte weltweit in Mio. | | | | | | | CAGR |
|----------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2018 | 2023 | 2024 | |
| E-Bikes [1] | | 40 | | | | | | |
| E-Bikes [2] | 30 | | | | 48 | | | 7,4 |
| E-Bikes [3] | | | 32 | | | 40 | | 2,5 |
| E-Motorrad [4] | | | | 1,2 | | | 1,5 | 2,5 |
| E-Scooter [4] | | | | 4,1 | | | 4,4 | 0,8 |

Laut REIDL (2013) sind E-Bikes für einen großen Anteil der chinesischen Stadtbevölkerung notwendige Transportmittel, um den Arbeitsplatz zu erreichen und werden in der Regel von Menschen verwendet, die sich kein Auto leisten können. Anders als in Europa handelt es sich also nicht primär um Sport- und Freizeitgeräte. Die Auslegung des Motors fällt entsprechend größer aus und reicht bis zu Modellen, bei denen hauptsächlich der elektrische Antrieb genutzt wird, während die Pedale nur bei leerem Akku Verwendung finden (REIDL 2013). Außerdem ist der Markt in chinesischen Städten gesättigt. Hohe Wachstumspotenziale gibt es höchstens noch in ländlichen Regionen (REIDL 2013).

Ein chinesisches E-Bike hat eine relativ kurze Lebensdauer von ca. vier Jahren (REIDL 2013). Die jährlichen Verkaufszahlen werden also nicht nur durch Neuanschaffungen (Bestandsvergrößerung), sondern auch durch Ersatzanschaffungen (Bestandserhaltung) beeinflusst (s. Abb. 2.2).

In Europa verzeichnen „E-Bikes“ noch immer einen starken Zuwachs in den jährlichen Verkaufszahlen, auch wenn die Änderung kleiner wird bzw. sich allmählich eine Sättigung abzeichnet (vgl. Abb. 4.108, Abb. 4.109 mit Abb. 2.1). Bei einem globalen Marktanteil von 4,5 % (INSG 2014) hat dies allerdings nur geringe Auswirkungen auf den Weltmarkt. Laut ZIV (2015) sind 12 % Anteil am

deutschen Fahrradmarkt erreicht (entsprechend 2,1 Mio. verkauften E-Bikes), 15 % werden aufgrund von Umfragen als mittelfristig möglich eingeschätzt (ZIV 3/25/2014).

Für die zukünftige Entwicklung wird zum einen ausschlaggebend sein, dass sich das Wirtschaftswachstum Chinas bis 2035 verlangsamen wird. In HAWKSWORTH et al. (2015) werden für das Wirtschaftswachstum Chinas durchschnittliche jährliche Wachstumsraten (CAGR) von mehr als 6 % bis 2020, 3,5 % bis 2030 und 2,5 % bis 2035 angenommen. Ein anderer entscheidender Faktor wird sein, wie sich das E-Bike in Ländern, für die zukünftig ein sehr starkes Wirtschaftswachstum erwartet wird (z. B. Vietnam, Mexiko) (HAWKSWORTH et al. 2015), ebenfalls als Standardtransportmittel für Menschen mit entsprechendem verfügbarem Einkommen etablieren wird.

Wir gehen davon aus, dass sich ein Verlangsamen des chinesischen Wirtschaftswachstums (HAWKSWORTH et al. 2015) mindernd auf das globale Wachstum des E-Bike-Markts auswirken wird. Daher nehmen wir nach 2023 ein durchschnittliches jährliches Marktwachstum von CAGR = 2 % an. Vereinfacht übertragen wir diesen Wert auch auf andere elektrische Zweiräder (E-Scooter, E-Motorräder), welche im Vergleich zu E-Bikes geringe Verkaufszahlen erzielen und ebenfalls v. a. in China Absatz finden. Bis 2023 übernehmen

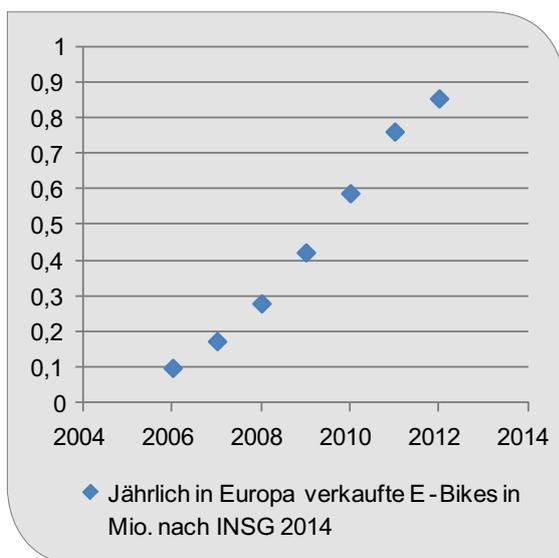


Abb. 4.108: Jährliche Verkaufszahlen von E-Bikes in Europa in Mio. Stück nach (INSG 2014)

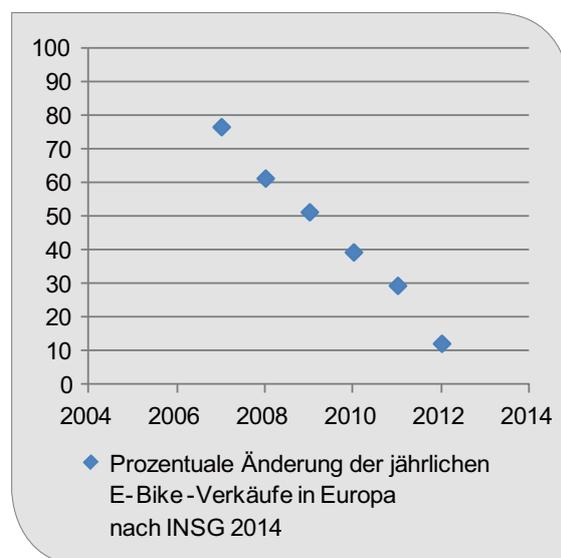


Abb. 4.109: Prozentuale Änderung der jährlichen E-Bike-Verkäufe in Europa nach (INSG 2014)

wir die Zahlen von NAVIGANT (2014, 2015), s. Tab. 4.109. Es ergeben sich damit 50,7 Mio. E-Bikes, 5,5 Mio. E-Scooter und 1,9 Mio. E-Motorräder, die in 2035 weltweit verkauft werden.

4.38.4 Foresight Rohstoffbedarf

Da elektrisch angetriebene Zweiräder im Vergleich zu E-PKW wesentlich kleinere Motoren enthalten und Einsparungen von Gewicht und Größe bei ihnen besonders wichtig sind, wird angenommen, dass sich NdFeB-magnetisch erregte Drehstromsynchronmotoren in diesem Segment zu 100 % durchsetzen (vgl. Kapitel 4.2). Dafür spricht auch, dass die meisten elektrisch angetriebenen Zweiräder in China produziert werden (INSG 2014), welches gleichzeitig der größte Produzent von Seltenerdelementen und NdFeB-Magneten ist (GLÖSER-CHAHOUD & TERCERO ESPINOZA 2015).

In für Europa typischen Pedelecs werden vergleichsweise kleine E-Motoren mit geringer Leistung eingesetzt, welche 100–300 g NdFeB-Magnetmaterial enthalten. Aufgrund niedriger Betriebstemperaturen benötigen diese NdFeB-Magneten nur 1 % Dysprosium (GLÖSER-CHAHOUD & TERCERO ESPINOZA 2015). Für E-Scooter und E-Motorräder sind höhere Leistungen erforderlich, so dass bis zu 500 g NdFeB-Magnetmaterial pro Motor verwendet werden. Der Anteil an Dy wird auf ca. 3–5 %, im Mittelwert 4,2 % geschätzt (GLÖSER-CHAHOUD & TERCERO ESPINOZA 2015).

Im Sinne einer Maximalwertabschätzung gehen wir von 300 g NdFeB für E-Bikes, 500 g NdFeB für E-Scooter und E-Motorräder und 5 % Dy für alle elektrisch angetriebenen Zweiräder aus. Für das Jahr 2035 ergibt sich damit ein Bedarf von 5.100 t Neodym und 940 t Dysprosium.

Abb. 4.110 fasst die Ergebnisse für die drei näher betrachteten Technologien (Windkraftanlagen in Kapitel 4.29, Traktionsmotoren von E-PKW in Kapitel 4.2) sowie andere Anwendungen zusammen. Dabei wurden für Windkraftanlagen und Traktionsmotoren die jeweiligen Szenarien für industrielle Nutzung der Anwendung, Marktanteile der NdFeB-magnethaltigen Technologie und Dysprosiumberhalt in den Magneten so gebündelt, dass eine untere und obere Grenze sowie eine moderate Schätzung entstanden sind. Der für andere NdFeB-Magnetanwendungen anfallende Bedarf an Seltenerdelementen wurde aus einer Prognose in BAST et al. (2015) übernommen.

Abb. 4.110 verdeutlicht, dass die Neodymnachfrage im Jahr 2035 durch Windkraftanlagen und E-PKW stark erhöht sein könnte. Für Dysprosium könnte ein außergewöhnlich starker Nachfrageimpuls von E-PKW ausgehen.

Für Tab. 4.110 wurde der am plausibelsten erscheinende Wert der jeweils moderaten Szenarien sowie die sich aus allen realistischen Szenarien ergebende mögliche Spanne angegeben. Zu beachten ist, dass die entsprechenden Werte

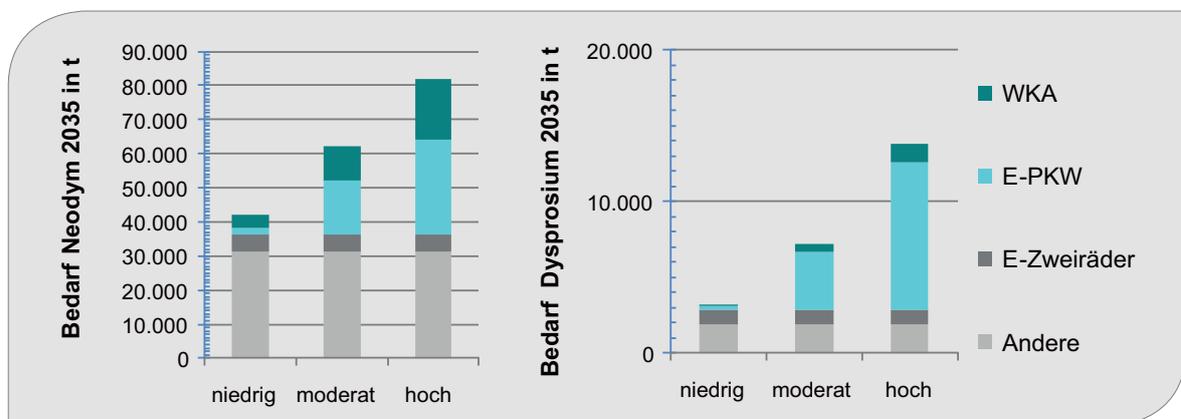


Abb. 4.110: Bedarf an Neodym (Nd) und Dysprosium (Dy) für NdFeB-Magnete in Windkraftanlagen (WKA), PKW mit elektrischen oder teilelektrischen Antriebskonzepten (E-PKW), elektrisch (teil-)angetriebenen Zweirädern und anderen Anwendungen im Jahr 2035 nach Szenarien mit niedrigen, moderaten und hohen Bedarfsauswirkungen (eigene Darstellung)

Tab. 4.110: Globale Produktion (Metallproduktion berechnet aus den SEO, Schätzung inkl. illegalen Abbaus in China, KINGSNORTH 2015) und Rohstoffbedarf in Hochleistungs-Permanentmagneten in t

| Rohstoff | Produktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|----------|-----------------|-------------|--------------------------|
| Nd, Pr | 36.600 | 28.900 | 62.400 (42.100 – 81.700) |
| Dy, Tb | 2.330 | 2.000 | 7.200 (3.200 – 13.700) |

aus Tab. 4.6 und Tab. 4.81 hierin bereits enthalten sind. Bei den Produktionsdaten wurden auch die Substitute Praseodym und Terbium berücksichtigt (Details s. Kapitel 4.38.2). Der Bedarf an Leichten Seltenerdelementen (Nd, Pr) könnte sich je nach Szenarium bis 2035 auf 170 % (120–220 %) der heutigen Weltproduktion steigern. Eine besonders hohe Zunahme auf 300 % (130–570 %) der heutigen Weltproduktion ist für die Schweren Seltenerdelemente (Dy, Tb) zu erwarten. Die verschiedenen Szenarien in den Kapitel 4.2 und 4.29 machen deutlich, dass insbesondere die Substitution mit magnetfreien Konkurrenztechnologien und die Reduktion des Dysprosiumanteils in den Magneten einen Materialengpass bei starkem Wachstum von Windkraftanlagen und E-PKW abmildern können.

4.38.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Laut Experteneinschätzung wird auf absehbare Zeit trotz intensiver Forschungsbemühungen kein Magnetmaterial mit vergleichbaren Eigenschaften unter vollständigem Verzicht auf Seltenerdelemente entwickelt werden können. Wahrscheinlicher erscheinen graduelle Verbesserungen der NdFeB-Magnete, insbesondere die Optimierung der Herstellungsmethoden und die Reduktion des Anteils Schwerer Seltenerdelemente (v. a. Dysprosium). Die nicht vorhersehbare Entdeckung neuer geeigneter Magnetmaterialien könnte aber aufgrund weltweit intensiver Entwicklungsbemühungen innerhalb weniger Jahre zu neuen Produkten führen.

NdFeB-Magnete werden derzeit in Deutschland nicht getrennt gesammelt (BAST et al. 2015). Produktionsabfälle werden zum Recycling nach China gesendet, da entsprechende Anlagen in Europa nicht existieren. Neben einer Weiterentwicklung des technischen Know-hows, insbesondere zur Reduktion von Seltenen Erden (Oxiden) zu Seltenerdelementen (Metallen), ist auch die Schaffung

funktionierender und rentabler Sammelinfrastrukturen Voraussetzung für ein zukünftiges Recycling. Zusätzliche Bedingung sind massentaugliche Demontageverfahren, was bereits beim Entwurf der Anwendungsgeräte berücksichtigt werden sollten (Design for Recycling). Dies ist umso entscheidender, je kleiner der Magnetgehalt pro Einzelanwendung ist.

4.39 Industrie 4.0

4.39.1 Technologiebeschreibung

Die in dieser Synopse untersuchte Technologie, „Industrie 4.0“, beschreibt keine einzelne Primärtechnologie, sondern das informationsbasierte Zusammenspiel mehrerer Techniken und Methoden in einem System. Die Bezeichnung 4.0 geht auf die drei vorher liegenden industriellen Revolutionen zurück: die Nutzung von mechanischen Produktionsanlagen durch die Dampfmaschine (ab dem 18. Jh.), die arbeitsteilige Massenproduktion mit Einführung der Elektrischen Energie (Beginn des 20. Jh.) und die automatisierte Produktion durch die Einführung von Elektronik (1970er Jahre des 20. Jh.).

Industrie 4.0 basiert im Kern auf sogenannte Cyber-physische Systeme (CPS), die reale (physische) Produktion mit einer virtuellen Welt verbinden, in der Daten und Information gespeichert und abgerufen werden können. Dieses Konzept wird im Englischen auch „Internet of Things“ (IoT) genannt. So können CPS in der Produktion die Digitalisierung der gesamten Wertschöpfung bzw. die Kopplung von digitalen mit physischen Prozessen zum Gegenstand haben, und zwar mit dem Ziel, eine sich autonom organisierende Automatisierung der Prozesssteuerung ganzer und gegebenenfalls global verteilter Wertschöpfungsnetzwerke zu ermöglichen.

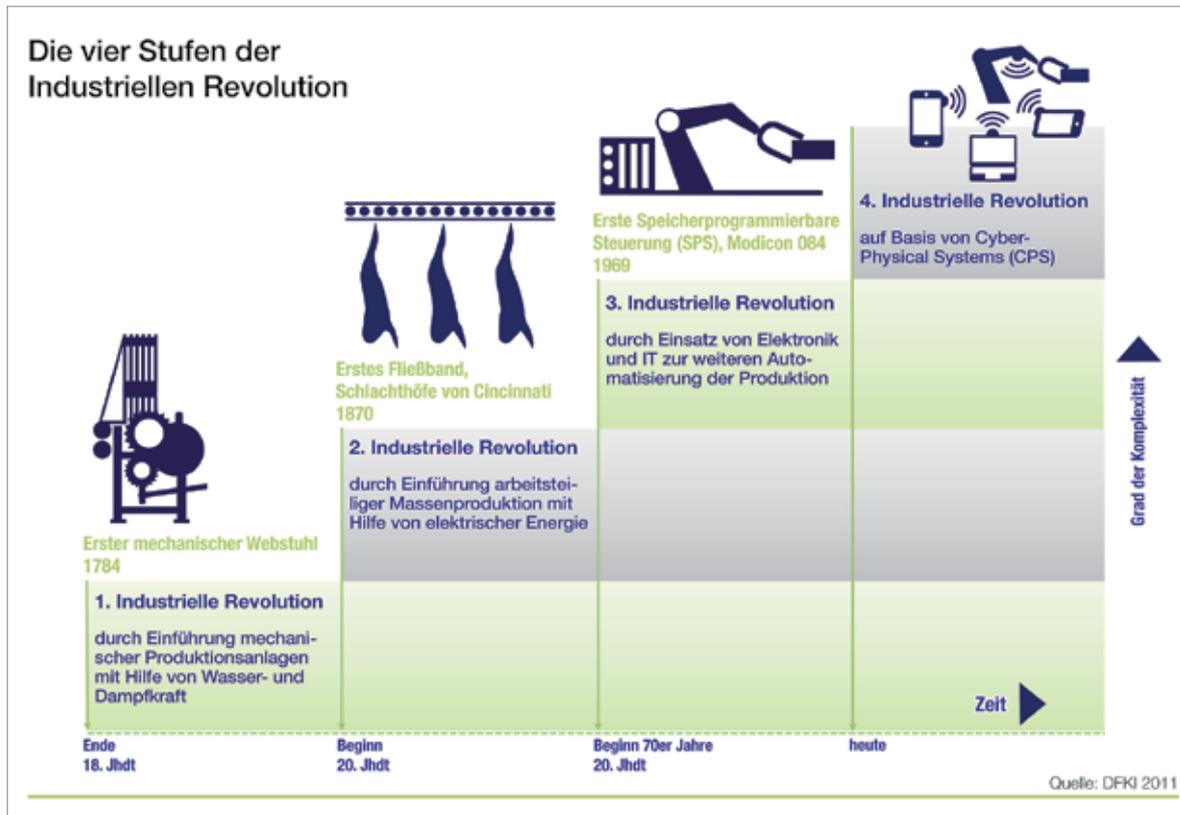


Abb. 4.111: Die Stufen der Industriellen Revolution
(Quelle: DFKI)

In der Welt der Industrie 4.0 wird die industrielle Produktion nun dezentral und dynamisch gesteuert, vernetzt über Internet, mobile Computer und Cloud Computing. Alles kommuniziert: Kunden, Firmen, Fabriken, Maschinen und „intelligente“ Produkte stehen in direktem Kontakt und können Informationen und Anforderungen austauschen.

Moderne Produktionsanlagen erzeugen eine Vielzahl von Daten beispielsweise durch Sensoren zur Messung von Positionen von Robotern, Temperaturmessung oder aus der automatischen Bildverarbeitung zur Qualitätskontrolle. Bei vorhandenen Produktionsprozessen ist es nötig, Daten durch adaptierte Messwertaufnehmer für analoge Signale über Datenlogger zu erfassen und ins Datenetz zu übertragen.

Es wird davon ausgegangen, dass Geräte im Jahr 2020 über ca. 30 Mrd. IP Adressen kommunizieren (GARTNER 2009). Auf der anderen Seite werden Sensoren benötigt, die zusätzlich zu ihrer eigentlichen Detektionsleistung auch Daten nach bestimmten Algorithmen verarbeiten können, um

die übertragenen Datenmengen reduzieren zu können. Beispielsweise versendet ein Sensor nicht einfach kontinuierlich die aktuellen Temperaturwerte, sondern ein intelligenter Sensor meldet nur noch, wenn eine kritische Temperatur überschritten wird. Die Sensoren sollten Selbstdiagnosen und Selbstkalibration durchführen können und für Industrie 4.0 möglichst in Echtzeit messen können (BMBF 2014).

4.39.2 Rohstoffinhalt

Die Zukunftstechnologie „Industrie 4.0“ ist eine architektonische Innovation, die sich aus verschiedenen Teilinnovationen zusammensetzt. Dies sind bei der „vierten industriellen Revolution“ Innovationen im Bereich des Internet der Dinge und cyber-physischer Systeme. Für beide Bereiche liegen Synopsen zu benötigten Zukunftstechnologien vor: RFID-Tags, Energiegewinnung aus der Umgebung (Micro-Energy Harvesting), Lote, Displays, Sensoren oder Hochleistungs-Mikrochips. Diese Technologien sind aber nur Teile der nötigen

Tab. 4.111: Übersicht über wichtige Materialien in Detektoren zur Temperatur-, Durchfluss-, Druck- und Gasmessung

| Detektorart | Materialien |
|--|---|
| Temperaturmessung | |
| Pyroelektrischer Detektor | LiTaO ₃ , Pb ₃ Ge ₃ O ₁₁ als Detektormaterial |
| Berührungslose Temperaturmessung | Fotodioden: Germanium, Silicium, InGaAs |
| Widerstandsthermometer | Heißleiter: mit Bindemitteln versetzte, gepresste und gesinterte Metalloxiden von Mangan, Nickel, Kobalt, Eisen, Kupfer oder Titan Kaltleiter: Pt100, Pb(Zr,Ti)O ₃ , BaTiO ₃ |
| Thermoelemente | NiCr-Ni u. a. |
| Halbleiter-Temperatursensor | Silizium, Germanium |
| Bimetallschalter | Zink, Stahl, Messing |
| Durchflussmessung | |
| Ultraschallsensor | Piezoelektrische Keramiken, modifizierte Blei-Zirkonat-Titanate (PZT) und für Niedervolt-Aktoren: Blei-Magnesium-Niobate (PMN) |
| Coriolis-Massendurchflussmesser | Edelstahl, Hastelloy C oder Edelstahl, Titan, Tantal |
| Thermischer Durchflussmesser | Beheizter feiner Metalldraht (z. B. Platin, Wolfram oder deren Legierungen) |
| Druckmessung | |
| Piezo-resistiver Drucksensor | Silicium |
| Piezoelektrischer Drucksensor | Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) |
| Hallelement | Silicium, Magnet |
| Gas-Messung | |
| Wärmetönungssensoren | gewickelter Platindraht, eingebettet in einer Keramik-Perle |
| Metalloxid-Halbleitergassensoren (MOX) | Zinn(IV)-oxid (SnO ₂) verändern unter Gaseinfluss ihre Leitfähigkeit. Andere Materialien sind Zinkoxid, Titandioxid oder organische Halbleitermaterialien wie MePTCDI. |
| Lambdasonde | Zirkoniumdioxid (Zirkonium(IV)-oxid), Yttrium-dotierte Zirkoniumdioxid- |

Produktionstechnik. Zukünftig sind vor allem Sensoren zur Umsetzung von Industrie 4.0 wichtig. Diese können aber in ihren Messprinzipien und den verwendeten Materialien sehr unterschiedlich sein (vergleiche Tab. 4.111).

4.39.3 Foresight industrielle Nutzung

Es ist derzeit nicht valide abschätzbar, inwieweit die Industrie 4.0 die heutige Produktionstechnik tatsächlich bis zum Jahr 2035 durchdringt. Nach einer aktuellen Studie von FROST & SULLIVAN (2015c) betragen die Wachstumsrate für Sensoren für die Industrie 4.0 (IoT) von 2014 bis 2021 im Mittel ca. 15,8 %. Schreibt man dieses Wachstum über das Jahr 2021 bis zum Jahr 2035 fort,

dann verzwanzigfacht sich der Umsatz mit Sensoren von 1,5 Mrd. \$ 2014 auf ca. 33 Mrd. \$ im Jahr 2035. Den größten Anteil am Umsatz haben dabei Durchfluss-, Druck-, Temperatur-, Gas- und Annäherungssensoren (vergleiche Abb. 4.112). Insgesamt wurden 47 Sensortypen untersucht.

4.39.4 Foresight Rohstoffbedarf

Es stehen keine Übersichtsdarstellungen zur Nutzung von Rohstoffen in Sensoren zur Verfügung. Aber auch aufgrund der oben dargestellten Vielfalt von Sensoren ist es nicht möglich, wissenschaftlich valide den Bedarf für Sensoren für Industrie 4.0 zu erheben.

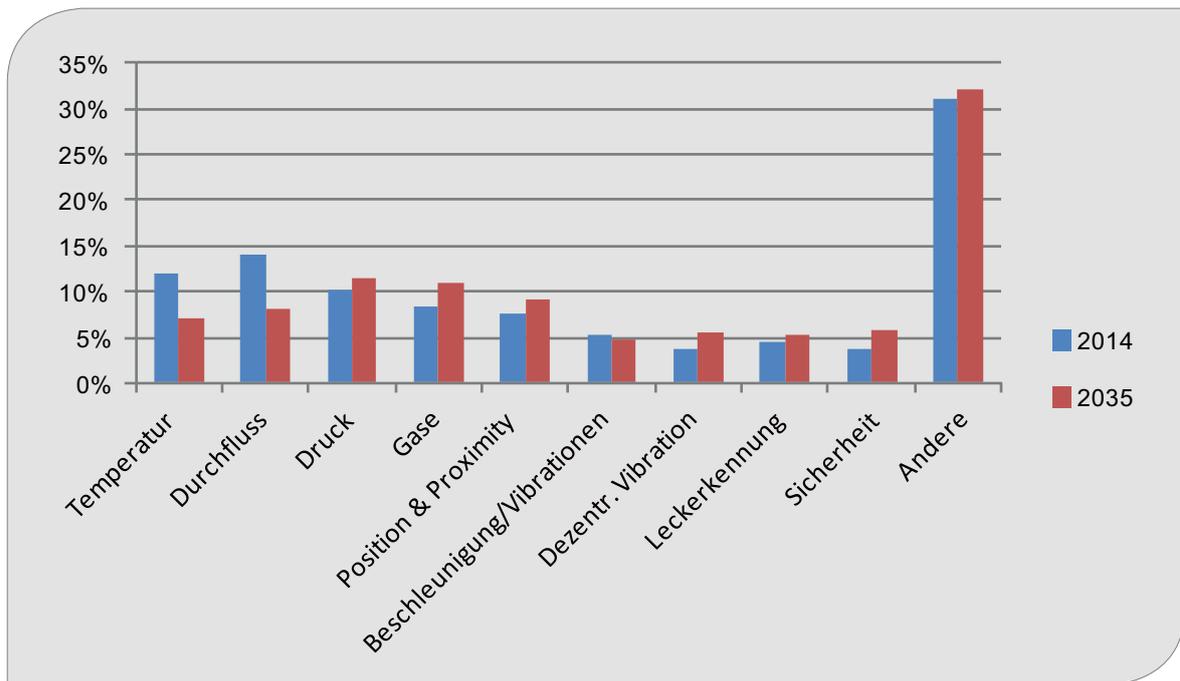


Abb. 4.112: Anteil einzelner Sensorarten am weltweiten Gesamtumsatz, eigene Berechnungen nach (FROST & SULLIVAN 2015c)

4.39.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Sensorhersteller wissen in der Regel nicht genau, in welchen Prozessen oder Anlagen ihre Produkte eingebaut werden und ob und wohin diese Anlagen exportiert werden. Grundsätzlich kann aber davon ausgegangen werden, dass die Produktionsanlagen nach ihrer Nutzungsphase einem Recycling zugeführt werden und dabei auch ein Teil der Sensoren wiederverwendet werden (z. B. Pt100 Sensoren) bzw. in ein spezielles Recycling gelangen.

4.40 Carbonfaserverstärkter Kunststoffleichtbau

4.40.1 Technologiebeschreibung

Carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK, englisch „Carbon Fibre Reinforced Plastics“ CFRP) ist ein Verbund aus Kohlenstofffasern, die in eine Kunststoffmatrix eingebettet sind. Als Matrix dient in hochwertigen Anwendungen Epoxidharz, das durch die Reaktion zweier Komponenten zu einem duroplastischen Kunststoff aushärtet. Aber auch Thermoplaste und andere Duroplaste kommen in bestimmten Anwendungen zum Einsatz. Durch die Fasereinlage steigt die Festigkeit und

Tab. 4.112: Festigkeitseigenschaften von CFK in Abhängigkeit der Faserorientierung (ULLMANN 2009)

| Eigenschaft | Epoxid | Winkel zwischen Faser- und Belastungsrichtung im CFK | | | |
|-------------------------------------|---------|--|-------|----------|--------|
| | | 0° | 90° | 0° + 90° | 45° |
| Faservolumenanteil % | 0 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Dichte g/cm ³ | 1,2–1,3 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| Zugfestigkeit N/mm ² | 60–80 | 1.600 | 60 | 700 | 180 |
| Elastizitätsmodul N/mm ² | 3.500 | 130.000 | 9.000 | 70.000 | 23.000 |

Tab. 4.113: Mechanische Eigenschaften von Werkstoffen (ULLMANN 2009)

| Werkstoff | Dichte g/cm ³ | Zugfestigkeit N/mm ² | Elastizitätsmodul N/mm ² |
|------------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| Kohlenstofffaser | 1,75 | 3.500 | 230.000 |
| Hochfester Stahl | 7,87 | 1.300 | 210.000 |
| Aluminium | 2,7 | 370 | 70.000 |
| Glasfaser | 2,60 | 3.400 | 22.000 |

Steifigkeit des Matrixwerkstoffs in Faserrichtung beträchtlich. Quer zur Faserrichtung können die eingelegten Fasern keine Kräfte aufnehmen, die Festigkeit des Grundwerkstoffs wird in dieser Richtung geschwächt. Die starke Abhängigkeit der Festigkeit und Steifigkeit von der Faserorientierung zeigt Tab. 4.112.

Um die zu erwartenden Beanspruchungen des Bauteils aufnehmen zu können, wird der Kunststoff mit sich kreuzenden Fasergelegen verstärkt. Die Zahl der benötigten Gelege und ihre Faserrichtungen werden aus den Bauteilbelastungen mit Computerprogrammen berechnet. Um das Ausziehen der Fasern bei Belastung zu verhindern, muss ein inniger Haftverbund zwischen Faser und Kunststoffmatrix bestehen. Dies ist im Verbund von Kohlenstofffaser und Epoxidharz der Fall.

Die mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoff CFK werden von den eingelegten Kohlenstofffasern bestimmt. Sie weisen trotz ihrer geringen Dichte von 1,75 g/cm³ beeindruckende Festigkeitseigenschaften auf. Ihre Zugfestigkeit erreicht, wie Tab. 4.113 zeigt, beinahe den dreifachen Wert von hochfestem Stahl, ihr Elastizitätsmodul und damit ihre Steifigkeit ist etwa 10 % höher. Der Werkstoffvergleich zeigt auch, dass mit Glasfasereinlagen zwar die Zugfestigkeit von CFK erreicht werden kann, nicht aber dessen Steifigkeit. Glasfaserverstärkte Kunststoffe sind auch schwerer als CFK.

Trotz seiner hohen Festigkeit und Steifigkeit ist CFK ein sehr leichter Werkstoff im Vergleich zu Metallen. Auf gleiche Festigkeit ausgelegt ist ein CFK-Bauteil etwa 50 % leichter als Stahl und 30 % leichter als Aluminium (BMW 2014b). Hohe Festigkeit und hohe Steifigkeit bei zugleich gerin-

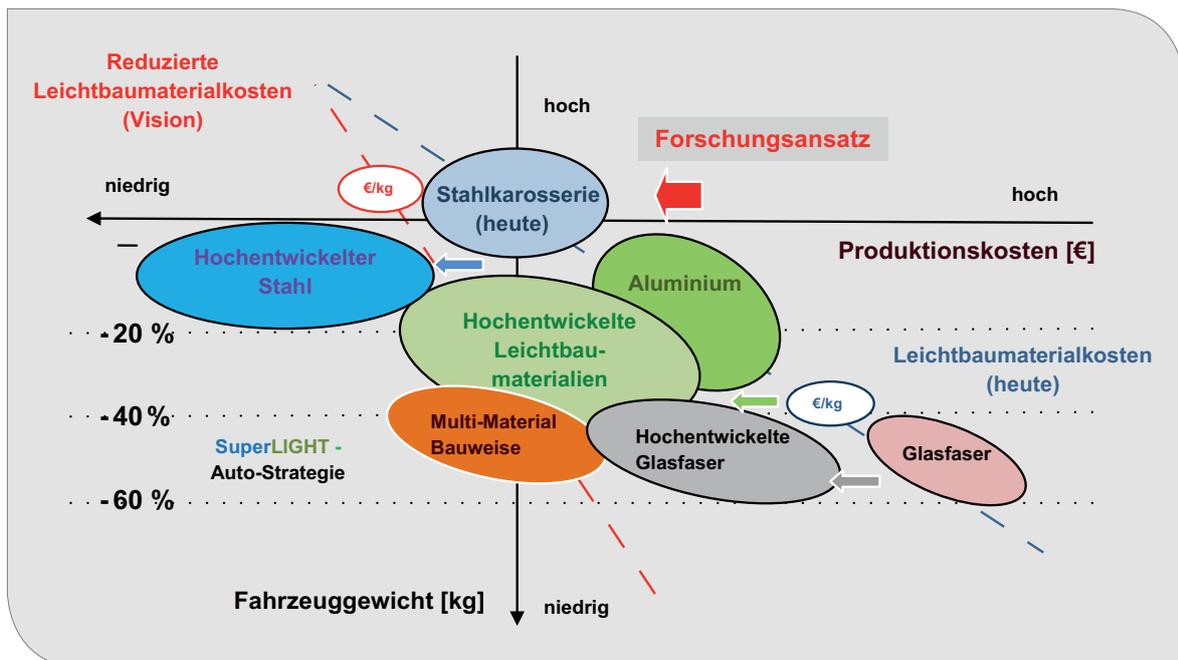


Abb. 4.113: Gewichtsvorteil und Kosten von Leichtbaumaterialien (Quelle: eigene Darstellung nach GOEDE 2005)

gem Gewicht machen CFK zu einem bevorzugten Leichtbaumaterial.

Gebremst wird die industrielle Nutzung durch die im Vergleich zu Metallen aufwändige und damit teure Formgebung bei der Herstellung von CFK-Bauteilen. Sie erfordert einen hohen Anteil an Handarbeit. Die Herstellungskosten und den Gewichtsvorteil von Leichtbaumaterialien zeigt die Grafik in Abb. 4.113 schematisch. Typische CFK-Produkte waren in der Vergangenheit beispielsweise hochpreisige Tennisschläger, Fahrradrahmen, Angelruten, Skistöcke, Bootsrümpfe und Flügel von Windkraftanlagen. Mehr und mehr gewinnt der Werkstoff auch im Flugzeug- und Fahrzeugbau an Bedeutung. Der Rumpf der Boeing 787 „Dreamliners“ ist zur Gänze aus CFK. Auch Airbus verwendet CFK-Komponenten in seinen Flugzeugen.

Die Entwicklungsarbeiten zielen darauf ab, die Fertigung von CFK-Bauteilen weitgehend zu mechanisieren und automatisieren, um die teure Handarbeit abzulösen. Vorreiter bei der Großserienfertigung ist BMW. Dem Unternehmen ist es nach eigenen Angaben in zehnjähriger Entwicklungsarbeit erstmals gelungen, die Fahrgastzelle der BMW-Modelle i3 und i8 als selbsttragende Karosserie (Monocoque) in Serie zur Gänze aus CFK herzustellen (Abb. 4.114). Auf das CFK-Monocoque wird die Außenhaut aus thermoplastischem Kunststoff aufgebracht (PLASTVERARBEITER 2013). Das Ergebnis zeigt Abb. 4.115.

Die Herstellungskosten konnten durch Mechanisierung und Automatisierung halbiert werden. Trotz der erzielten Fertigungsfortschritte liegen die Herstellungskosten von CFK-Karosserien immer noch um ein mehrfaches über denen von Stahlkarossen. Unter anderem verweilen die CFK-Teile zur Aushärtung an die zehn Minuten in den Pressen. Das liegt weit über den Taktzeiten beim Tiefziehen von Stahl von einigen Sekunden. Ziel von BMW ist, die Kosten auf ein Zehntel zu senken. Eine Studie des VDI kommt, gestützt auf Aussagen von Volkswagen, zu dem Ergebnis, dass sich die Kosten von CFK-Bauteilen künftig um Zweidrittel reduzieren lassen. Sie würden dann etwa das 1,8-fache von Stahlbauteilen kosten (VDI 2013).

Der BMW i3 ist ein batteriegetriebenes Elektrofahrzeug das mit einer 21,6 kWh Lithium-Ionen-Batterie und einem 125 kW Elektromotor ausgestattet ist. Durch den CFK-Leichtbau ist es

trotz des Batteriegewichts von 230 kg gelungen, das Fahrzeuggewicht der viersitzigen Limousine bei 1.270 kg zu halten (BMW 2014c). Besser verglichen mit herkömmlichen Konstruktionen lässt sich das sportliche hybride Serienfahrzeug BMW i8 mit CFK-Monocoque. Es wiegt 1.486 kg und beschleunigt mit einer Systemleistung von 266 kW (362 PS) in 4,4 Sekunden von 0 auf 100 km/h. Der vergleichbare BMW ActiveHybrid 5 mit konventioneller Stahlkarosserie wiegt dagegen 1.925 kg.

Auch Volkswagen experimentiert mit CFK. Das hybride Experimentalfahrzeug VW XL1 besitzt eine Fahrgastzelle aus CFK (Abb. 4.116). Der zweisitzige Plug-in-Hybrid, mit konsequentem Leichtbau aller Komponenten, wiegt 795 kg. Das Fahrzeug verbraucht im NEFZ-Normzyklus für PKW-Hybride 0,9 l Diesel auf 100 km.



Abb. 4.114: Monocoque (Fahrgastzelle) des BMW i3 aus CFK auf Aluminium Fahrgestell (Quelle: Alexauto321, WIKIMEDIA)



Abb. 4.115: BMW i3 Elektrofahrzeug (Quelle: BMW AG)



Abb. 4.116: Volkswagen XL1 mit CFK-Monocoque
(Quelle: VOLKSWAGEN AG)

4.40.2 Rohstoffinhalt

Mit Abstand wichtigster Ausgangsstoff für die Herstellung von Kohlenstofffasern ist Polyacrylnitril (PAN) mit der chemischen Summenformel $[C_3H_3N]_n$. PAN ist ein Kohlenwasserstoff, dem Stickstoff in einer Dreifachbindung angelagert wurde: $[-CH_2-CH(C\equiv N)-]_n$. 90 % der Weltproduktion von Carbonfasern stammen aus PAN (ULLMANN 2011). Die Polyacrylnitrilfasern werden über 5–10 Stunden bei 250–300 °C dehydriert und anschließend 1–3 Stunden in partieller Oxydation (Pyrolyse) unter einer Stickstoffatmosphäre bei 1.500 °C verkocht. Dabei wird der Stickstoff ausgetrieben und es entsteht eine 7 µm dünne fast reine Kohlenstofffaser. Eine Graphitierung (Gefügeänderung) bei 2.500 °C steigert die Steifigkeit der Faser für hochwertige Anwendungen weiter (RÖMPP 2015a, ULLMANN 2011). Auch Celluloseacetat und teerhaltige Rückstände der Erdölraffination können als Ausgangsstoff für Kohlenstofffasern genutzt werden (RÖMPP 2015b).

Etwa 50.000 der hauchdünnen Kohlenstofffasern werden zu einem Endlosfaden verdreht und auf Spulen gewickelt. Mit diesen Kohlenstofffäden werden textile Gelege (Textilmatten) gewebt, welche im späteren Verbund mit der Kunststoffmatrix die Kräfte aufnehmen. Den Kräfteangriffen entsprechend werden Matten mit unterschiedlichen Faserrichtungen zu Stacks übereinander gelegt und zugeschnitten. Ein Heizwerkzeug formt den Mattenstack dreidimensional vor (Preform). Die Preform kommt im nächsten Verarbeitungsschritt in ein beheiztes Spritzgusswerkzeug, in dem durch Harzen die endgültige Form des Bauteils entsteht. Dabei wird das Kohlenstoffmattengelege nach

einem sorgfältig abgestimmten Druck-, Temperatur- und Zeitprogramm unter Hochdruck mit Epoxidharz verpresst. Nach dem Aushärten des Harzes trägt das Bauteil seine endgültige Form, wird entnommen und endbearbeitet (PLASTVERARBEITER 2013, WAGNER 2013).

Acrylnitril ($CH_2=CH-C\equiv N$), das Monomer von Polyacrylnitril, wird durch Ammonoxidation aus Propen hergestellt (RÖMPP 2015c). Dabei werden Propen mit Ammoniak und Sauerstoff bei 300–600 °C katalytisch zur Reaktion gebracht. Die für die Herstellung von Propen eingesetzten Alkane stammen aus der Erdölraffination.

Epoxidharze werden zum weit überwiegenden Teil durch Polyaddition von Bisphenol A ($C_{15}H_{16}O_2$) und Epichlorhydrin (C_3H_5ClO) gewonnen. Bei der Polyaddition werden keine Reaktionsprodukte abgespalten. Bisphenole bestehen aus zwei über ein Kohlenstoffatom verknüpfte Phenolringe. Epichlorhydrin wird durch Addition von unterchloriger Säure (HOCl) an Allylchlorid (C_3H_5Cl) gewonnen.

CFK besteht also sowohl im Faseranteil als auch in der Kunststoffmatrix vorwiegend aus organischen Molekülen, die aus petrochemischen oder kohlestämmigen Rohstoffen gewonnen werden. An anorganischen Stoffen sind Sauerstoff und Chlor enthalten. Für die Herstellung der Carbonfasern aus Polyacrylnitril wird zusätzlich Stickstoff benötigt. Alle benötigten anorganischen Stoffe sind global in großer Menge verfügbar.

Graphitierte Carbonfasern bestehen zu fast 100 % aus reinem Kohlenstoff (ULLMANN 2011). Das Epoxid mit der Summenformel $C_{18}H_{21}ClO_3$ enthält gut 67 % Kohlenstoff, 15 % Sauerstoff, 11 % Chlor und fast 7 % Wasserstoff. Für den Werkstoff CFK mit einem Carbonfaseranteil von 60 Vol.-% und einer Epoxidmatrix von 40 Vol.-% errechnet sich

Tab. 4.114: Stoffliche Zusammensetzung von CFK mit Epoxidmatrix und einem Faservolumenanteil von 60 %

| Stoff | Gewichtsanteil in % |
|-------------|---------------------|
| Kohlenstoff | 89,7 |
| Sauerstoff | 4,7 |
| Chlor | 3,5 |
| Wasserstoff | 2,1 |

die in Tab. 4.114 wiedergegebene Stoffzusammensetzung. Der Kohlenstoffanteil erreicht fast 90 %.

Der Werkstoffmassenersatzfaktor für eine CFK-Karosserie in der Festigkeit von herkömmlichen Stahlkarossen beträgt 0,5 (BMW 2014b). Das heißt, jede Tonne verbauter Stahl in der Karosseriefertigung kann durch 500 kg CFK ersetzt werden.

Der Energieeinsatz für die Herstellung von CFK-Karosserien ist höher als bei der konventionellen Herstellung aus Tailored Blanks Stahlblechen. Insbesondere die Kohlenstofffaserherstellung ist energieintensiv (SUZUKI 2005). Dem entsprechend ist der Faseranteil für den Energiebedarf eine kritische Größe.

Eine weitere Möglichkeit, den Energieeinsatz zu senken, ist die Wiederverwendung von Kohlenstofffasern durch das Recycling von CFK-Bauteilen. Dem stehen allerdings technische Probleme entgegen. Beim Recycling von CFK-Altteilen werden die Fasern verkürzt und können dann nicht mehr zu Filamenten (Endlosfäden) verdrillt werden, wie sie für die Herstellung von textilen Gelegen hoch belastbarer Bauteile benötigt werden (siehe Kapitel 4.40.5).

Unter günstigen Annahmen zu den die mit CFK-Bauteilen erreichbaren Gewichtseinsparungen können die Kraftstoffeinsparungen während der Fahrzeugbetriebsdauer den höheren Energieeinsatz bei der Fertigung kompensieren (DAS 2011).

4.40.3 Foresight industrielle Nutzung

Die vorliegende Technologiesynopse stellt die CFK-Anwendung in der PKW-Produktion in den Focus, weil hier die Nutzung von CFK die Schwelle zur Großserienfertigung soeben (2014) überschritten hat. Die globale PKW-Flotte wird auf 900 Mio. Fahrzeuge geschätzt. Die Jahresproduktion von PKW gibt Shell, gestützt auf Zahlen der OICA, mit 60 Mio. Fahrzeugen an. Bis zum Jahr 2035 soll der globale Bestand an PKW auf 1,7 Mrd. Fahrzeuge ansteigen (SHELL 2014). Dies würde rechnerisch einer Produktion von jährlich 110 Mio. PKW entsprechen. Tab. 4.115 stellt diese Zahlen zusammen.

Tab. 4.115: Globale Entwicklung von PKW-Bestand und Produktion

| | 2013 | 2035 |
|---------------------|------|-------|
| Bestand Mio. PKW | 900 | 1.700 |
| Produktion Mio. PKW | 60 | 110 |

Eine Studie der Forschungsvereinigung Automobiltechnik aus dem Jahre 2008 hat die Gewichtsverteilung von Rohkarossen für ein typisches Kompaktfahrzeug wie dem VW Golf untersucht. Einschließlich von Türen, Heckklappe, Motorhaube und Kotflügel wiegt die Rohkarosse 370 kg (Tab. 4.116). Bei der Rohkarosse sind Scheiben, Lack, Anbauten, darunter Elektromotoren der Fensterheber, und Türverkleidungen, nicht enthalten. Das Monocoque, die für die Crashesicherheit entscheidende Baugruppe des Fahrzeugs, dominiert mit 270 kg das Gewicht der Rohkarosse. Durch die weitere Optimierung der Tailored Blanks Technologie lässt sich das Gewicht der Stahlmonocoque weiter reduzieren. 250 kg scheinen bis 2035 erreichbar.

Tab. 4.116: Gewichtsverteilung der Rohkarosse eines Kompaktfahrzeugs der Golf Klasse (FAT 2008)

| Bauteil | Gewicht in kg |
|---------------------------|---------------|
| Body-in-White (Monocoque) | 270 |
| Heckklappe | 12 |
| Motorhaube | 22 |
| Türen vorne | 34 |
| Türen hinten | 26 |
| Kotflügel | 6 |
| Rohkarosse | 370 |

4.40.4 Foresight Rohstoffbedarf

Für die Abschätzung des Rohstoffbedarfs werden Fahrzeuge der Golf Klasse als repräsentativ für das Fahrzeugspektrum zugrunde gelegt. Das Monocoque von PKW wird heute, mit wenigen Ausnahmen, fast ausschließlich aus Stahl gefertigt. Dafür werden bei einer Fahrzeugproduktion von 60 Mio. PKW und einem Gewicht des Monocoque von 270 kg weltweit jährlich 16,2 Mio. t Stahlblech verarbeitet. Geht man davon aus, dass durch weitere

Tab. 4.117: Globale Produktion und Bedarf von Werkstoffen für PKW-Karosserien in 1000 t

| Werkstoff | Weltproduktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|-----------|---------------------|-------------|----------------------|
| Rohstahl | 1.655.549,57 | 16.200 | 27.500 |
| CFK | 74 ¹ | 4,2 | 13.750 |

¹ Quelle: AVK 2013

Optimierung der Tailored Blanks Technologie das Gewicht des Monocoques auf 250 kg sinkt, würden 2035 27,5 Mio. t Stahl für die Karosseriefertigung von dann 110 Mio. PKW verbraucht, wenn keine Werkstoffalternativen zur Verfügung stünden. Diese Stahlmenge könnte durch 13,75 Mio. t CFK substituiert werden. Tab. 4.117 gibt die Marktpotenziale der beiden Werkstoffe wieder.

In der Praxis kommt der Werkstoff Stahl, trotz der großen Fortschritte, die der Stahlleichtbau durch höhere Werkstofffestigkeiten und die Tailored Blanks Technologie gemacht hat, bei der Karosseriefertigung durch Leichtbaustoffe unter Druck. Der Trend, das Fahrzeuggewicht zu reduzieren, ist ungebrochen. Treiber sind die Kraftstoffpreise, der Klimaschutz und die Transformation zur Elektromobilität. Zwar werden batteriegetriebene Fahrzeuge aufgrund des ungelösten und aus heutiger Sicht kaum lösbar Reichweitenproblems ein Nischenprodukt für Ballungsräume bleiben. Aber auch bei Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeugen kommt es auf Gewichtsreduktion an, um trotz der schweren Batterie- und Brennstoffzellenkomponenten energieeffiziente Fahrzeuge zu bauen.

Wie der Wettbewerb zwischen den Werkstoffen Stahl, Aluminium und CFK in Karosseriebau ausgehen wird, lässt sich aus heutiger Sicht nicht mit ausreichender Sicherheit einschätzen. Auch unkonventionelle Werkstoffe, beispielsweise Titan, könnten in Zukunft eine stärkere Rolle spielen. CFK ist der leichteste Werkstoff. Daraus lassen sich hochfeste und steife Komponenten herstel-

len. CFK-Karosserien stehen an der Schwelle zur industriellen Großserienfertigung. Die CFK-Fertigung ist aber noch teuer und ob es gelingt, die gewünschte Kostendegression zu erreichen, ist ungewiss. Auch die Energieeffizienz bei der Fertigung von CFK-Bauteilen und der Herstellung der Carbonfasern ist noch unbefriedigend.

Die „Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe“, die Fachvereinigung der Hersteller, Ausrüster und Anwender faserverstärkter Kunststoffcomposites, hat im September 2013 die Studie „Composites Market Report 2013“ vorgelegt (AVK 2013). Darin identifiziert sie CFK-Anwendungen im Automotive Bereich als den dominanten künftigen Wachstumstreiber der Branche. Der Verband geht von einem Wachstum der CFK-Anwendungen im Fahrzeugbau von 34 % pro Jahr aus. Dies scheint möglich, weil das Wachstum von einem sehr niedrigen Niveau startet und sich die künftige Nutzung, trotz der hohen Wachstumsrate im Vergleich zu Stahl, in Grenzen hält.

2012 wurden nach Erhebungen des Verbands weltweit 2.150 t Carbonfasern im Fahrzeugbau zur Herstellung von CFK eingesetzt (AVK 2013). Bei einem Faservolumenanteil von ca. 60 % können daraus 3.100 t CFK-Komponenten gefertigt werden. Eine durchgängige Wachstumsrate von 34 %/a würde den CFK-Bedarf auf rund 2,6 Mio. t im Jahr 2035 steigern und weltweit 5,2 Mio. t Stahl im Fahrzeugbau substituieren. Setzt die gesamte Karosseriefertigung weltweit verzinkte Stahlbleche ein, würden mit dem substituierten Stahl zugleich

Tab. 4.118: Globale Produktion (Quelle: BGR 2015b) und Werkstoffbedarf für die Monocoquefertigung im Fahrzeugbau in 1.000 t

| Werkstoff | Weltproduktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|-----------|---------------------|-------------|----------------------|
| Rohstahl | 1.655.549,57 | 16.200 | 22.250 |
| CFK | 74 ¹ | 4,20 | 2.625 |

¹ Quelle: AVK 2013

Tab. 4.119: Globale Produktion und Rohstoffbedarf für die Monocoquefertigung im Fahrzeugbau in 1.000 t

| Werkstoff | Weltproduktion 2013 | Bedarf 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|----------------|---------------------|-------------|----------------------|
| Carbonfasern | 44,2 ² | 2,88 | 1.800 |
| Epoxid für CFK | 29,8 ² | 1,32 | 825 |
| CFK | 74,0 ¹ | 4,20 | 2.625 |

¹AVK 2013

²eigene Berechnung

95.000 t Zink eingespart. Tab. 4.118 stellt für dieses Szenario die Bedarfsschätzung der Basiswerkstoffe zusammen. Zwar werden auch andere Fahrzeugkomponenten aus CFK gefertigt, die Fahrgastzelle jedoch ist die dominierende Baugruppe für das künftige Wachstum der CFK-Anwendung.

Tab. 4.119 stellt den Rohstoffbedarf für die Fertigung von 2.625.000 t CFK im Jahr 2035 zusammen und stellt diesen in Relation zu den heutigen Produktionsmengen. Setzt sich CFK als Werkstoff im Fahrzeugbau in Volumenwendungen wie der Fahrgastzelle durch, wird dies die Rohstoffnachfrage massiv verringern.

4.40.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Carbonfasern konkurrieren bei hochfesten faserverstärkten Kunststoffen mit Glasfasern. Glasfaserverstärkte Kunststoffe erreichen fast die Zugfestigkeit von CFK, haben aber bei weitem nicht dessen Steifigkeit. Die hohe Stabilität ist für die Crashesicherheit der Fahrgastzelle aber unerlässlich. Potenzielle Substituenten bei den Metallen sind hochfester Stahl, Aluminium und Titan. Bauteile aus diesen Metallen erreichen jedoch nicht den Gewichtsvorteil von CFK. Aluminium weist eine ungünstige Energiebilanz auf. Titan ist aufgrund des komplexen Herstellungsprozesses teuer. Ob es gelingt, durch neue Prozesse, an denen gearbeitet wird, den Titanpreis deutlich zu senken ist ungewiss. Magnesium, mit 1,74 g/cm³ das leichteste Metall, und seine Werkstofflegierungen eignen sich wegen der geringen Bruchdehnung nicht für crashesichere Karosserien (BAYER 2013). Es kommt eher für Anbauteile wie Türen und Heckklappe in Betracht. Auch mit Metallschäumen wird seit Jahren experimentiert (NIESING 2015).

Alteile aus CFK lassen sich unter Rückgewinnung von Energie *thermisch* verwerten. Die *stoffliche* Verwertung bereitet jedoch Probleme. Die Epoxidharzmatrix kann als vernetzter duroplastischer Kunststoff nicht durch Umschmelzen in eine neue Form gebracht werden. Es bleibt nur die energetische Verwertung oder die Herstellung eines gering wertigen Füllstoffs durch Granulierung. Der mechanischen Rückgewinnung der Carbonfäden steht der innige Verbund zwischen Faden und Epoxidmatrix entgegen, der angestrebt wird, um ein Ausziehen der Fäden bei Belastung zu vermeiden.

Das CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG hat ein Pyrolyseverfahren entwickelt, um die Carbonfäden von der Epoxidmatrix zu trennen. Die Carbonfäden werden anschließend geschnitten oder gemahlen. Das gewonnene Carbon Rezyklat kann als Füll- oder Funktionsstoff wiederverwendet werden (MEYER 2015b).

Die gewonnenen kurzen Fäden lassen sich nicht zu endlosen Filamenten verarbeiten, wie sie für hochwertige Anwendungen, aus denen sie stammen, benötigt werden. Günstigstenfalls können sie für weniger belastete Kunststoffteile, beispielsweise die Dachbeplankung der Fahrgastzelle, eingesetzt werden, um den polymeren Grundwerkstoff zu verstärken. Eine Rückgewinnung von endlosen Carbonfäden ist nicht in Sicht.

In einer Umfrage des Verbands Deutscher Ingenieure (VDI) in der Automobilindustrie im September 2014 fordern 86 % der Befragten ein ganzheitliches Recyclingkonzept für CFK-Bauteile. Fast 28 % waren der Meinung, dass sich CFK als Werkstoff auf dem Markt erst durchsetzen kann, wenn ein qualitativ hochwertiges Recyclingverfahren zur Verfügung steht. Ziel müsse es sein, die Carbonfasern ohne Qualitätsverlust zurück zu gewinnen

und wieder für hochwertige Bauteile im Herstellungsprozess einzusetzen (Euwid 2015).

4.41 CNT (Carbon Nanotubes)

4.41.1 Technologiebeschreibung

Die Entdeckung der Kohlenstoffnanoröhren (CNT, Carbon Nanotubes) lässt sich auf das Jahr 1993 datieren, als NEC und IBM fast zeitgleich in der Literatur die Herstellung und Charakterisierung von einwandigen Kohlenstoff-Nanoröhren publizierten (IJIMA & ICHIHASHI 1993, BETHUNE et al. 1993). Der Aufbau der CNT ähnelt dem Gra-

phit: die Kohlenstoffatome sind mit drei weiteren C-Atomen verbunden, so dass ein flaches Gitter entsteht. Dieses kann sich dann zu Röhren mit Durchmessern von 1–50 Nanometer formen.

Man unterscheidet einwandige und mehrwandige CNT, in der Literatur auch MWNTs und SWNTs (multi walled nanotubes und single walled nanotubes) abgekürzt. Die Herstellung von mehrwandigen CNT ist einfacher und kostengünstiger; es entstehen aber in der Regel Gemische von Nanoröhren mit unterschiedlichen Formen und Eigenschaften. Die mehrwandigen CNT liegen als ineinander verschobene Röhren vor. Einwandige CNT haben nicht so viele Fehlstellen im Gitter und damit bessere Eigenschaften.

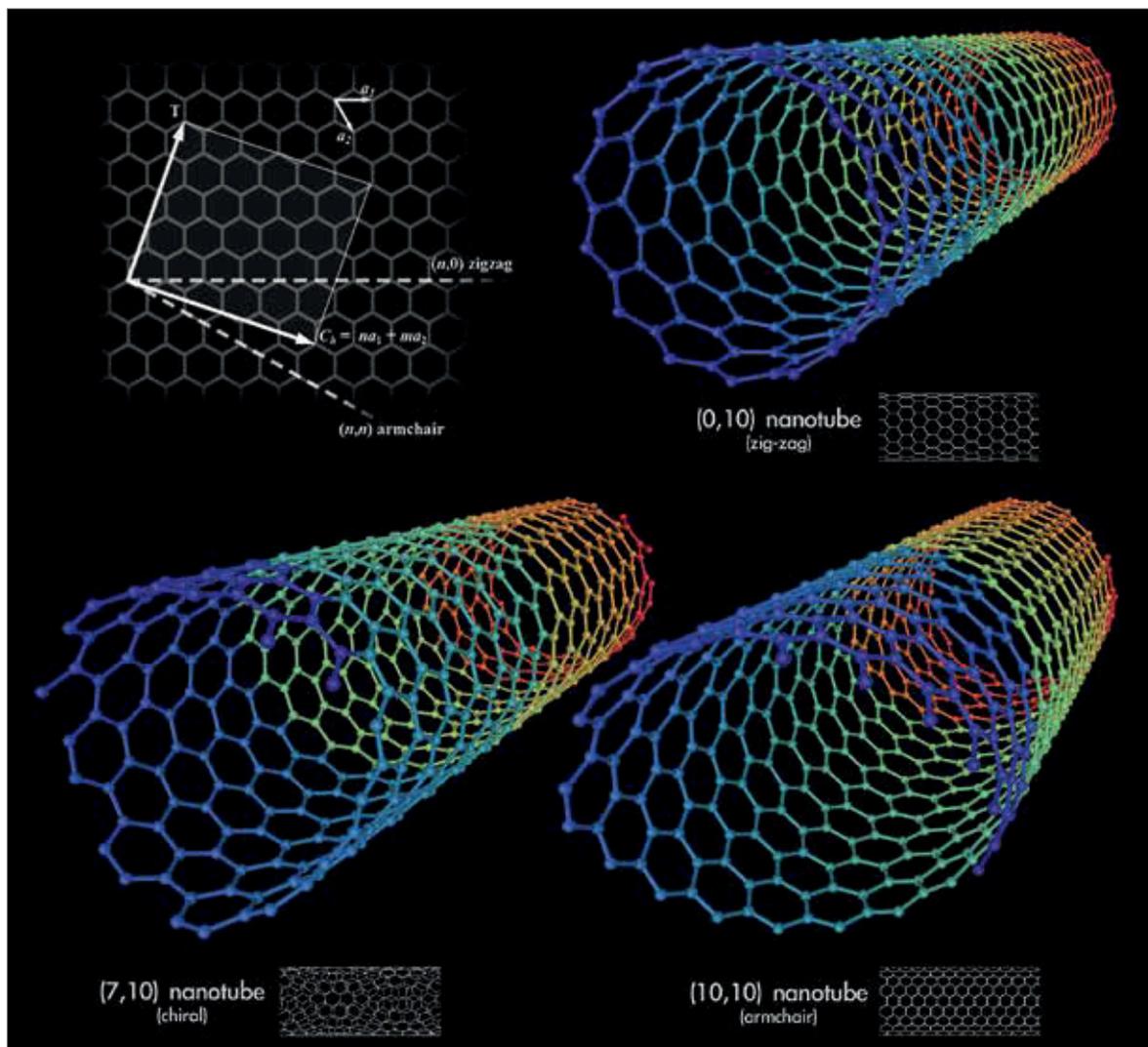


Abb. 4.117: Modelle von verschiedenen einwandigen Kohlenstoffröhren
(Quelle: Michael Ströck, WIKIMEDIA, CC BY-SA 3.0)

Zur Herstellung der CNT gibt es im Wesentlichen drei Verfahren:

- Bogenentladung: Durch einen Lichtbogen wird zwischen Graphitelektroden ein Plasma von 3.000–4.000 °C hergestellt. In Anwesenheit von Katalysatoren in der Graphitelektrode (Eisen, Kobalt, Nickel) entstehen einwandige CNT, ohne Katalysator entstehen mehrwandige Nanotubes.
- Laserverdampfung: In einem Ofen (1.200 °C) wird durch einen Laserstrahl Graphit verdampft. Das entstehende Plasma ist regelmäßiger als bei der Bogenentladung. Ansonsten wie Bogenentladung.
- Chemische Gasphasen-Abscheidung: Sie ist das dominierende Herstellungsverfahren, bei dem gasförmige Kohlenstoffverbindungen (z. B. Kohlenwasserstoffe) bei 500–1.000 °C über einen Katalysator geleitet werden.

CNT sind in verschiedenen Qualitäten kommerziell verfügbar. Derzeit werden relativ unreine, mehrwandige CNT für weniger als 1.000 Euro pro kg verkauft (s. u. a. <http://www.cheaptubes.com>). Einwandige CNTs sind weitaus teurer und kosten derzeit meist weit über 1.000 €/kg (s. u. a. <http://ocsial.com/en/>).

Von den vielen herausragenden Eigenschaften, die Kohlenstoff-Nanoröhren besitzen, sollen hier nur folgende erwähnt werden:

Mechanische Eigenschaften: Die mikroskopische Zugfestigkeit einer einwandigen Kohlenstoff-Nanoröhre liegt bei ca. 65 GPa, das entspricht etwa dem 100-fachen von Stahl. Dabei muss aber berücksichtigt werden, dass hier ein nano-Partikel mit einem makroskopischen Werkstoff verglichen wird. Aufgrund ihrer geringen Dichte gelten Kohlenstoff-Nanoröhren daher als Material mit der

höchsten spezifischen Zugfestigkeit überhaupt (Brand et al. 2009, vergleiche Tab. 4.120).

Auch die **elektronischen Eigenschaften** hängen direkt von der geometrischen Struktur ab. Die Leitfähigkeit eines Kohlenstoffnanoröhrchen ist zehnfach größer als die von Kupfer. Aber auch hier ist zu berücksichtigen, dass CNT aufgrund ihres extrem kleinen Querschnitts trotz der großen Leitfähigkeit einen hohen Widerstand aufweisen und erst einmal makroskopische Leitermaterialien produziert werden müssen. Dies erfordert aber noch deutliche Fortschritte in wirtschaftlichen Herstellungsverfahren für lange, gleichmäßige CNT Fasern.

Die prinzipielle Eignung als Bauteile für flache und selbstleuchtende Feldemissionsbildschirme durch Felder von parallel aufgestellten Nanoröhren wurde bereits demonstriert: Dabei dienen die scharfen Spitzen der Nanoröhren als Quelle für Elektronen durch Feldemission (winzige Elektronenkanone, Kaltkathode schon bei relativ geringen Spannungen), die wie beim herkömmlichen Röhren-Fernsehgerät gegen einen Leuchtschirm beschleunigt werden. Weitere breit angelegte Entwicklungsarbeiten zielen darauf ab, CNT basierte transparente leitende Schichten zu erzeugen, um Indium-Zinnoxid (ITO) zu substituieren. Weitere Vorteile gegenüber ITO werden in der mechanischen Flexibilität und der kosteneffizienten Herstellung durch nicht-lithographische Verfahren gesehen (VOLDER et al. 2013).

Nanoröhren werden mit herkömmlichem Kunststoff gemischt (Komposite), wodurch die mechanischen Eigenschaften verbessert werden. So konnte beispielsweise bei einem CNT-Anteil von 0,1 % bei Epoxidharzen eine verbesserte Bruchfestigkeit gemessen werden (GOJNY et al. 2004). Außerdem ist es möglich, die Leitfähigkeiten elektrisch leitender Kunststoffe herzustellen. Forschungsarbeiten

Tab. 4.120: Werkstoffeigenschaften von CNT in Vergleich zu Stahl und CFK

| Material | Dichte [g/cm ³] | E-Modul [GPa] | Zugfestigkeit [GPa] | Zugfestigkeit/Gewicht (normalisiert) |
|-------------|-----------------------------|---------------|---------------------|--------------------------------------|
| SWNT | 1,4 | 542 | 65 | 462 |
| MWNT | 1,8 | 400 | 2,7 | 15 |
| Carbonfaser | 1,6 | 152 | 2,1 | 13 |
| Stahl | 7,6 | 207 | 0,7 | 1 |

am Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden zeigen, dass die Zugabe von nur 0,04 % CNT ausreicht, um einen Kunststoff elektrisch leitfähig zu machen (KRAUSE et al. 2010). Damit sind CNT besser als herkömmlichen Leitfähigkeitsruße.

4.41.2 Rohstoffinhalt

Zur Herstellung von CNT werden kohlenstoffhaltige Einsatzmaterialien wie Graphit oder Kohlenwasserstoffe benötigt. Beim CVD Verfahren werden als Katalysatoren Fe, Co, Ni, Mo u. a. verwendet, mit der sich die Struktur und Größe der erhaltenen CNT in gewissen Grenzen steuern lässt. Diese Katalysatoren müssen aber häufig aus den synthetisierten CNT wieder entfernt werden, da sie die Eigenschaften der CNT verschlechtern.

4.41.3 Foresight industrielle Nutzung

Im Jahre 2013 erklärte die Bayer MaterialScience (seit September 2015 Covestro) den Ausstieg aus der Produktion von CNT, nachdem Bayer in Lever-

kusen noch 2010 den Bau der nach eigenen Angaben „weltgrößte Produktionsanlage für Carbon Nanotubes“ gestartet hatte, die unter den Namen Baytubes vermarktet wurden. Geplant war eine Produktion von 200 Tonnen, der reguläre Betrieb wurde nie aufgenommen.

Hintergrund des Ausstiegs war laut der Stellungnahme von Bayer, dass mögliche „Anwendungsbereiche „sehr fragmentiert“ seien und eine umfangreiche Kommerzialisierung derzeit nicht in Sicht sei (PEHRKE 2013). Daneben wurden auch offene Fragen zur Toxikologie der CNT genannt. Die Patente von Bayer wurden 2014 von Future Carbon in Bayreuth übernommen (FUTURECARBON GMBH 2014).

Tatsächlich stagniert die Anzahl von Publikationen (mit carbon nanotubes als keyword in SCOPUS) und Patenten (carbon nanotubes im Titel oder abstract) seit 2010/2011 (vergleiche Abb. 4.118), nachdem die Entwicklung seit 2000 mit großer Dynamik verlief. Das liegt zum Teil auch daran, dass die Forschung an CNT bei einigen Entwicklern durch Forschungen an Graphen als zweidimensionales, flaches Kohlenstoffnetz, abgelöst wurde.

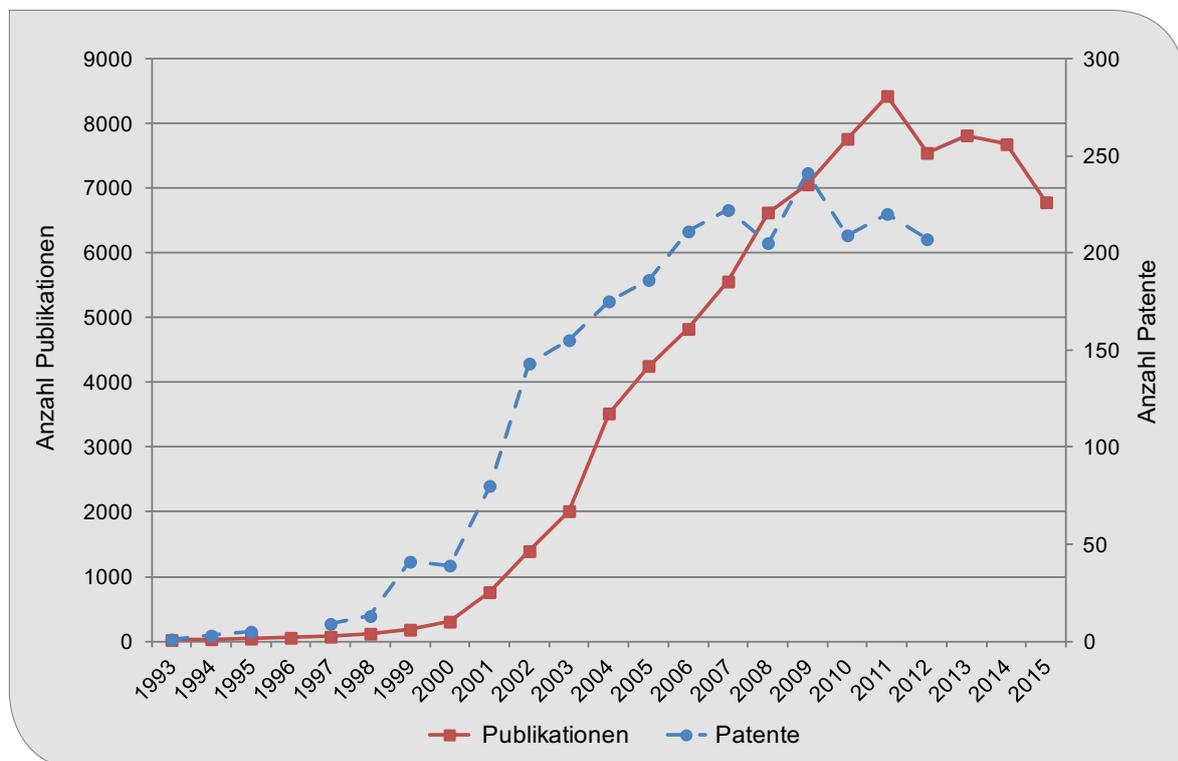


Abb. 4.118: Anzahl der Publikationen und Patente für CNT (Quelle: eigene Darstellung)

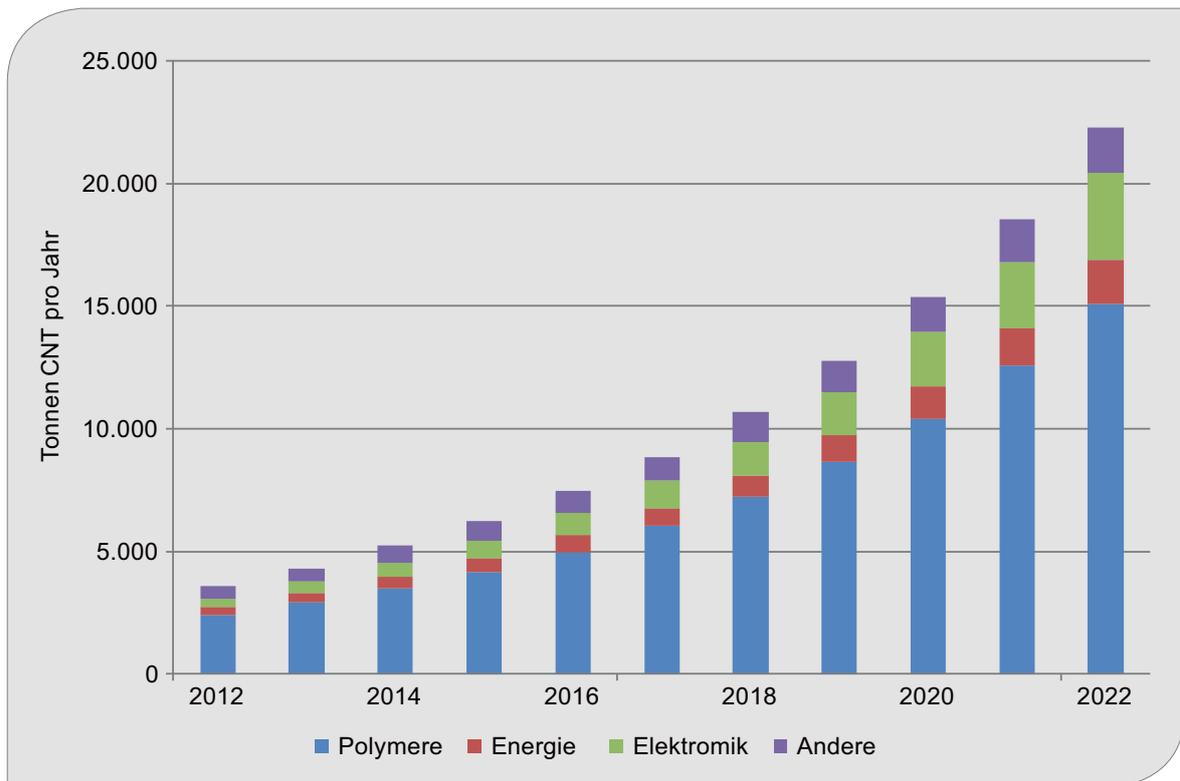


Abb. 4.119: Entwicklung der Einsatzbereiche von CNT bis 2022
(Quelle: Eigene Darstellung nach GRAND VIEW RESEARCH 2015b)

Der Markt für CNT bis zum Jahre 2022 wurde in einer neueren Studie mit Wachstumsraten von ca. 20 % (Energie, Polymere) bis 27 % (Elektronik) abgeschätzt (GRAND VIEW RESEARCH 2015b, vergleiche Abb. 4.119). Es ergibt sich ein Gesamtmarkt von 22.000 t im Jahr 2022; bei gleichen, unabgeschwächten Wachstumsraten wäre der Markt 2035 ca. 270.000 t.

4.41.4 Foresight Rohstoffbedarf

Wie schon unter Kapitel 4.41.2 dargestellt, werden kaum metallische Rohstoffe für die Herstellung von CNT eingesetzt. CNT als Zukunftstechnologie ermöglicht vielmehr eine Entlastung des Metallverbrauchs bei bestimmten Zukunftstechnologien.

So lässt sich durch den Einsatz von CNT anstelle von Graphit als Katalysatorträger der Einsatz von Platin in Brennstoffzellen um 60 % reduzieren (MATSUMOTO et al. 2004) und dotierte CNT könnten einen vollständigen Verzicht auf Platin ermöglichen (LE GOFF et al. 2009). Nicht zuletzt können sie auch eingesetzt werden, um elektronische Bauteile, wie

beispielsweise Computerchips, drastisch zu verkleinern (IBM 2015).

Auf die Substitution von ITO wurde oben schon eingegangen. Auch das Potenzial von CNT als Material für Stromkabel anstelle von Cu und Al ist groß; einige Autoren sprechen sogar opportunistisch von „Carbon Nanotubes als die Zukunft des Metalls“ oder bezeichnen CNT als „Post Silicon-Future“ in der Elektronik. Doch bis zu einem breiten Einsatz müssen die Präparationsverfahren noch optimiert werden, um definierte, lange und fehlerstellen-freie Röhren zu produzieren. Außerdem muss der Preis sinken und die Frage der Aufreinigung und der Implementierungen (müssen CNT funktionalisiert werden etc.) geklärt werden. Hinzu kommen die Bedenken der Giftigkeit.

4.41.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Wenn größere Mengen CNT auf den Markt und in Produkte gelangen, stellt sich die Frage nach Verwertungs- und Recyclingverfahren, bei denen CNT möglichst unvermischt anfallen (KÖHLER et al.

2008). Hier sind noch weitere Forschungsvorhaben von Industrie und Instituten nötig. Wie diese verlaufen, hängt auch stark von den weiteren Ergebnissen zur Toxizität von Nanoteilchen und CNT im Besonderen ab.

4.42 Additive Fertigung („3D-Drucker“)

4.42.1 Technologiebeschreibung

Additive Fertigung bezeichnet verschiedene Verfahren, bei denen ein Werkstoff schichtweise zu einem Bauteil zusammengefügt wird. Im Gegensatz dazu werden bei der subtraktiven Fertigung Bauteile durch Abtragen von Material aus einem massiven Körper hergestellt (z. B. durch Bohren, Stanzen oder Schneiden). Additive Fertigung eignet sich besonders zur Herstellung kleiner Stückzahlen und/oder kundenspezifisch angepasster Produkte (Mass Customization), Fertigung nach Bedarf (z. B. Pilotserie) bzw. vor Ort (z. B. kundennah), Fertigung von Ersatzteilen (z. B. älterer Serienprodukte), Rapid Prototyping (u. a. zur Verkürzung der Produktentwicklung) und zur Fertigung filigraner und geometrisch komplexer Strukturen (z. B. für den Leichtbau) (VDI 2014).

Additive Fertigung erfolgt grundsätzlich in folgenden Phasen:

Zunächst wird mit Hilfe von CAD ein dreidimensionales Modell des Bauteils erstellt (I), optional unterstützt durch 3D-Scannen eines vorhandenen Bauteils. Die Datenverarbeitung (II) umfasst die Auftrennung des Bauteils in übereinanderliegende Schichten („Slicen“), die Prozessvorbereitung und Parametereinstellung im Steuerrechner der Anlage. Beim eigentlichen additiven Prozess (III) wird das Bauteil durch Phasenübergang eines flüssigen oder pulverförmigen Materials in den festen Zustand gefertigt. In der Regel schließt sich eine Nachbearbeitung, z. B. Säuberung, Nachhärtung, Beschichtung, mechanische Nachbearbeitung, an (IV).

Folgende Verfahren kommen für den additiven Fertigungsprozess zum Einsatz (VDI 3404E, ASTM F2792-12a, ROLAND BERGER 2013):

Tab. 4.121 zeigt eine große Vielfalt an Verfahrensprinzipien und verarbeiteten Materialien. Metalle lassen sich mit Power Bed Fusion, Direct Energy Deposition, Binder Jetting oder Sheet Lamination additiv fertigen, darunter Werkzeugstahl, Edelstahl, Aluminium-Legierungen, Co-Cr-Legierungen, Nickel-Legierungen, Titan, Ti-6Al-4V, Gold, Silber; die Kunststoffe ABS, PC, ABS/PC

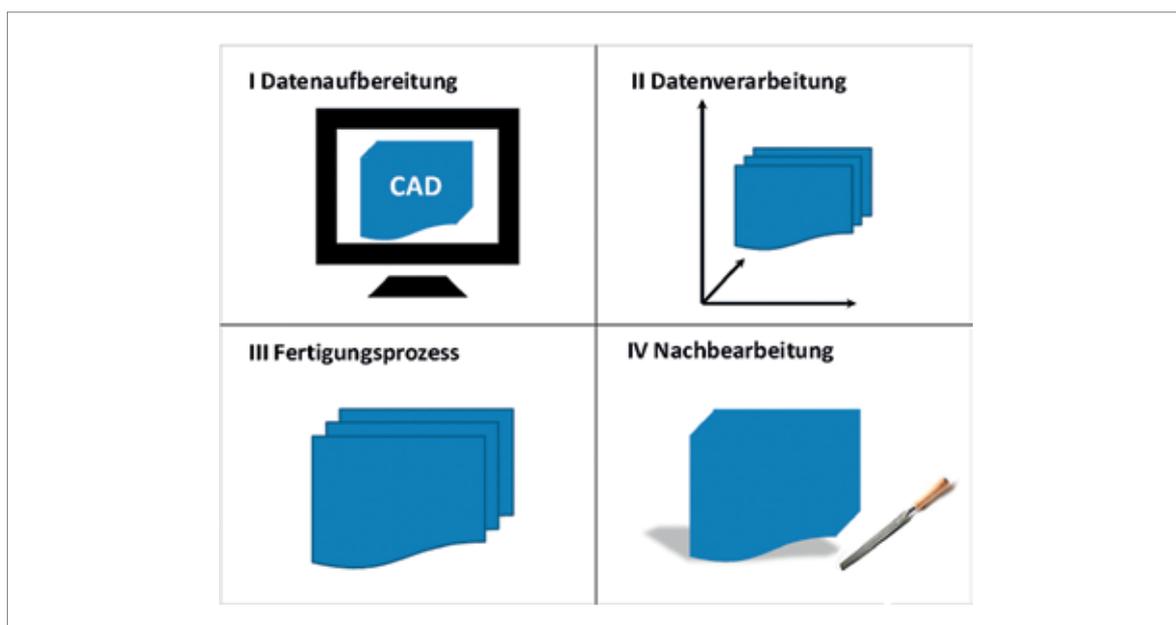


Abb. 4.120: Phasen der Additiven Fertigung
(Quelle: eigene Darstellung, basierend auf VDI 3404E)

Tab. 4.121: Charakteristika kommerziell verfügbarer Verfahren für Additive Fertigung

| Verfahren | Fertigungsprinzip | Ausgangsmaterial | Aktivierungsenergie | Markt |
|---|--|---|--|--------------------------------------|
| VAT Photopolymerisation ¹ | Lichthärtung eines flüssigen Photopolymers | Kunststoff, Keramik (flüssig/pastös) | UV-Strahlung von Lasern oder Lampen | Prototyping |
| Powder Bed Fusion (PBF) ² | Selektives Verschmelzen in einem Pulverbett | Metall, Kunststoff, Keramik (Pulver) | Wärmestrahlung von Laser und Strahlern | Prototyping, direktes Teil |
| Direct Energy Deposition (DED) ³ | Gezielte Verschweißung während des Auftrags | Metall (Pulver) | Wärmestrahlung von Laser und Strahlern | Direktes Teil, Reparatur |
| Material Extrusion ⁴ | Punktweiser Auftrag des geschmolzenen Materials | Kunststoff (Stränge, Fäden) | Wärmeleitung im Düsen-/Druckkopf | Prototyping |
| Binder Jetting („3D-Drucken“) | Selektives Verkleben durch punktweisen Binderauftrag | Metall, Kunststoff, Keramik (Pulver) | Keine (flüssiges Bindemittel) | Prototyping, Gussform, direktes Teil |
| Material Jetting ⁵ | Linienweiser Auftrag geschmolzenen Materials | Kunststoff (Wachs, flüssig, breiförmig) | Wärmeleitung in Druckköpfen | Prototyping, Gussmodelle |
| Sheet Lamination ⁶ | Ultraschallschweißen von Metallfolien/ Verkleben von Kunststoff/Papierfolien | Metall/Kunststoff, Papier (Folien) | Gezielte Strahlenquelle (Ultraschall)/ Wärmeleitung für Heißkleber | Prototyping, direktes Teil |

Anmerkungen:

¹ entspricht Stereolithographie (SL). Beim verwandten Digital Light Processing (DLP) für Kunststoffe ist der Laser durch eine UV-Lampe ersetzt;

² umfasst Laser-Sintern (LS) inkl. Selektives Laser-Sintern (SLS) sowie Strahlschmelzen von Metall inkl. Laser Forming, Selective Laser Melting (SLM), Laser-Cusing, Electron Beam Melting (EBM), Direktes-Metall-Laser-Sintern (DMLS). Beim verwandten Masken-Sintern (MS) ist der Laser durch eine IR-Lampe ersetzt;

³ entspricht Direct Metal Deposition (DMD);

⁴ entspricht Fused Layer Modeling (FLM) bzw. Fused Deposition Modeling (FDM);

⁵ umfasst Multi-Jet Modeling (MJM) und Poly-Jet Modeling (PJM), bei dem ein UV-Strahler gleichzeitig das Material aushärtet;

⁶ umfasst Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) sowie Layer Laminated Manufacturing (LLM) bzw. Laminated Object Manufacturing (LOM).

Blend, PLA, Polyetherimid und seit 2012 auch Nylon Co-Polymer lassen sich durch Material Extrusion verarbeiten, die Kunststoffe Acryl, Acrylat und Epoxy, ABS-ähnliche Kunststoffe durch VAT Photopolymerisation und Material Jetting sowie Polyamid 11 und 12 (Nylon), PS, PP, Polyester, Polyetheretherketon, thermoplastisches PUR und seit 2012 auch Nylon 6 durch Powder Bed Fusion (BOURELL 2014). Alle Verfahren verwenden zusätzlich eine Arbeitsplattform mit Hubtisch, einige zusätzlich Wischer, Stützkonstruktionen und Transporteinheiten für das Material.

In der öffentlichen Diskussion werden all diese Verfahren oft als „3D-Drucker“ bezeichnet; im engeren Sinne handelt es sich jedoch nur beim Binder-Jetting um 3D-Drucken. Für die Verarbeitung von Metallen sind vor allem die laserbasierten Powder Bed Fusion Verfahren relevant (ROLAND BERGER 2013), für die Verarbeitung von Kunststoffen eher Binder Jetting und Material Jetting sowie Materialextrusion.

Additive Fertigung von Kunststoff-, Metall- und Keramikbauteilen ist grundsätzlich Stand der Technik in der Industrie (VDI 2014). Treiber sind neben den verbesserten Funktionalitäten der Preisver-

fall für Geräte und Materialien (von 3,1 € pro cm³ Metall in 2013 auf 1,1 € pro cm³ Metall in 2023) und die Beschleunigung der Produktionsgeschwindigkeit von 10 cm³ pro Stunde auf 80 cm³ pro Stunde (SIEMENS 2014) sowie das Auslaufen des Patentschutzes für wichtige Verfahren. So beflügelte das Auslaufen des Fused Deposition Modeling (Materialextrusion) Patentes die Entwicklung des Open Source RepRap-Druckers. Im Juni 2014 ist ein wichtiges Patent für Selektives Laser Sintern (Powder Bed Fusion) ausgelaufen (DE BEER 2013).

Durch verbesserte Funktionalität und vereinfachte Handhabung beschäftigen sich zunehmend auch Bürgerinnen und Bürger sowie Entrepreneurinnen mit additiver Fertigung (VDI TZ/FRAUNHOFER ISI 2014). Additive Fertigung setzt substantielle Fertigkeiten in CAD voraus und erfordert beträchtliche Investitionen in Geräte, Materialien und Energie. Größere Druckaufträge werden aus Kostengründen wohl auch zukünftig überwiegend an kommerzielle Anbieter ausgelagert (LASETER & HUTCHINSON-KRUPAT 2013).

Hauptanwendungsgebiete für die additive Fertigung liegen in den Industriebranchen Kundennahe Produktion (z. B. Werkzeuge für die Elektronikindustrie), Automotive (v. a. Rapid Prototyping, Komponenten für Motorsport), Medizin (z. B. individualisierte Prothesen, Zahnersatz), Luft- und Raumfahrt (z. B. Leichtbau komplexer Bauteile, stationäre Turbinenbauteile) sowie Werkzeuge und Gussformen (z. B. Formeinsätze für Wechselwerkzeuge). Weitere Anwendungen finden sich in den Sektoren Militär, Architektur, Öl und Gas, Raumfahrt sowie bei individualisierten Objekten für Verbraucher wie Designgegenstände, Schmuck, Sammlerstücke (ROLAND BERGER 2013). Die Anwendungsbereiche in der Industrie diversifizieren sich weiter. So werden Anwendungen für das Drucken von Elektronik (z. B. Leiterplatten) und in der Medizin (z. B. Kunstgewebe) entwickelt (IDTECHEX 2015d).

Bürgerinnen und Bürger sowie Entrepreneurinnen verwenden häufig den preisgünstigen MakerBot oder den Open Source 3D-Drucker RepRap zu einem Preis von weniger als 500 Euro (3DGRENZENLOS 2015). RepRap wird vor allem für die Fertigung von Kunststoffteilen (ABS, PLA, HDPE, etc.) verwendet. Auch für die additive Fertigung von Metallteilen gibt es erste preisgünstige Open Source Entwicklungen (ANZALONE et al. 2013). RecycleBots können Kunststoffabfall (HDPE, PP) durch

Einschmelzen und Materialextrusion dezentral zu neuen Plastikprodukten verarbeiten (BAECHLER et al. 2013, KREIGER et al. 2014). Die Open Source Datenbank Thingiverse stellte der Maker-Community im August 2013 über 135.000 Designs für physische Objekte unentgeltlich zur Verfügung (KREIGER & PEARCE 2013).

Mit 1 % des Werkzeugmaschinenmarktes ist der Marktanteil von additiver Fertigung gering (ROLAND BERGER 2013). Das Angebot an additiven Fertigungsmaschinen wird von deutschen Herstellern dominiert, darunter EOS. Weitere Anbieter von Binder Jetting Systemen sind 3D-Systems und Voxeljet. Materialien und deren systemische Optimierung mit Geräten und Verfahren sind ein wichtiges Geschäftsfeld für die führenden Unternehmen und werden zukünftig wichtiger (UNIVERSITÄT PADERBORN 2014).

4.42.2 Rohstoffinhalt

Im Januar 2016 hat der Bundesverband der Deutschen Industrie ein Positionspapier zu den Implikationen des 3D-Drucks für die Rohstoffsicherung der deutschen Industrie veröffentlicht (BDI 2016). Die Einflüsse der additiven Fertigung auf den Rohstoffbedarf sind vielschichtig. Gemäß der in dieser Studie angewendeten Systematik werden der Rohstoffinhalt in den Maschinen und Geräten sowie der Rohstoffbedarf für die verarbeiteten Materialien, Hilfs- und Betriebsstoffe untersucht, auch wenn die indirekten und systemischen Effekte insgesamt vermutlich bedeutsamer sind. Positive Wirkungen sind u. a. abfallarme Produktion, Vermeidung gesundheitsgefährdender Schneidflüssigkeiten, Leichtbau, Ersatzteile zur Verlängerung der Nutzungsdauer, verringerter Transportsaufwand durch Vorort-Produktion, dezentrales Kunststoffrecycling. Negative Wirkungen sind u. a. hoher Energieaufwand pro Einheit, unklare Rezyklierbarkeit der Objekte, Mehrproduktion durch einfache Herstellung, Herstellung fehlerhafter Produkte oder „Crapjekts“ (vgl. IÖW 2014 und KREIGER & PEARCE 2014).

Der Energie- und Materialbedarf in der Fertigungsphase hängt von einer Reihe von technischen und morphologischen Spezifikationen der Bauteile, Maschinenparametern und Fertigungseinstellungen ab, insbesondere von der Schichtdicke, Geometrie, Positionierung und der Fertigungszeit

(BOURHIS et al. 2013, JUNK 2014). Zu einzelnen Anwendungsfällen liegen Ökobilanzen vor, die meist auf den Energieverbrauch in der Fertigungsphase fokussieren (vgl. Übersicht in BOURHIS et al. 2013).

Die stoffliche Zusammensetzung von Geräten kann aus Bill of Materials abgeschätzt werden, die für Open Source Produkte meist verfügbar sind (vgl. u. a. TRI D PRINTING 2016). Kommerzielle Hersteller halten ihre Bill of Materials meist unter Verschluss, weshalb dann eine Demontage durchgeführt werden muss (FALUDI et al. 2014). Veröffentlichte Angaben der Industrie sind oft lückenhaft und überwiegend hochaggregiert (vgl. u. a. EADS/EOS 2013).

Tab. 4.122 zeigt Auszüge aus der stofflichen Zusammensetzung eines Material-Extrusion Gerätes (FDM) und eines Material Jetting Gerätes (FALUDI et al. 2014). Hier sind nur die Materialanteile aufgeführt, die als spezifisch für additive Fertigung im Vergleich zu subtraktiver Fertigung angesehen werden können, nämlich die Druckköpfe und der Antriebsmotor für die Aufbringung und den Transport des Materials. Insgesamt sind keine Hinweise auf spezielle Materialien in Geräten zur additiven Fertigung ersichtlich.

Der Masseanteil dieser für die additive Fertigung charakteristischen Komponenten ist gering im Vergleich zu den Gesamtmassen der beiden Material Extrusion bzw. Material Jetting Geräte in Höhe von jeweils mehreren Hundert Kilogramm. Zum Vergleich: Der Makerbot 2 (Binder Jetting) für den Hausgebrauch wiegt etwa 11,5 kg (vgl. 3DRUCK.COM 2012).

Viele prominente Arbeiten zu den Umwelteffekten von additiver Fertigung (u. a. METEYER et al. 2014) liefern keine stofflichen Informationen zum Binde- und Reinigungsmittel bzw. quantitative Informationen zum jeweiligen Verbrauch. Für Binder Jetting liegt eine Master-Arbeit vor, die den Binde- und Reinigungsmittelverbrauch in der Fertigungsphase quantitativ ausweist (Xu et al. 2014). Basierend auf Angaben von ExOne aus dem Jahr 2012 ist das Bindemittel eine Mischung aus Ethylenglykolmonomethylether (Dichte: 0,96 g/cm³) und Ethylenglykol (Dichte: 1,11 g/cm³), das Reinigungsmittel ist Ethylenglykolmonobutylether (Dichte: 0,9 g/cm³). Der Verbrauch des Bindemittels hängt u. a. von der Dicke und Fläche der Schicht ab. Der Verbrauch des Reinigungsmittels hängt von der Zahl der Reinigungsintervalle und der spezifischen Reinigungszeit pro Drucken einer Schicht ab. Für die Herstellung eines Zylinders aus Pulver der Dichte 4,071 g/cm³ in 100 µm Schichten mit 140–196 g Gewicht gibt Xu (2014) den Bindemittelverbrauch mit 245–793 ml und den Reinigungsmittelverbrauch mit 204–717 ml an.

FALUDI et al. (2014) erwähnen als Hilfsmaterial für die Materialeextrusion ein Gemisch zu gleichen Anteilen aus Butylacrylat, Styren, Methylacrylat und für das Material-Jetting aus 30 % PP-Glykol, 30 % Ethylenglykol, 30 % Acrylsäure, 10 % Glycerin. ExOne bietet für den 3D-Druck von Objekten in Sand verschiedene Pulvermaterialien und Binder auf Furan-, Phenol- und Silikat-Basis sowie wässrige Bindemittel für direkt gedruckte Materialien an (vgl. EXONE 2016). EOS vertreibt Polymerwerkstoffe für das Laser-Sintern. Der Verbrauch an Bindemitteln scheint im Vergleich zum Verbrauch an Verarbeitungsmaterial kostenmäßig kaum ins Gewicht zu fallen (NIST 2014).

Tab. 4.122: Stoffliche Zusammensetzung eines Material Extrusion Gerätes (FDM) und eines Material Jetting Gerätes

| | Material Extrusion | | | Material Jetting | | |
|---------------|--------------------|-------|---------|------------------|-------|---------|
| | Material | Menge | Einheit | Material | Menge | Einheit |
| Druckköpfe | Stahl | 8,284 | kg | Stahl | 0,201 | kg |
| | PC | 0,124 | kg | Aluminium | 2,771 | kg |
| Antriebsmotor | Stahl | 4,595 | kg | Stahl | 4,595 | kg |
| | Kupfer | 0,912 | kg | Kupfer | 0,912 | kg |

Quelle und Anmerkungen: FALUDI et al. 2014;

Material Extrusion: Dimension 1200 BST FDM; Material Jetting: Objet Connex 350 Inkjet Machine

Bei Powder Bed Fusion werden für die Fertigung eines 3,32 kg schweren Bauteils aus Polyamid rund 340 m³ Druckluft (Ar/N₂ Gemisch), d. h. rund 20 m³ pro Stunde benötigt (Fertigungsdauer: 15 Stunden auf EOSINT P76020). Für die Fertigung eines 409 g schweren Bauteils aus X5CrNi18-10 wird ein Bedarf von 15,5 m³ Schutzgas (N₂), d. h. rund 3,5 m³/h angegeben (Fertigungsdauer: vier Stunden auf Concept Laser M3 Linear Machine (KELLENS et al. 2011). BOURHIS et al. (2013) erwähnen als Hilfs- und Betriebsstoffe destilliertes Wasser als Kühlmittel, und ein Ar/N₂-Gemisch als Schutz- und Transportgas.

RUFFO et al. (2006) nehmen für Powder Bed Fusion einen jährlichen Nutzungsgrad von 57 %, eine Abschreibungsdauer für die Maschine von acht Jahren und für Hard- und Software von fünf Jahren an. FALUDI et al. (2014) gibt die Lebensdauer der Material Extrusion und der Material Jetting Maschine mit jeweils fünf Jahren an. CUBOYO (2013) setzt die Nutzungsdauer eines 3D-Druckers ebenfalls mit fünf Jahren an, wobei 50 Objekte pro Drucker und Jahr gedruckt werden. Dagegen schätzen WITTBRODT et al. (2014), dass eine Familie mit einem RepRap um die 20 Haushaltsprodukte pro Jahr druckt (entsprechend ca. 0,02 % der verfügbaren Produkte).

4.42.3 Foresight industrielle Nutzung

Aktuelle Studien zum globalen Markt für additive Fertigung projizieren hohe jährliche globale Wachstumsraten. Rechnet man die Angaben von WOHLER'S ASSOCIATES (2014) für 2013 bis 2020 auf eine jährliche Wachstumsrate um, so erhält man 32 %. Analoge Betrachtungen zu ROLAND BERGER (2013) für 2012 bis 2023 ergeben eine jährliche Wachstumsrate von 15 %, nach CANALYS (2015) für 2014 bis 2019 würde sie 44 % betragen. 10 % des Wertes entfallen auf additive Fertigung von Metallen. Hinsichtlich der Stückzahlen an verkauften Geräten zur additiven Fertigung nennt WELLS FARGO (2014) für 2012 ca. 38.000 Stück und für 2017 ca. 1.070.000 Stück, was einer jährlichen Wachstumsrate von 95 % entspricht. Die Marktanteile betragen 2017 für Enterprise 23 %, für Consumer 77 %.

Für die langfristige Entwicklung liegen wenige quantitative Szenarien vor. Gemäß STRATEGY ANALYTICS (2014) besitzen zukünftig mehr als 50 % der Haushalte in den USA und Westeuropa einen 3D-Drucker. MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE (2012) nehmen an, dass im Jahr 2025 rund 30 bis 50 % der personalisierten Produkte bzw. Produkte mit niedrigen Volumina durch additive Fertigung hergestellt werden. In den USA glauben gemäß einer Untersuchung (PwC 2014) über die Hälfte

Tab. 4.123: Foresight Nutzung für additive Fertigung (jährlich verkaufte Stückzahlen)

| | Stückzahl 2013 | Stückzahl 2020 | Stückzahl 2025 | Stückzahl 2030 | Stückzahl 2035 |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Industrie | | | | | |
| Projektion A | 15.000 | 256.000 | 515.000 | 829.000 | 1.058.000 |
| Projektion B | 15.000 | 1.920.000 | 5.859.000 | 9.436.000 | 12.043.000 |
| Projektion C | 15.000 | 754.000 | 1.876.000 | 3.021.000 | 3.856.000 |
| Haushalte | | | | | |
| Projektion A | 35.000 | 598.000 | 1.203.000 | 1.937.000 | 2.472.000 |
| Projektion B | 35.000 | 4.480.000 | 13.672.000 | 22.019.000 | 28.102.000 |
| Projektion C | 35.000 | 1.759.000 | 4.377.000 | 7.049.000 | 8.997.000 |
| Gesamt | | | | | |
| Projektion A | 50.000 | 854.000 | 1.718.000 | 2.766.000 | 3.530.000 |
| Projektion B | 50.000 | 6.400.000 | 19.531.000 | 31.455.000 | 40.145.000 |
| Projektion C | 50.000 | 2.513.000 | 6.253.000 | 10.070.000 | 12.853.000 |

Anmerkungen: CAGR der Projektionen A/B/C für Industrie und Haushalte 50 %/100 %/75 % (2014–2020), 15 %/25 %/20 % (2021–2025), 10 % (2026–2030) und 5 % (2031–2035)

der Befragten, dass in den nächsten drei – fünf Jahren über 50 % der Hersteller in den USA additive Fertigung einführen werden. Mittelfristig werden die USA den Markt der industriellen additiven Fertigung weiter dominieren. Danach werden die Wachstumsraten abnehmen und erste Ersatzkäufe stattfinden. Gleichzeitig werden andere Länder aufholen. Je nachdem, ob sich nur das Prototyping weit verbreitet, oder auch die direkte Bauteilfertigung vor Ort, sind unterschiedliche Projektionen denkbar. Es wird erwartet, dass die Märkte der additiven Fertigung für metallische Werkstoffe mittelfristig stärker wachsen, als die für Kunststoffe, da die Kosteneinsparpotenziale dort vermutlich noch größer sind.

Für den Bereich der privaten Haushalte sind unterschiedliche Projektionen denkbar, je nachdem, ob sich eine Desk-Lösung (vergleichbar dem Papier-Drucker) in einer hohen Haushaltsausstattungsrate ausdrückt oder eher eine Job-Shop-Lösung (ähnlich wie ein Copy-Shop). Es wird erwartet, dass der Desk-Markt vor allem im Bereich der Kunststoffbauteile wächst, wohingegen der Job-Shop-Markt ebenso den Bedarf nach dezentraler metallischer wie kunststofflicher Produktion decken wird.

Die Projektionen A und B weisen eine große Bandbreite auf, weshalb die mittlere Projektion C als realistischste Projektion formuliert worden ist.

Der größte Markt für die additive Fertigung nach Stückzahlen wird 2035 im haushaltsnahen Bereich angenommen. In Projektion B befinden sich 2035 rund 128.000 Mio. Geräte im Haushaltsbestand bei fünf Jahren Lebensdauer (ca. 28 Mio. Verkäufe). Zum Vergleich. In den USA soll es 2030

150 ± 3,2 Mio. und in der EU 240,8 Mio. Haushalte geben. Bei einer Ausstattungsrate von jeweils 25 % in den USA (37,5 Mio.) und Europa (60,25 Mio.) entfallen auf den Rest der Welt weitere 30 Millionen 3D-Drucker im Haushaltsbereich. In der realistischsten Projektion C entfallen 2035 ca. 4 Mio. jährlich verkaufte additive Fertigungsmaschinen auf die Industrie und ca. 9 Mio. auf die Haushalte.

4.42.4 Foresight Rohstoffbedarf

Angesichts der Vielzahl an additiven Fertigungsverfahren, verarbeiteten Materialien, unsicheren Zukunftsentwicklungen und vielschichtigen Effekten auf die Rohstoffnachfrage kann eine Abschätzung des direkten Rohstoffbedarfs in dieser Studie nur illustrativ und nicht prognostizierend sein. Grundsätzlich stehen für die additive Fertigung verschiedene Verfahren zur Verfügung, so dass vermutlich zukünftig durch Verfahrenswechsel auf ausreichend unkritische Materialien ausgewichen werden kann.

Sowohl für die Material Extrusion als auch für das Material Jetting geben FALUDI et al. (2014) einen Kupferbedarf von 0,912 kg für den elektrischen Antrieb an. Setzt man diese Kupfermenge für die industriell verwendeten Geräte an und 0,3 kg für die kleineren in Haushalten verwendeten Geräte, so lässt sich daraus aus dem Mengengerüst für 2035 die Kupfernachfrage abschätzen. Angenommen wird, dass 80 % aller additiven Fertigungsgeräte über einen solchen Elektromotor verfügen.

Nimmt man an, dass pro Haushalt ca. 20 Objekte und pro Industriedrucker ca. 100 Objekte pro Jahr mit 150 g Gewicht per Binder Jetting gedruckt

Tab. 4.124: Globale Produktion und Rohstoffbedarf (Quelle: BGR 2015b) für Additive Fertigung in t

| Rohstoff | Produktion 2013 | Verbrauch 2013 | Bedarfsvorschau 2035 |
|---|----------------------------------|----------------|----------------------|
| Kupfer für Elektromotoren | 18.365.341 (B) 21.446.333 (R) | 45,6 | 3.320–36.600 |
| Ethylenglykolmonomethylether/ Ethylenglykol Gemisch als Bindemittel | n. b. | n. b. | 42.400–482.000 |
| Ethylenglykolmonobutylether als Reinigungsmittel | n. b. | n. b. | 31.800–361.000 |

B: Bergwerksförderung

R: Raffinadeproduktion

werden, so kann daraus der Bindemittel- und Reinigungsmittelbedarf für 2035 errechnet werden. Angenommen wird, dass 20 % aller additiven Fertigungsgeräte Binder-Jetting Geräte sind.

Gemäß obiger Tabelle wird der Nachfrageimpuls für Kupfer in Elektromotoren durch additive Fertigung vernachlässigbar, in der realistischsten Projektion bei 9.380 Tonnen pro Jahr, sein. Von den sieben Grundverfahren liegen nur Rohstoffinhaltsdaten für zwei Grundverfahren vor. Zwar wird hier mit Kupfer in Elektromotoren für diese zwei Verfahren nur ein geringer Anteil der Gerätemasse erfasst (es dominieren Stahl, Kunststoffe, etc.); es sind jedoch keine weiteren spezifischen Materialbedarfe ersichtlich. Der Materialbedarf für die Laser in VAT Photopolymerisation, Direct Energy Deposition und Powder Bed Fusion ist in Kapitel 4.32 mit erfasst.

Zum Materialbedarf in der Fertigungsphase gibt es nur wenige Angaben. Die realistischste Projektion für den Bindemittelverbrauch 2035 ergibt 154.000 t und für den Reinigungsmittelverbrauch 116.000 t. Diese müssten in Beziehung zur Jahresproduktion an Ethylenglykolmonomethylether/Ethylenglykol Gemisch bzw. Ethylenglykolmonobutylether gesetzt werden, wofür jedoch keine verlässlichen Angaben vorliegen.

Insgesamt handelt es sich bei additiver Fertigung um eine Systeminnovation, bei der bekannte Komponenten zu einem neuen Fertigungsprinzip kombiniert werden. Nur wenige Studien enthalten Informationen zum Verbrauch von Materialien in der Fertigungsphase oder zur materiellen Beschaffenheit der Fertigungsgeräte. Die Verschiebung an Marktanteilen der einzelnen additiven Fertigungsverfahren ist unsicher. Die indirekten und systemischen Effekte der additiven Fertigung übersteigen die direkten Effekte vermutlich um Größenordnungen.

4.42.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Die Angaben zu den Ausbeuten und zur Rezyklierbarkeit der Produktionsabfälle bei additiver Fertigung variieren in der Literatur stark.

Bei Powder Bed Fusion beträgt der Materialüberschuss am Beispiel von Polyamid etwa 45 %,

wovon rund 50 % recycelt werden kann. In der Literatur wird für EOSINT P 390 eine Bandbreite von 30–60 % Abfall (Verhältnis von pulverförmigen Ausgangsmaterial zu nutzbarem Bauteil) beschrieben (IÖW 2014). Insgesamt entstehen am Beispiel von X5CrNi18-10 rund 204 g Abfall (Produktionsstaub, Post-Processing) pro kg Bauteil, wovon 3,8 g entsorgt werden müssen (KELLENS et al. 2011). BOURHIS et al. (2013) geben bei der Herstellung einer Wand aus Stahl mit den Abmessungen von 100*12*50mm³ den Materialbedarf mit 1,39–1,56 kg an, was bei einer Dichte von 7,86 g/cm³ einen Überschuss von ca. 1 kg für die 0,47 kg schwere Wand bedeutet.

Metallische Abfälle sind in der Regel recycelbar (METEYER et al. 2014, KELLENS et al. 2011, BOURHIS et al. 2013), während ABS-Abfälle als nicht recycelbar (FALUDI et al. 2014) bzw. Polyamid als nur eingeschränkt recycelbar (KELLENS et al. 2011, RUFFO et al. 2006) eingestuft werden. Die Recyclingraten von Polyamid liegen bei 50–67 %.

Die Verfahren der additiven Fertigung sind in hohem Maße untereinander substituierbar.

5 Rohstoffsynopsen

5.1 Gallium

Gallium ist ein Element der dritten Hauptgruppe, der Borgruppe des Periodensystems der Elemente. Es steht direkt unter Aluminium.

5.1.1 Eigenschaften

Festes Gallium ist ein weißes, leicht blaugrau glänzendes Metall. Gallium von großer Reinheit hat eine silbrig-weiße Farbe. Es ist bei Raumtemperatur ein Feststoff, schmilzt aber schon bei 29,8 °C. Durch den mit 2.403 °C sehr hohen Siedepunkt hat Gallium das größte Flüssigkeitsintervall aller Metalle, was für den Bau von Spezialthermometern genutzt wird (QUADBECK-SEEGER 2007).

Tab. 5.1: Eigenschaften von Gallium

| | |
|---------------------------|---------------------------|
| Dichte | 5,9 g/cm ³ |
| Schmelzpunkt | 29,8 °C |
| Elektrische Leitfähigkeit | 7,1 · 10 ⁶ S/m |
| Wärmeleitfähigkeit | 29 W/(m · K) |

5.1.2 Produktion und Vorkommen

Gallium liegt in einer Vielzahl von Mineralen als Spurenelement vor. Das Mineral mit dem höchsten Galliumanteil von max. 35,3 % ist der sehr seltene Gallit, ein Kupfer-Gallium-Sulfid (CuGaS₂); auch der westafrikanische Germanit führt 0,1–1 % Gallium (RÖMPP o. J.). Wegen seiner chemischen Verwandtschaft mit Aluminium ist Gallium vor allem in Aluminiummineralen angereichert. Wichtigstes Primärerz ist daher das Aluminiumerz Bauxit (durchschnittliche Galliumgehalte 25–100 ppm). Bei der Gewinnung von Aluminium fällt Gallium als Nebenprodukt an. In wirtschaftlich relevanten Gehalten findet sich Gallium in der Natur zudem noch in Zinkerzen (z. B. Sphalerit), so dass es aus Rückständen, die in Zinkhütten anfallen, gewonnen werden kann. Auch Flugaschen können Spuren von Gallium enthalten.

Genauere Daten zur Produktion von Gallium sind nicht verfügbar, da die wenigen Hersteller ihre Daten vertraulich behandeln. Die hier angeführten Angaben über Galliumressourcen basieren auf dem durchschnittlichen Anteil von Gallium in Bauxit und in Zinkerzen (ca. 50 ppm). Die Bauxitressourcen sind sehr groß. Nur ein geringer Teil der Galliumgehalte in Bauxit und Zinkerzen ist jedoch nutzbar und die Gewinnungsraten sind vertraulich. Damit ist eine Schätzung der derzeitigen Galliumreserven nicht möglich (vergleiche Tab. 5.2).

Tab. 5.2: Versorgungssituation bei Gallium 2006, 2010 und 2013
(Quellen: BGR 2015b, USGS 2007a, 2011b, 2012b, 2014b, 2015a)

| | 2006 | 2010 | 2013 |
|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Primärproduktion [t Inh.] | 69 | 182 | 350 |
| Raffinadeproduktion [t Inh.] | 99 | 164 | 200 |
| Reserven [t Inh.] | – | – | – |
| Ressourcen [t Inh.] | > 1.000.000 | > 1.000.000 | > 1.000.000 |
| Größte Bergbauländer | – | – | – |
| Größte Raffinadeländer | – | – | – |
| Länderkonzentration Bergbau | – | – | – |
| Länderkonzentration Raffination | – | – | – |
| Gewichtetes Länderrisiko Bergbau | – | – | – |
| Gewichtetes Länderrisiko Raffination | – | – | – |
| Preis ¹ [US\$/kg] | 312,92 | 469,15 | 279,41 |

¹ min. 99,99 % fob China

5.1.3 Verwendungen

Die wichtigsten Verwendungen von Gallium weltweit sind in Tab. 5.3 dargestellt (EUROPEAN COMMISSION 2014a).

Tab. 5.3: Weltweite Verwendung von Gallium
(Quelle: EUROPEAN COMMISSION 2014a)

| Anwendungsbereich | 2010 [%] |
|---------------------------------|------------|
| Integrierte Schaltungen | 41 |
| LED | 25 |
| Legierungen, Batterien, Magnete | 17 |
| Solartechnologien | 17 |
| | 100 |

Zukunftstechnologien

Die wichtigsten galliumhaltigen Zukunftstechnologien mit hohen Wachstumspotenzialen sind:

- Weiße LED,
- Hochleistungs-Mikrochips.

5.1.4 Galliumbedarf 2035

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 5.4 geschätzt

worden. Der Bedarf für das untersuchte Segment der Zukunftstechnologien lag im Jahr 2013 bei ca. 25 % der Primärproduktion von Gallium. Während der Bedarf für die Dünnschicht-Photovoltaik bis zum Jahr 2035 zurückgehen wird, wird die Menge Gallium, die für die untersuchten Zukunftstechnologien im Jahr 2035 benötigt wird, auf ca. 37 % der Primärproduktion des Jahres 2013 anwachsen.

Tab. 5.4: Galliumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

| Technologie | Bedarf 2013 | Bedarf 2035 |
|--|-------------|-------------|
| Weißer LED | 6 | 19 |
| Hochleistungs-Mikrochips | 38 | 86 |
| Dünnschicht-Photovoltaik | 45 | 25 |
| Bedarfssumme | 89 | 130 |
| Bedarf/Primärproduktion 2013 | 25 % | 37 % |
| Bedarf/Raffinadeproduktion 2013 | 45 % | 65 % |

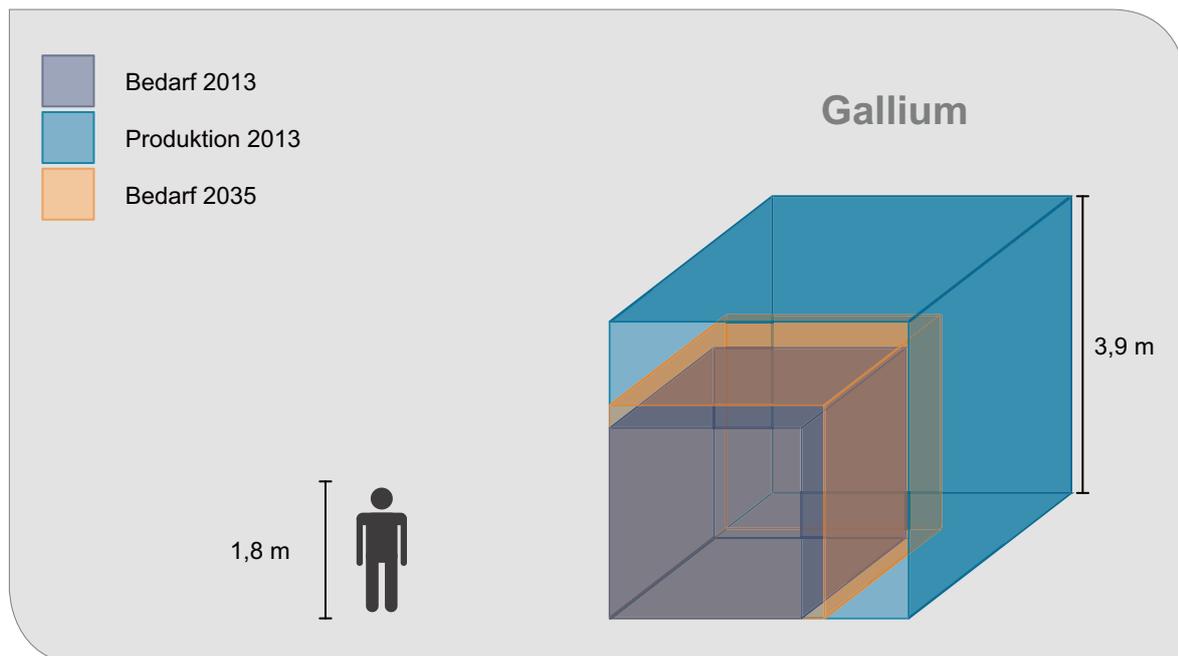


Abb. 5.1: Primärproduktion 2013 und Bedarf von Gallium für Zukunftstechnologien 2013 und 2035

5.2 Germanium

Germanium steht im Periodensystem in der vierten Hauptgruppe (Kohlenstoffgruppe) unterhalb von Silizium.

5.2.1 Eigenschaften

Germanium ist ein Halbmetall mit grauweißer, metallisch glänzender Farbe und ein Halbleiterelement. Es ist für Infrarotlicht durchlässig, weshalb kristallines Germanium bzw. Germaniumoxid-Gläser in Optiken für Nachtsichtgeräte, Wärmebildkameras u. ä. eingesetzt werden.

Tab. 5.5: Eigenschaften von Germanium

| | |
|---------------------------|-------------------------|
| Dichte | 5,3 g/cm ³ |
| Schmelzpunkt | 938,3 °C |
| Elektrische Leitfähigkeit | 2 · 10 ³ S/m |
| Wärmeleitfähigkeit | 60 W/(m · K) |

5.2.2 Produktion und Vorkommen

Germanium ist dispers in der Erdkruste verteilt. Seine mittlere Krustenhäufigkeit ist sehr niedrig und seine dem Silizium ähnliche geochemische Stellung bedingt eine Affinität zu siliziumreichen Gesteinen. Anreicherungen finden sich in Zink-Blei-Kupfer-Sulfidlagerstätten sowie in Kohlen und Ligniten, dort gebunden an die organische Substanz. Daher enthalten Flugaschen aus der Kohleverbrennung ebenfalls teilweise wirtschaftlich interessante Germaniumkonzentrationen (ELSNER et al. 2010). Germanium wird als Koppelprodukt bei der Produktion anderer Metalle, wie beispielsweise Zink oder Kupfer, gewonnen (WINNACKER & KÜCHLER 2006).

Genaue Daten zur Produktion von Germanium sind nicht verfügbar, da die wenigen Hersteller ihre Daten vertraulich behandeln. Während China 2006 noch einen Anteil von über 90 % an der Raffinadeproduktion hatte, ist dieser 2013 auf unter 70 % zurück gegangen (Tab. 5.6).

Tab. 5.6: Versorgungssituation bei Germanium 2006, 2010 und 2013
(Quellen: DERA 2014, BGR 2015b)

| | 2006 | 2010 | 2013 |
|---|------------------------------------|---|---|
| Bergwerksförderung [t Inh.] | – | – | – |
| Raffinadeproduktion [t Inh.] | 107 | 129 | 145 |
| Reserven [t Inh.] | – | – | – |
| Ressourcen [t Inh.] | – | – | – |
| Größte Bergbauländer | – | – | – |
| Größte Raffinadeländer | China 93 % USA 5 % Japan 2 % | China 62 % Kanada 19 % Finnland 9 % | China 68 % Kanada 14 % ³ Finnland 12 % |
| Länderkonzentration Bergbau | – | – | – |
| Länderkonzentration Raffination ¹ | 8.760 | 4.365 | 4.914 |
| Gewichtetes Länderrisiko Bergbau | – | – | – |
| Gewichtetes Länderrisiko Raffination ¹ | –0,44 | 0,18 | 0,09 |
| Preis ² [US\$/kg] | 536,77 | 640,23 | 1.313,54 |

¹ zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter GLR,

² Germaniumdioxid, min. 99,99 %, MB free market, in warehouse,

³ Wert für Kanada geschätzt

Tab. 5.7: Weltweite Verwendung von Germanium (Quelle: USGS 2014c)

| Anwendungsbereich | 2013 [%] |
|---|------------|
| Infraroptik | 30 |
| Glasfasern | 20 |
| Polymerisations-Katalysator | 20 |
| Elektronik und Solaranwendungen | 15 |
| Andere Anwendungen (u. a. Leuchtmittel, Metallurgie, Chemotherapie) | 15 |
| | 100 |

5.2.3 Verwendungen

Die Tab. 5.7 stellt die vom USGS (2014c) angegebene weltweite Verwendung von Germanium im Jahr 2013 dar.

Zukunftstechnologien

Die wichtigste germaniumhaltige Zukunftstechnologie mit hohem Wachstumspotenzial ist nach derzeitigem Kenntnisstand:

- Glasfaserkabel.

5.2.4 Germaniumbedarf 2035

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 5.8 geschätzt worden. Für Germanium ist die wichtigste Zukunftstechnologie der Einsatz in Glasfaserkabel, deren Bedarf lag im Jahr 2013 nach MERCHANT RESEARCH & CONSULTING Ltd (2014) bei 39 % der Raffinadeproduktion und damit höher als die USGS-Angaben in Tab. 5.7.

Für das Jahr 2035 wird der Bedarf für Glasfaserkabel auf 81 % der Raffinadeproduktion des Jahres 2013 geschätzt.

Tab. 5.8: Germaniumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

| Technologie | Bedarf 2013 | Bedarf 2035 |
|--|-------------|-------------|
| Glasfaserkabel | 56 | 118 |
| Bedarfssumme | 56 | 118 |
| Bedarf/Raffinadeproduktion 2013 | 39 % | 81 % |



Abb. 5.2: Produktion 2013 und Bedarf von Germanium für Zukunftstechnologien 2013 und 2035

5.3 Indium

Indium steht im Periodensystem der Elemente in der dritten Hauptgruppe, der Borgruppe, unter dem Element Gallium.

5.3.1 Eigenschaften

Indium ist ein silbrig-weißes und sehr weiches Metall. Es besitzt eine hohe Duktilität und leichte Kaltformbarkeit. Als Legierungsbestandteil steigert Indium bereits in geringen Konzentrationen die Härte und die Korrosionsbeständigkeit (QUADBECK-SEEGER 2007). Indium benetzt Glas und bildet bei gleich guten Reflexionseigenschaften eine korrosionsresistentere Spiegeloberfläche als Silber.

Tab. 5.9: Eigenschaften von Indium

| | |
|---------------------------|----------------------------|
| Dichte | 7,31 g/cm ³ |
| Schmelzpunkt | 156,6 °C |
| Elektrische Leitfähigkeit | 12,5 · 10 ⁶ S/m |
| Wärmeleitfähigkeit | 81,6 W/(m · K) |

5.3.2 Produktion und Vorkommen

Die Konzentration von Indium in der kontinentalen Erdkruste ist mit 0,05 ppm sehr gering, aber höher als die von Silber. Indium findet sich vor allem in polymetallischen Erzen vergesellschaftet mit den Buntmetallen Blei, Zink, Kupfer und Zinn. Der Anteil von Indium in solchen Erzen liegt bei 1–50 ppm. Selbst in einem Zinkkonzentrat, der häufigsten kommerziellen Indiumquelle, ist der Indiumanteil mit 70–200 ppm relativ gering. Außer in sulfidischen Zinkerzen findet sich Indium vor allem in Kupfer- und Zinnerzen. Gedeigene Indium- und Indium-Mineralen wie Indit (FeIn₂S₄) und Roquesit (CuInS₂) sind selten.

Indium wird als Beiprodukt gewonnen. Nahezu die gesamte weltweite Indiumproduktion stammt aus Aufbereitungs- und Verhüttungsresten der Zinkgewinnung sowie dem Recycling von Stäuben und Gasen, die beim Schmelzen von Zink entstehen. Der übrige Anteil, unter 5 %, entfällt auf Reste der Zinn- und Kupferaufbereitung.

Insgesamt sind die Angaben zur Versorgungssituation bei Indium aufgrund des kleinen Marktes unsicher (Tab. 5.10).

Tab. 5.10: Versorgungssituation bei Indium 2006, 2010 und 2013
(Quelle: DERA 2014, BGR 2015b, USGS 2007b, 2011c, 2014d)

| | 2006 | 2010 | 2013 |
|---|---|---|--|
| Bergwerksförderung [t Inh.] | – | – | – |
| Raffinadeproduktion [t Inh.] | 638 | 669 | 790 |
| Reserven [t Inh.] | – | – | – |
| Ressourcen [t Inh.] | – | – | – |
| Größte Bergbauländer | – | – | – |
| Größte Raffinadeländer | China 63 % Rep. Korea 9 % Japan 9 % | China 49 % Rep. Korea 22 % Japan 10 % | China 53 % Rep. Korea 19 % Japan 9 % |
| Länderkonzentration Bergbau | – | – | – |
| Länderkonzentration Raffination ¹ | 4.192 | 3.140 | 3.314 |
| Gewichtetes Länderrisiko Bergbau | – | – | – |
| Gewichtetes Länderrisiko Raffination ¹ | 0,05 | 0,25 | 0,19 |
| Preis ² [US\$/kg] | 823,89 | 567,26 | 613,33 |

¹ zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter GLR,

² Indium-Ingots, min. 99,97%, MB free market, in warehouse

5.3.3 Verwendungen

Typische Indium-Anwendungen sind Verbindungen von hochreinen Niedrigtemperaturlegierungen, Weichlote und Dünnschichten. Das wichtigste Einsatzgebiet sind Dünnschichten von Indium-Zinn-Oxiden (ITO) in Flüssigkristallanzeigen (LCD) bzw. Flachbildschirmen, die in der Unterhaltungselektronik (Mobiltelefone, Notebooks, Monitore, Fernseher, Digitalkameras etc.)

Tab. 5.11: Weltweite Verwendung von Indium
(Quelle: OAKDENE HOLLINS RESEARCH & CONSULTING 2015)

| Anwendungsbereich | 2013 [%] |
|----------------------|------------|
| Flachbildschirme | 55 |
| Legierungen und Lote | 10 |
| Photovoltaik | 8 |
| Wärmeleitmaterialien | 6 |
| Batterien | 5 |
| Legierungen | 4 |
| Halbleiter | 3 |
| Andere | 9 |
| | 100 |

eingesetzt werden (vgl. Tab. 5.11). Einige Angaben in der Literatur schätzen den Anteil des verwendeten Indiums zur Produktion von Indium-Zinn-Oxiden auf ca. 80 % der Gesamtmenge. Dieser Wert ist sehr hoch, weil hier neben der Menge an Indium in den Produkten auch der bei der Herstellung eingesetzte und z. B. beim Sputterprozess verloren gehende Anteil angegeben wird (vergleiche Kapitel 4.10.4).

Zukunftstechnologien

Die wichtigsten indiumhaltigen Zukunftstechnologien mit hohen Wachstumspotenzialen sind:

- Indium-Zinn-Oxid (ITO) in der Displaytechnik,
- Dünnschicht-Photovoltaik.

5.3.4 Indiumbedarf 2035

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 5.12 geschätzt worden. Der größte Indiumbedarf besteht bei der Displaytechnik. Das untersuchte Segment der Zukunftstechnologien benötigte im Jahr 2013 rund ein Drittel der Raffinadeproduktion.

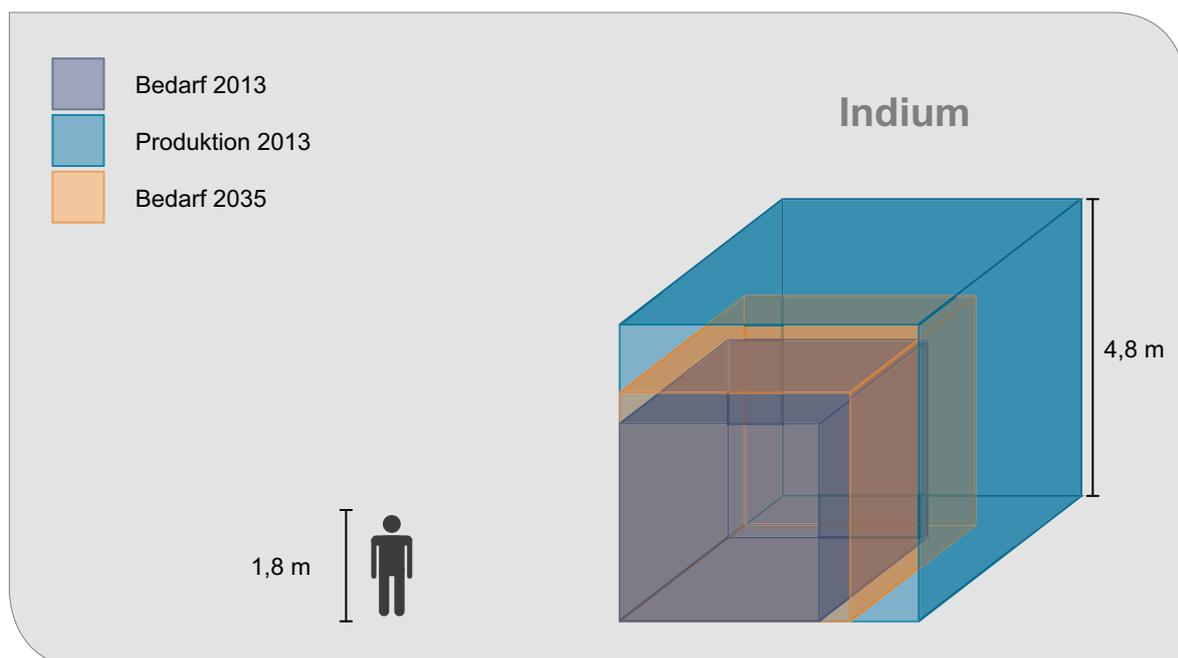


Abb. 5.3: Produktion 2013 und Bedarf von Indium für Zukunftstechnologien 2013 und 2035

Diese Menge wird sich bis 2035, bezogen auf die Raffinadeproduktion 2013, auf 45 % erhöhen.

Tab. 5.12: Indiumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

| Technologie | Bedarf 2013 | Bedarf 2035 |
|--|-------------|-------------|
| Indium-Zinn-Oxid (ITO) in der Displaytechnik | 130 | 274 |
| Weißer LED | 0,1 | 0,3 |
| Dünnschicht-Photovoltaik | 103 | 87 |
| Bedarfssumme | 233 | 361 |
| Bedarf/Raffinadeproduktion 2013 | 29 % | 45 % |

5.4 Kobalt

Kobalt ist ein ferromagnetisches Übergangsmetall und steht in der Cobaltgruppe (9. Gruppe) des Periodensystems vor Rhodium und Iridium.

5.4.1 Eigenschaften

Kobalt ist ein hartes, besonders zähes Metall und wird in besonders belastbaren Eisenlegierungen eingesetzt, wie beispielsweise Rasierklingen, Bohrer und Werkzeuge. Kobalt ist ferromagnetisch und damit zur Herstellung von Dauermagneten geeignet, wie z. B. für SmCo-Magnete (QUADBECK-SEEGER 2007). Unter den Kobaltverbindungen ist Lithium-Kobaltdioxid als Kathodenmaterial für Lithiumionen-Batterien bedeutsam, weil sich in dessen Schichtstruktur sehr gut Lithium einlagern kann, was zu hohen Energiedichten dieser Kathodensysteme führt (TRUEBB & RÜETSCHI 1998).

Tab. 5.13: Eigenschaften von Kobalt

| | |
|---------------------------|----------------------------|
| Dichte | 8,89 g/cm ³ |
| Schmelzpunkt | 1.495 °C |
| Elektrische Leitfähigkeit | 16,7 · 10 ⁶ S/m |
| Wärmeleitfähigkeit | 100 W/(m · K) |

5.4.2 Produktion und Vorkommen

Die wichtigsten Kobaltminerale für die bergbauliche Gewinnung von Kobalt sind Sulfide (z. B.

Tab. 5.14: Versorgungssituation bei Kobalt 2006, 2010 und 2013
(Quelle: BGR 2015b, DERA 2014)

| | 2006 | 2010 | 2013 |
|---|--|---------------------------------------|--|
| Bergwerksförderung [t Inh.] | 65.410 | 140.516 | 129.763 |
| Raffinadeproduktion [t Inh.] | 53.406 | 79.465 | 85.904 |
| Reserven [t Inh.] | 6.921.100 | 7.302.000 | 7.203.000 |
| Größte Bergbauländer | DR Kongo 41 %, Kanada 11 %, Kuba 9 % | DR Kongo 70 %, China 5 %, Sambia 4 % | DR Kongo 59 %, China 6 %, Australien 5 % |
| Größte Raffinadeländer | China 24 %, Finnland 16 %, Kanada 10 % | China 45 %, Finnland 12 %, Sambia 6 % | China 42 %, Finnland 12 %, Kanada 6 % |
| Länderkonzentration Bergbau ¹ | 2.166 | 4.931 | 3.654 |
| Länderkonzentration Raffination | 1.253 | 2.368 | 2.216 |
| Gewichtetes Länderrisiko Bergbau ¹ | -0,56 | -1,16 | -0,89 |
| Gewichtetes Länderrisiko Raffination | 0,55 | 0,15 | 0,30 |
| Preis ² [US\$/kg] | 35,99 | 45,33 | 29,01 |

¹ zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter GLR,

² high Grade (min. 99,8 %), MB free market, in warehouse

Cobaltin bzw. Kobaltglanz CoAsS und Carrolit $\text{Cu}(\text{Co}, \text{Ni})_2\text{S}_4$, Arsenide (z. B. Skutterudit CoAs_3) und Oxide sowie Hydroxide (wie der Heterogenit $\text{CoO} \cdot \text{OH}$). Von wirtschaftlicher Bedeutung ist, dass in zahlreichen Sulfiden geringe Mengen von Kobalt eingebaut sind. Kobalt wird überwiegend als Nebenprodukt aus Nickel- und Kupfererzen gewonnen, die wechselnde Mengen Kobalt enthalten. So fällt bei der Nickelgewinnung aus Laterit-Lagerstätten Kobalt an. Schichtgebundene Kupferlagerstätten in der DR Kongo und Sambia führen ebenfalls bedeutende Mengen Kobalt. Größere Lagerstätten gibt es auch in Australien, Russland, Kuba, Neukaledonien und Kanada; auch die marinen Manganknollen und -krusten enthalten bis zu 1 % Kobalt und bilden eine geschätzte Kobaltressource von 6 Mrd. Tonnen (RÖMPP o. J.). Das wichtigste Förderland von Kobalt ist die DR Kongo (Tab. 5.14).

5.4.3 Verwendungen

Die wichtigsten Verwendungen von Kobalt weltweit sind in Tab. 5.15 dargestellt. Neben schon sehr lange bekannten Anwendungen wie der Einsatz zur Blaufärbung von Gläsern wird Kobalt auch in sehr forschungsintensive Anwendung, wie beispielsweise Katalysatoren, verwendet.

Tab. 5.15: Weltweite Verwendung von Kobalt (Quelle: CDI 2015)

| Anwendungsbereich | 2013 [%] |
|---|------------|
| Batterien | 41 |
| Superlegierungen (Ni, Co, Fe, Cr...) | 16 |
| Hartmetalle (Carbide, Diamantwerkzeuge) | 10 |
| Hochleistungsschnellschnittstahl/andere Legierungen | 7 |
| Färbemittel: Glas, Emaille, Plastik, Keramik, Künstlerfarben, Textilien | 6 |
| Magnete | 5 |
| Katalysatoren | 5 |
| Futtermittel, Biotechnologie, Eloxieren, Aufnahmemedien, Elektrolyse | 4 |
| Adhäsionsmittel für Reifen, Trocknungsmittel für Farben, Seifen | 4 |
| | 100 |

Zukunftstechnologien

Die wichtigsten kobalthaltigen Zukunftstechnologien mit hohen Wachstumspotenzialen sind:

- Lithium-Ionen-Hochleistungs-Elektrizitätsspeicher,
- Superlegierungen.

5.4.4 Kobaltbedarf 2035

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 5.16 geschätzt worden. Der Bedarf für das untersuchte Segment der Zukunftstechnologien lag im Jahr 2013 bei nur ca. 4 % der Bergwerksförderung von Kobalt. Diese Menge könnte bis zum Jahr 2035 auf ca. 94 % der heutigen Kobaltförderung anwachsen.

Tab. 5.16: Kobaltbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

| Technologie | Bedarf 2013 | Bedarf 2035 |
|---|--------------|----------------|
| CCS – Carbon Capture and Storage | 1 | 25 |
| Lithium-Ionen-Hochleistungs-Elektrizitätsspeicher | 1.200 | 110.000 |
| Micro-Energy Harvesting aus der Umgebungsenergie | 0,5 | 203 |
| Synthetische Kraftstoffe | 0 | 2.000 |
| Medizinische Implantate | 710 | 1.070 |
| Superlegierungen | 3.100 | 8.300 |
| Hochtemperatursupraleiter | 0 | 12 |
| Bedarfssumme | 5.012 | 121.611 |
| Bedarf/Bergwerksförderung 2013 | 4 % | 94 % |
| Bedarf/Raffinadeproduktion 2013 | 6 % | 142 % |

Auch wenn heute schon 41 Prozent der Kobaltproduktion in die Batterieherstellung gehen, wird sich diese Menge in Abhängigkeit von der Diffusion der Elektromobilität bis 2035 stark erhöhen.

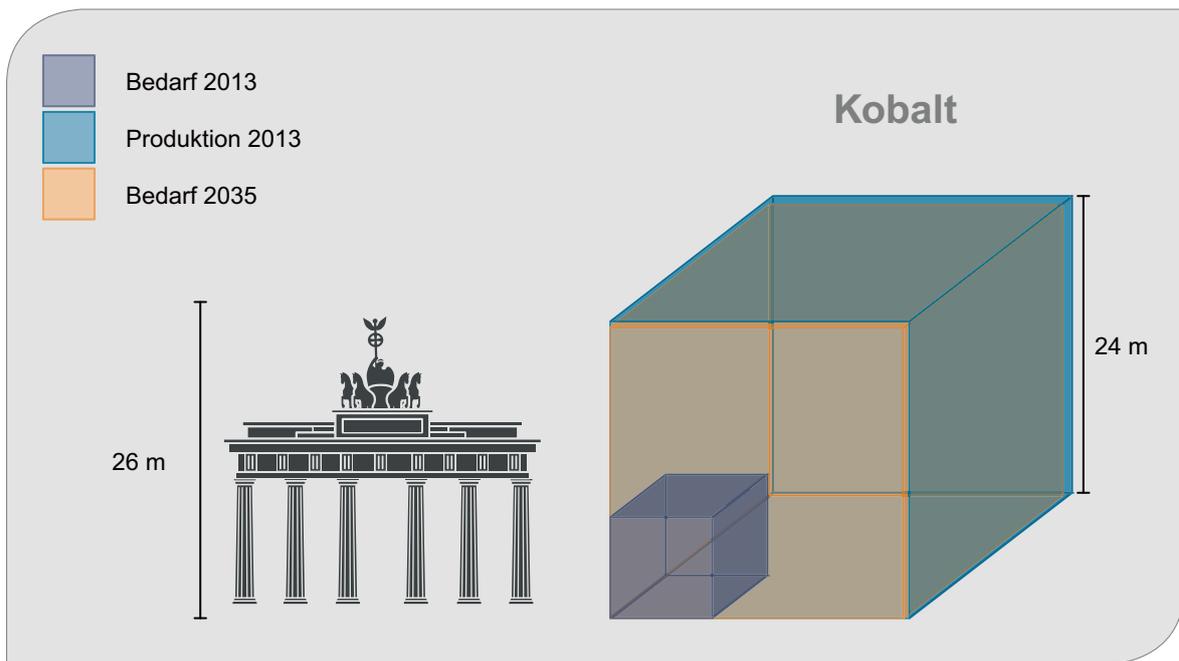


Abb. 5.4: Produktion 2013 und Bedarf von Kobalt für Zukunftstechnologien 2013 und 2035

5.5 Kupfer

Kupfer gehört zusammen mit Silber und Gold zur Kupfergruppe des Periodensystems (Cu, Ag, Au). Es ist ein Halbedelmetall und seit der Prähistorie bekannt (Kupferzeit 2000–1800 v. Christus).

5.5.1 Eigenschaften

Kupfer ist ein relativ weiches und verformbares Metall. Mit seinem edlen Charakter wird es von Luft aufgrund der (sehr langsamen) Bildung einer schützenden Oxidschicht nicht korrodiert (RÖMPP o. J., QUADBECK-SEEGER 2007). Unter feuchten und sauren Bedingungen bildet es eine Patina aus Kupfersalzen (Cu-Sulfate) aus. Nur oxidierende Säuren greifen es an. Kupfer in Reinform ist ein hellrotes, gut schiedbares, schweres Metall. Es lässt sich in vielerlei Formen verarbeiten (Bleche, Folien, Draht). Wichtige Eigenschaften sind seine elektrische und seine Wärmeleitfähigkeit, die nur von Silber übertroffen werden. Weiterhin kann es mit zahlreichen weiteren Metallen legiert werden, um Produkte mit spezifischen Eigenschaften herzustellen.

Tab. 5.17: Eigenschaften von Kupfer

| | |
|---------------------------|----------------------------|
| Dichte | 8,92 g/cm ³ |
| Schmelzpunkt | 1.085 °C |
| Elektrische Leitfähigkeit | 58,1 · 10 ⁶ S/m |
| Wärmeleitfähigkeit | 400 W/(m · K) |

5.5.2 Produktion und Vorkommen

Kupfer ist ein Buntmetall mit einer durchschnittlichen Häufigkeit in der Erdkruste von 50 ppm. Der Rohstoff kommt als gediegenes Metall und in Form von Verbindungen vor. Chalkopyrit ist das wichtigste Mineral im Kupfererz. Kupfer wird auf allen Kontinenten in unterschiedlichen geologischen Formationen abgebaut. Der durchschnittliche Mindestgehalt an Kupfer für große bauwürdige Kupferlagerstätten beträgt in der Regel 0,4 %. Porphyrische Kupferlagerstätten sind weltweit wirtschaftlich am bedeutsamsten (ca. 60 % der Weltproduktion). Darunter finden sich große Lagerstätten wie Chuquibambilla und La Escondida in Chile und Grasberg in Indonesien (DORNER 2013).

Mit über einem Drittel der Weltbergwerksförderung ist Chile das wichtigste Bergbauland für Kupfer. Größter Raffinadeproduzent ist hingegen China.

Tab. 5.18: Versorgungssituation bei Kupfer 2006, 2010 und 2013
(Quellen: DERA 2014, BGR 2015b, USGS 2007c, 2011d, 2014e)

| | 2006 | 2010 | 2013 |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Bergwerksförderung [t Inh.] | 15.079.400 | 16.141.600 | 18.365.341 |
| Raffinadeproduktion [t Inh.] | 17.315.600 | 19.056.700 | 21.446.333 |
| Reserven [t Inh.] | 482.000.000 | 635.000.000 | 685.000.000 |
| Ressourcen [t Inh.] | – | – | – |
| Größte Bergbauländer | Chile 36 % USA 8 % Peru 7 % | Chile 34 % Peru 8 % China 7 % | Chile 32 % China 9 % Peru 7 % |
| Länder mit größter Raffination | China 17 % Chile 16 % Japan 9 % | China 24 % Chile 17 % Japan 8 % | China 32 % Chile 13 % Japan 7 % |
| Länderkonzentration Bergbau ¹ | 1.566 | 1.441 | 1.336 |
| Länderkonzentration Raffination | 832 | 1.064 | 1.339 |
| Gewichtetes Länderrisiko Bergbau ¹ | 0,48 | 0,44 | 0,39 |
| Gewichtetes Länderrisiko Raffination | 0,41 | 0,34 | 0,19 |
| Preis ² [US\$/t] | 6.720,79 | 7.534,18 | 7.332,19 |

¹ zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter GLR,

² Copper: Grade A, LME, cash, in LME warehouse

Kupfer lässt sich ohne Qualitätsverluste beliebig oft wiederaufbereiten und ist deshalb beinahe unbegrenzt nutzbar. Daher ist auch die Entwicklung im Bereich der Wiederverwertung von Kupferschrott von besonderer Bedeutung für die zukünftige Versorgungssituation.

Wie in Tab. 5.18 dargestellt, ist die Raffinadeproduktion durch die relativ hohe Recyclingquote von Kupfer seit Jahren höher als die Bergwerksförderung.

5.5.3 Verwendungen

Die Verwendungsstruktur von Kupfer ist je nach Kontinent leicht unterschiedlich. Tab. 5.19 zeigt die Anwendungen für Europa (EUROPEAN COMMISSION 2014d). Kupfer ist die Basis für nahezu alle elektrischen und elektronischen Technologien.

Zukunftstechnologien

Die wichtigsten kupferhaltigen Zukunftstechnologien mit hohen Wachstumspotenzialen sind nach derzeitigen Erkenntnissen:

Tab. 5.19: Verwendung von Kupfer in der EU
(Quelle: EUROPEAN COMMISSION 2014d)

| Anwendungsbereich | 2011 [%] |
|--|------------|
| Elektrische Infrastruktur und Ausrüstung | 41 |
| Gebäude | 13 |
| Maschinen und Ausrüstung | 13 |
| Automobile | 10 |
| Elektronik und IKT | 7 |
| Verkehr andere | 4 |
| Andere Anwendungen | 12 |
| | 100 |

- Elektrische Traktionsmotoren für Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge,
- RFID – Radio Frequency Identification.

5.5.4 Kupferbedarf 2035

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 5.20 geschätzt worden. Das untersuchte Segment der Zukunftstechnologien benötigt derzeit weniger als 1 % der Kupferförderung des Jahres 2013. Diese

Tab. 5.20: Kupferbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

| Technologie | Bedarf 2013 | Bedarf 2035 |
|--|-------------|-------------|
| Elektrische Traktionsmotoren für Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge | gering | 5.000.000 |
| RFID – Radio Frequency Identification | 162 | 10.800 |
| Mikroelektrische Kondensatoren | 52 | 350 |
| Dünnschicht-Photovoltaik | 136 | 74 |
| CCS – Carbon Capture and Storage | <1 | 2.338 |
| Induktive Übertragung elektrischer Energie | max. 7 | 1.138 |
| Micro-Energy Harvesting aus der Umgebungsenergie | 43 | 18.185 |
| Windkraftanlagen | 103.000 | 244.098 |
| Medizinische Tomographie (Kupfer und NE-Metalle) | 15.600 | 53.000 |
| Hochtemperatursupraleiter | 2 | 400 |
| Additive Fertigung („3D-Drucker“) | 46 | 9.380 |
| Bedarfssumme | 119.049 | 5.339.763 |
| Bedarf/Bergwerksförderung 2013 | 0,6 % | 29 % |
| Bedarf/Raffinadeproduktion 2013 | 0,6 % | 25 % |

Menge wird sich vervielfachen und könnte bis zum Jahr 2035 auf ca. 30 % der Bergwerksförderung von 2013 anwachsen.

Die Verwendungsbreite von Kupfer ist sehr groß. Die meisten Zukunftstechnologien sind ohne Kupfer nicht denkbar. Etablierte Technologien werden ihre Position vermutlich zumindest behaupten, so

dass von diesen keine merkliche Entlastung der Kupfernachfrage zu erwarten ist. Die Rezyklierbarkeit der dominierenden Zukunftstechnologien für die Kupfernachfrage, industrielle Elektromotoren und elektrische Traktionsmotoren für Fahrzeuge, ist jedoch sehr hoch, so dass hier langfristig von einem hohen Rücklauf des Kupfers aus diesen Technologien auszugehen ist.

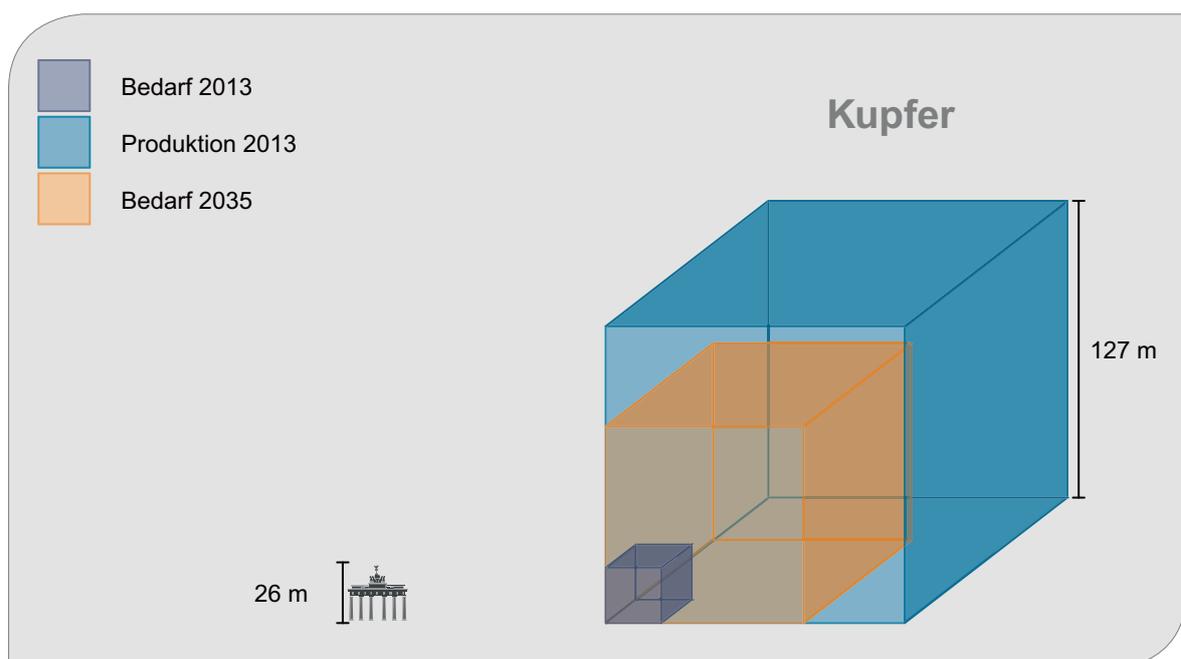


Abb. 5.5: Produktion 2013 und Bedarf von Kupfer für Zukunftstechnologien 2013 und 2035

5.6 Lithium

Lithium ist das dritte Element des Periodensystems und Teil der ersten Hauptgruppe, der Alkalimetallgruppe.

5.6.1 Eigenschaften

Lithium ist ein Leichtmetall und besitzt die geringste Dichte der festen Elemente und das geringste Redoxpotenzial der Metalle. Es ist ein sehr weiches Metall und leitet den elektrischen Strom in einer Größenordnung wie Eisen. Lithium kommt auf Grund seiner hohen Reaktionsfähigkeit in der Natur nicht elementar vor (QUADBECK-SEEGER 2007).

Tab. 5.21: Eigenschaften von Lithium

| | |
|---------------------------|----------------------------|
| Dichte | 0,53 g/cm ³ |
| Schmelzpunkt | 180,5 °C |
| Elektrische Leitfähigkeit | 10,6 · 10 ⁶ S/m |
| Wärmeleitfähigkeit | 85 W/(m · K) |

5.6.2 Produktion und Vorkommen

Lithium wird aus lithiumreicher Sole von Salzseen und aus Lithiummineralen gewonnen. Die lithium-

haltigen Solen stellen seit einigen Jahren die wichtigste Rohstoffquelle zur Produktion von Lithiumkarbonat und -chlorid dar. Die für die bergbauliche Gewinnung von Lithium wirtschaftlich wichtigsten Lithiumminerale kommen in Pegmatiten vor. Dies sind insbesondere das Mineral Spodumen und untergeordnet Petalit, Amblygonit, Eucryptit und Lepidolith. Die Mineralkonzentrate finden direkte Verwendung, vor allem in der Glas- und Keramikindustrie. Spodumen, insbesondere aus Australien, wird aber auch zur Herstellung von Lithiumkarbonat genutzt.

Der größte Teil der produzierten Lithiumsalze wird nicht zu Metall reduziert, sondern entweder direkt als Lithiumcarbonat verwendet oder zu anderen Verbindungen umgesetzt (siehe Tab. 5.22).

Die größten Reserven sind mit 7,5 Mio. t in Chile ausgewiesen, die größten Ressourcen werden in Bolivien mit 9 Mio. t vermutet (USGS 2014f).

5.6.3 Verwendungen

Die Tab. 5.23 zeigt die Lithiumverwendung in den Jahren 2006, 2010 und 2013. Die wichtigsten Einsatzfelder sind Gläser und Keramiken sowie Batterien. Bei den Keramiken wird die Eigenschaft des hauptsächlich verwendeten β -Spodumens ausgenutzt, sich bei Erhitzung zusammenzuziehen. Die

Tab. 5.22: Versorgungssituation bei Lithium 2006, 2010 und 2013
(Quellen: DERA 2014, BGR 2015b, USGS 2007d, 2011e, 2014f)

| | 2006 | 2010 | 2013 |
|---|---|---|--|
| Bergwerksförderung [t Inh.] | 20.965 | 26.548 | 29.759 |
| Raffinadeproduktion | – | – | – |
| Reserven [t Inh.] | 4.131.000 | 12.565.000 | 13.017.000 |
| Ressourcen [t Inh.] | 13.760.000 | 33.000.000 | 39.500.000 |
| Größte Förderländer | Chile 37 % Australien 29 % Argentinien 14 % | Chile 37 % Australien 32 % Argentinien 12 % | Australien 39 % Chile 38 % Argentinien 8 % |
| Größte Raffinadeländer | – | – | – |
| Länderkonzentration Förderung ¹ | 2.543 | 2.610 | 3.149 |
| Länderkonzentration Raffination | – | – | – |
| Gewichtetes Länderrisiko Förderung ¹ | 0,96 | 0,92 | 1,00 |
| Gewichtetes Länderrisiko Raffination | – | – | – |
| Preis ² [US\$/t] | 5.199,24 | 5.180,87 | 6.889,44 |

¹ zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter GLR, ² Lithium: Lithium-carbonate, large contracts, USA, del. Continental

Tab. 5.23: Weltweite Verwendung von Lithium
(Quellen: USGS 2007d, 2011e, 2014f)

| Anwendungsbereich | 2006 [%] | 2010 [%] | 2013 [%] |
|----------------------------|------------|------------|------------|
| Glas/Keramiken | 20 | 31 | 35 |
| Batterien | 20 | 23 | 29 |
| Schmierfette | 16 | 9 | 9 |
| Polymere und Pharmazeutika | 9 | 6 | 5 |
| Luftaufbereitung | 8 | 6 | 5 |
| Aluminiumschmelzen | 6 | 6 | 1 |
| Strangguss | | 4 | 6 |
| Weitere Anwendungen | 21 | 15 | 10 |
| | 100 | 100 | 100 |

Endprodukte, wie beispielsweise Ceranfelder, sind unempfindlich gegen starke und plötzliche Temperaturschwankungen (WENDL 2009).

Zukunftstechnologien

Die wichtigste lithiumhaltige Zukunftstechnologie mit hohem Wachstumspotenzial ist der:

- Lithium-Ionen-Hochleistungs-Elektrizitätsspeicher.

5.6.4 Lithiumbedarf 2035

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 5.24 geschätzt worden. Der Bedarf des untersuchten Segments der Zukunftstechnologien lag 2013 bei etwa 2 % der Lithiumförderung. Diese Menge könnte bis 2035 nahezu um den Faktor 200 ansteigen, wenn sich der Bedarf an Elektrofahrzeugen mit Lithium-Ionen-Batterien erhöht.

Tab. 5.24: Lithiumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

| Technologie | Bedarf 2013 | Bedarf 2035 |
|---|-------------|----------------|
| Legierungen für den Airframe-Leichtbau | 0 | 4.650 |
| Lithium-Ionen-Hochleistungs-Elektrizitätsspeicher für PKW | 607 | 110.000 |
| Bedarfssumme | 607 | 114.650 |
| Bedarf/Förderung 2013 | 2 % | 385 % |

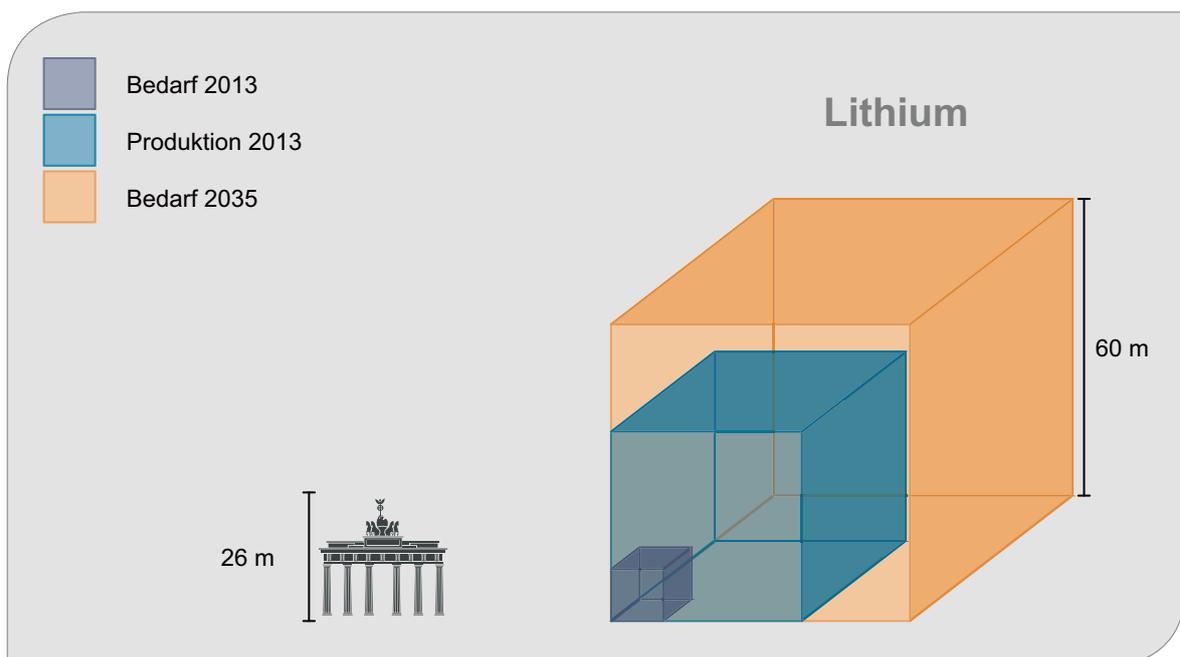


Abb. 5.6: Produktion 2013 und Bedarf von Lithium für Zukunftstechnologien 2013 und 2035

5.7 Palladium

Palladium steht zusammen mit Platin und Nickel in einer Gruppe des Periodensystems. Es gehört zu den Platin(gruppen)metallen (PGM), zu denen zusätzlich folgende Edelmetalle mit ähnlichen Eigenschaften zählen: Ruthenium, Rhodium, Osmium, Iridium und Platin.

5.7.1 Eigenschaften

Palladium ist ein silberweiß glänzendes, duktiles Metall. Aufgrund seiner Korrosionsbeständigkeit wird es für elektrische Kontakte und chirurgische Instrumente verwendet. Mit Gold legiert erhält man das in der Schmuckindustrie bekannte Weißgold. Als Katalysator für Hydrierungen ist Palladium deshalb so effektiv, weil es das 3.000-fache seines Volumens an Wasserstoff absorbieren kann (QUADBECK-SEEGER 2007).

Tab. 5.25: Eigenschaften von Palladium

| | |
|---------------------------|----------------------------|
| Dichte | 12,0 g/cm ³ |
| Schmelzpunkt | 1.554 °C |
| Elektrische Leitfähigkeit | 9,26 · 10 ⁶ S/m |
| Wärmeleitfähigkeit | 72 W/(m · K) |

5.7.2 Produktion und Vorkommen

Die Platingruppenmetalle treten global in unterschiedlichen Lagerstättentypen auf und sind vorrangig mit Nickel und Kupfer vergesellschaftet. Magmatische PGM-Lagerstätten können prinzipiell in zwei unterschiedliche Typen gegliedert werden: zum einen PGM-dominierte Lagerstätten mit geringen Gehalten an Basismetallsulfiden, zum anderen Nickel-Kupfer-dominierte Lagerstätten, in denen die PGM als Beiprodukte gewonnen werden. Das weltweit wichtigste Vorkommen PGM-dominiertes Erze stellt der Bushveld-Komplex in der Republik Südafrika dar. Wichtige Nickel-Kupfer dominierte Lagerstätten befinden sich in Kanada (Sudbury) und in der Russischen Föderation (Norilsk-Talnakh) (SCHMIDT 2014). Im Gegensatz zu Platin und Rhodium ist das Hauptförderland für Palladium nicht Südafrika, sondern mit einem Anteil von über 40 % die Russische Föderation (vergleiche Tab. 5.26). Die PGM werden hier als Koppelprodukte der Nickelproduktion gewonnen.

5.7.3 Verwendungen

Die wichtigsten Verwendungen von Palladium weltweit sind in Tab. 5.27 dargestellt (JOHNSON MATTHEY 2014). Der bei Weitem bedeutendste Sektor ist die

Tab. 5.26: Versorgungssituation bei Palladium 2006, 2010 und 2013
(Quelle: BGR 2015b, DERA 2014, USGS 2007e, 2011f, 2014g)

| | 2006 | 2010 | 2013 |
|---|--|--|---|
| Bergwerksförderung [t Inh.] | 222 | 205 | 205 |
| Raffinadeproduktion [t Inh.] | – | – | – |
| Reserven [t Inh.] ¹ | 71.210 | 66.110 | 66.110 |
| Ressourcen [t Inh] | | | |
| Größte Bergbauländer | Russland 44 % Südafrika 39 % USA 6 % | Russland 42 % Südafrika 40 % USA 6 % | Russland 41 % Südafrika 37 % Kanada 8 % |
| Größte Raffinadeländer | – | – | – |
| Länderkonzentration Bergbau ² | 3.551 | 3.410 | 3.166 |
| Länderkonzentration Raffination | – | – | – |
| Gewichtetes Länderrisiko Bergbau ² | –0,02 | –0,11 | –0,03 |
| Gewichtetes Länderrisiko Raffination | – | – | – |
| Preis ³ [US\$/troz] | 320,40 | 526,30 | 724,71 |

¹ Angaben für alle Platingruppenmetalle,

² zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter GLR,

³ 99,95%, London, afternoon, in warehouse

Automobilindustrie. Nahezu drei Viertel des Palladiums werden zur Herstellung von Autoabgaskatalysatoren benötigt.

Tab. 5.27: Weltweite Verwendung von Palladium nach JOHNSON MATTHEY (2014)

| Anwendungsbereich | [t/a] | 2013 [%] |
|---|--------------|------------|
| Autoabgaskatalysatoren | 216,4 | 73 |
| Elektronik | 33,0 | 11 |
| Chemische Katalysatoren | 17,4 | 6 |
| Medizintechnik (inkl. Dentaltechnik) | 14,2 | 5 |
| Schmuck | 11,1 | 4 |
| Andere Anwendungen | 3,4 | 1 |
| | 295,5 | 100 |

Zukunftstechnologien

Die wichtigsten palladiumhaltigen Zukunftstechnologien mit hohen Wachstumspotenzialen sind:

- Mikroelektrische Kondensatoren,
- Meerwasserentsalzung.

5.7.4 Palladiumbedarf 2035

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 5.28 geschätzt worden. Das untersuchte Segment der Zukunftstechnologien benötigt derzeit ca. 8 % der heutigen Palladium-Bergwerksförderung. Die Nachfrage könnte bis zum Jahr 2035 auf ca. 47 % der Bergwerksförderung des Jahres 2013 anwachsen.

Tab. 5.28: Palladiumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

| Technologie | Bedarf 2013 | Bedarf 2035 |
|--|-------------|-------------|
| Mikroelektrische Kondensatoren | 8 | max. 55 |
| Meerwasserentsalzung | 9 | max. 41 |
| Bedarfssumme | 17 | 96 |
| Bedarf/Bergwerksproduktion 2013 | 8 % | 47 % |

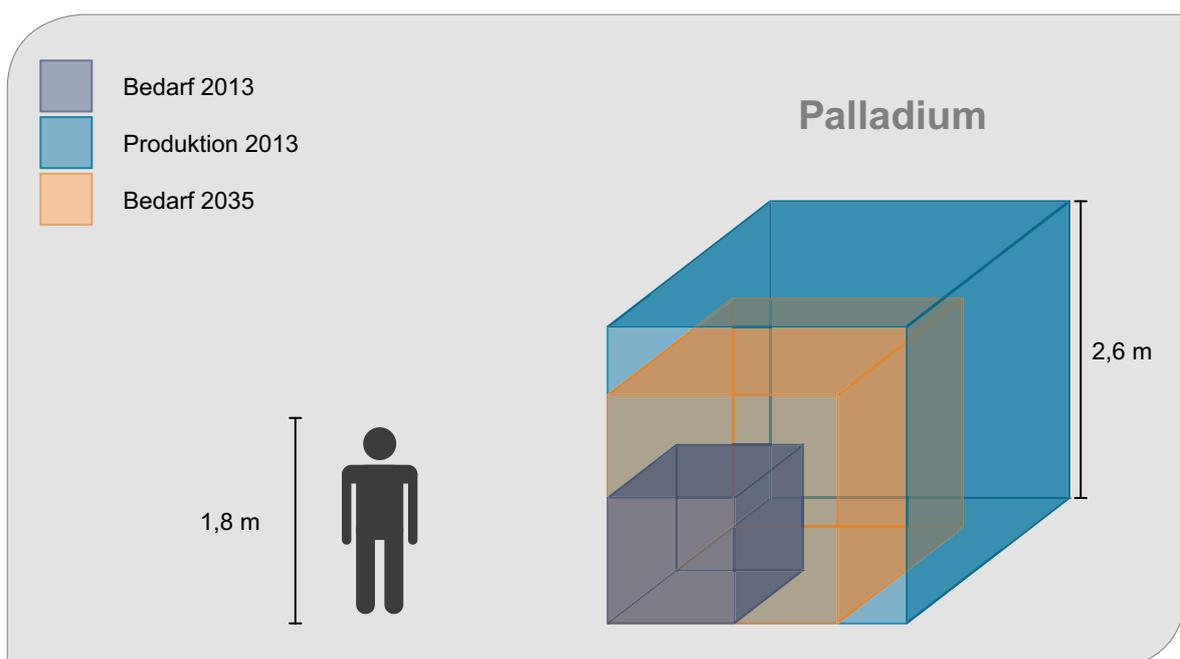


Abb. 5.7: Produktion 2013 und Bedarf von Palladium für Zukunftstechnologien 2013 und 2035

5.8 Platin

Platin steht mit Nickel und Palladium in einer Gruppe des Periodensystems. Es gehört zu den Platin(gruppen)metallen, zu denen folgende weitere Edelmetalle mit ähnlichen Eigenschaften zählen: Ruthenium, Rhodium, Osmium, Iridium und Palladium.

5.8.1 Eigenschaften

Platin ist ein sehr dichtes, stark glänzendes Metall. Platin ist schmied- und dehnbar und sehr korrosionsbeständig. Es ist ein vielseitiger Katalysator und wird in vielen chemischen Synthesen eingesetzt.

Tab. 5.29: Eigenschaften von Platin

| | |
|---------------------------|----------------------------|
| Dichte | 21,5 g/cm ³ |
| Schmelzpunkt | 3.827 °C |
| Elektrische Leitfähigkeit | 9,43 · 10 ⁶ S/m |
| Wärmeleitfähigkeit | 72 W/(m · K) |

5.8.2 Produktion und Vorkommen

Das weltweit wichtigste Vorkommen PGM-dominierter Erze stellt der Bushveld-Komplex in der Republik Südafrika dar, siehe auch Palladium. Die Platingehalte liegen hier bei ca. 1,3 bis 3,3 g/t (SCHMIDT 2014). Wichtige Nickel-Kupfer dominierte Lagerstätten befinden sich in Kanada (Sudbury) und in der Russischen Föderation (Norilsk-Talnakh). Das mit Abstand größte Förderland für Platin ist mit über 70 % der Weltbergwerksförderung die Republik Südafrika (vergleiche Tab. 5.30).

5.8.3 Verwendungen

Die wichtigsten Verwendungen von Platin weltweit sind in Tab. 5.31 dargestellt (JOHNSON MATTHEY 2014). Mit jeweils einem Anteil von etwas mehr als einem Drittel sind die Auto- und die Schmuckindustrie die bedeutendsten Anwendungsgebiete für Platin.

Tab. 5.30: Versorgungssituation bei Platin 2006, 2010 und 2013
(Quellen: BGR 2015b, DERA 2014, USGS 2007e, 2011f, 2014g)

| | 2006 | 2010 | 2013 |
|---|---|---|---|
| Bergwerksförderung [t Inh.] | 220 | 194 | 187 |
| Raffinadeproduktion [t Inh.] | – | – | – |
| Reserven [t Inh.] ¹ | 71.210 | 66.110 | 66.110 |
| Ressourcen [t Inh] | – | – | – |
| Größte Bergbauländer | Südafrika 77 % Russland 13 % Kanada 4 % | Südafrika 76 % Russland 13 % Simbabwe 4 % | Südafrika 73 % Russland 13 % Kanada 5 % |
| Größte Raffinadeländer | – | – | – |
| Länderkonzentration Bergbau ² | 6.161 | 6.002 | 5.605 |
| Länderkonzentration Raffination | – | – | – |
| Gewichtetes Länderrisiko Bergbau ² | 0,30 | 0,08 | 0,12 |
| Gewichtetes Länderrisiko Raffination | – | – | – |
| Preis ³ [US\$/troz] | 1142,02 | 1611,73 | 1487,31 |

¹ Angaben für die Platingruppenmetalle, ² zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter GLR,

³ 99,95%, London, morning, in warehouse

Tab. 5.31: Weltweite Verwendung von Platin nach (JOHNSON MATTHEY 2014)

| Anwendungsbereich | [t/a] | 2013 [%] |
|---|--------------|------------|
| Autoabgaskatalysatoren | 97,9 | 36 |
| Schmuck | 94,2 | 35 |
| Investment | 27,1 | 10 |
| Chemische Katalysatoren | 17,0 | 6 |
| Elektronik | 6,9 | 3 |
| Medizintechnik (inkl. Dentaltechnik) | 6,4 | 2 |
| Petrochemie | 5,7 | 2 |
| Glas | 4,0 | 1 |
| Andere Anwendungen | 13,0 | 5 |
| | 272,2 | 100 |

Zukunftstechnologien

Die wichtigste platinhaltige Zukunftstechnologie mit hohem Wachstumspotenzial ist:

- Brennstoffzellen Elektrofahrzeuge.

5.8.4 Platinbedarf 2035

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 5.32 geschätzt worden. Bislang besteht für die betrachteten Zukunftstechnologien nahezu kein Bedarf an der heutigen Platin-Bergwerksförderung. Der Bedarf könnte bis zum Jahr 2035 auf ca. 60 % der Bergwerksförderung des Jahres 2013 anwachsen, vor allem getrieben durch die Nachfrage nach Brennstoffzellenfahrzeugen.

Tab. 5.32: Platinbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

| Technologie | Bedarf 2013 | Bedarf 2035 |
|--|-------------|-------------|
| Brennstoffzellen Elektrofahrzeuge | 0 | max. 93 |
| Synthetische Kraftstoffe | 0 | 20 |
| Bedarfssumme | 0 | 113 |
| Bedarf/Bergwerksproduktion 2013 | 0 % | 60 % |

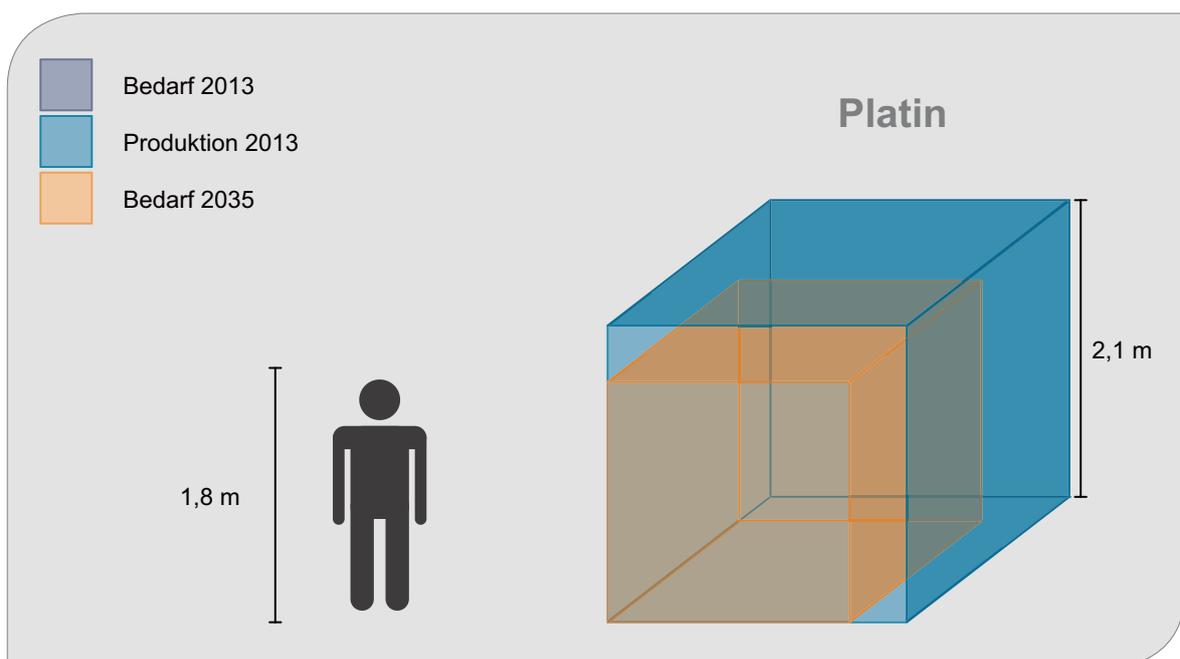


Abb. 5.8: Produktion 2013 und Bedarf von Platin für Zukunftstechnologien 2013 und 2035

5.9 Rhenium

Rhenium steht in der 7. Nebengruppe, der Mangan-Gruppe des Periodensystems, zusammen mit Mangan und Technetium. Es ist sehr selten und wurde, weil es sehr ähnliche Eigenschaften wie Molybdän besitzt, erst 1925, als letztes natürliches Element, entdeckt (MMTA 2015).

5.9.1 Eigenschaften

Rhenium ist ein sehr seltenes, silberweißes Metall. Es kommt nicht gediegen vor und ist meist vergesellschaftet mit Molybdän, da es ähnliche Eigenschaften aufweist. Es hat, nach Wolfram, den zweithöchsten Schmelzpunkt und mit 5.596 °C den höchsten Siedepunkt aller Metalle. Es ist damit ein wichtiger Legierungsbestandteil für hitzebeständige Materialien (QUADBECK-SEEGER 2007).

Tab. 5.33: Eigenschaften von Rhenium

| | |
|---------------------------|----------------------------|
| Dichte | 21,0 g/cm ³ |
| Schmelzpunkt | 3186 °C |
| Elektrische Leitfähigkeit | 5,56 · 10 ⁶ S/m |
| Wärmeleitfähigkeit | 48 W/(m · K) |

5.9.2 Produktion und Vorkommen

Rhenium ist vor allem an Molybdänminerale wie Molybdänit (MoS₂) gebunden. Es ist daher ein Beiprodukt der Molybdängewinnung. Der weltweit größte Produzent ist das Unternehmen Molymet in Chile, welches in großen Mengen Molybdänsulfid (MoS₂) in Chile gewinnt.

Die größten bekannten Vorkommen an rheniumhaltigen Erzen liegen in Chile, den USA, Russland, Armenien und Kanada. Die bedeutendsten Förderländer sind derzeit Chile, die USA und Polen (vergleiche Tab. 5.34).

Aufgrund der geringen Größe des Rheniummarktes von ca. 50 Tonnen pro Jahr hat es in der Vergangenheit bei Störungen von Angebot und Nachfrage starke Preisausschläge gegeben (ROSKILL INFORMATION SERVICES 2010).

5.9.3 Verwendungen

Die wichtigsten Verwendungen von Rhenium weltweit sind in Tab. 5.35 dargestellt. Rhenium wird überwiegend in Superlegierungen eingesetzt, daneben auch in Katalysatoren und andere Anwendungen (EUROPEAN COMMISSION 2014d).

Tab. 5.34: Versorgungssituation bei Rhenium 2006, 2010 und 2013
(Quellen: BGR 2015b, DERA 2014, USGS 2007f, 2012c, 2014h)

| | 2006 | 2010 | 2013 |
|---|---|---|--------------------------------------|
| Bergwerksförderung [t Inh.] | 50 | 48 | 47 |
| Raffinadeproduktion [t Inh.] | – | – | – |
| Reserven [t Inh.] ¹ | 2.453 | 2.453 | 2.453 |
| Ressourcen [t Inh.] | 11.000 | 11.000 | 11.000 |
| Größte Bergbauländer | Chile 39 % USA 16 % Kasachstan 16 % | Chile 52 % USA 14 % Usbekistan 10 % | Chile 53 % USA 15 % Polen 13 % |
| Größte Raffinadeländer | – | – | – |
| Länderkonzentration Bergbau ¹ | 2.208 | 3.130 | 3.328 |
| Länderkonzentration Raffination | – | – | – |
| Gewichtetes Länderrisiko Bergbau ¹ | 0,54 | 0,70 | 0,73 |
| Gewichtetes Länderrisiko Raffination | – | – | – |
| Preis ² [US\$/kg] | 1.260 | 2.280 | 3.200 |

¹ zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter GLR,

² Average price per kilogram of rhenium in pellets, based on U.S. Census Bureau customs value.

Tab. 5.35: Weltweite Verwendung von Rhenium nach EUROPEAN COMMISSION (2014d)

| Anwendungsbereich | 2011 [%] |
|---------------------|------------|
| Luft- und Raumfahrt | 63 |
| Gas Turbinen | 13 |
| Katalysatoren | 9 |
| Auto | 5 |
| Werkzeuge | 2 |
| Öl/Gas | 2 |
| Andere | 7 |
| | 100 |

Zukunftstechnologien

Die wichtigste rheniumhaltige Zukunftstechnologie mit hohem Wachstumspotenzial ist:

- Superlegierungen.

5.9.4 Rheniumbedarf 2035

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 5.36 geschätzt worden. Die hier untersuchten Zukunftstechnologien benötigen bereits heute fast 100 % der gesamten Bergwerksproduktion. Der Bedarf für Superlegierungen könnte bis zum Jahr 2035 auf ca. 250 % der Bergwerksproduktion des Jahres 2013 anwachsen.

Tab. 5.36: Rheniumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

| Technologie | Bedarf 2013 | Bedarf 2035 |
|--|-------------|--------------|
| Superlegierungen | 46 | 120 |
| Bedarfssumme | 46 | 120 |
| Bedarf/Bergwerksproduktion 2013 | 98 % | 250 % |

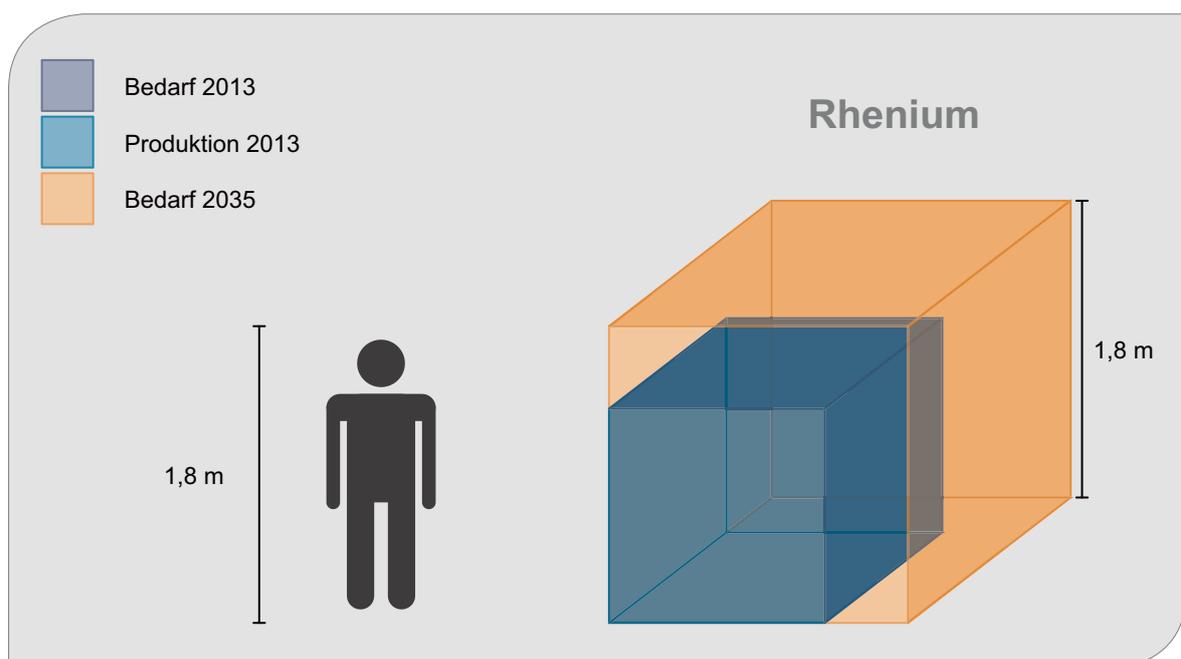


Abb. 5.9: Produktion 2013 und Bedarf von Rhenium für Zukunftstechnologien 2013 und 2035

5.10 Scandium

Scandium steht in der dritten Nebengruppe des Periodensystems, die auch Scandiumgruppe genannt wird. Das Element ist das erste Element der Übergangsmetalle und wird auch zu den Seltenmetallen gezählt.

5.10.1 Eigenschaften

Scandium ist ein weiches Metall, welches fast so leicht wie Aluminium ist und ebenfalls in der Luft eine schützende Oxidschicht bildet. Als Pulver ist Scandium jedoch brennbar. In Aluminiumlegierungen wirkt ein geringer Zusatz an Scandium gefügestabilisierend (ENGHAG 2004, WIKIPEDIA 2015d).

Tab. 5.37: Eigenschaften von Scandium

| | |
|---------------------------|----------------------------|
| Dichte | 2,98 g/cm ³ |
| Schmelzpunkt | 1.541 °C |
| Elektrische Leitfähigkeit | 1,81 · 10 ⁶ S/m |
| Wärmeleitfähigkeit | 16 W/(m · K) |

5.10.2 Produktion und Vorkommen

Scandium ist in der Erdkruste zwar weit verbreitet, allerdings ist die mineralische Anreicherung gering und das Auftreten dispers. Aufgrund der niedrigen Konzentration ist Scandium ein klassisches Nebenprodukt der Bergwerksförderung eines Hauptelements. Eine Bergwerksförderung existiert lediglich in China, Kasachstan, Russland und der Ukraine, wo Scandium als Beiprodukt aus Seltenen Erden-, Titan- und Uranlagerstätten gewonnen wird (ELSNER et al. 2010). Die Eigenschaften von Scandium ähneln denen von Aluminium, es ist daher auch in einigen Lateriten, beispielsweise in Australien, stark angereichert (AL BARAZI et al. 2016).

Die produzierten Scandiummengen werden nicht veröffentlicht, in der Literatur angegebene jährliche Produktionsmenge schwanken zwischen 3 und 15 Tonnen Scandiumoxid (Sc₂O₃) (ELSNER et al. 2010, USGS 2015f). Daher können auch keine Angaben zu den Produktionsländern sowie Länderkonzentrationen bzw. Länderrisiken gemacht werden. Auch Angaben zu Reserven und Ressourcen liegen nicht vor, siehe Tab. 5.38.

Der Scandiumpreis unterscheidet sich aufgrund der kleinen Gesamtproduktionsmenge nach Reinheit und der Verkaufsmenge, die bei Scandium sehr klein sein kann (~ 5 Gramm) (MORDOR INTELLIGENCE LLP 2016).

Tab. 5.38: Versorgungssituation bei Scandium 2006, 2010 und 2013
(Quellen: BGR 2015b, USGS 2008b, 2011a, 2015h)

| | 2006 | 2010 | 2013 |
|--|-------|-----------|-----------|
| Bergwerksförderung [t Sc ₂ O ₃] | – | – | 10 |
| Raffinadeproduktion | – | – | – |
| Reserven | – | – | – |
| Ressourcen | – | – | – |
| Größte Bergbauländer | – | – | – |
| Größte Raffinadeländer | – | – | – |
| Länderkonzentration Bergbau | – | – | – |
| Länderkonzentration Raffination | – | – | – |
| Gewichtetes Länderrisiko Bergbau | – | – | – |
| Gewichtetes Länderrisiko Raffination | – | – | – |
| Preis Scandiumoxid ¹ [US\$/kg] | 1.450 | 1.620 | 5.000 |
| Preis Scandiumoxid ² [RMB/kg] | – | 11.500,00 | 22.507,94 |

¹ Per kilogram, oxide, 99,99 % purity, Preise von Stanford Materials Corp., für 2010 und 2015 für eine 5 kg Charge Scandiumoxid, ² Scandium Oxide, 99,5 % min., China

5.10.3 Verwendungen

Die Tab. 5.39 zeigt die Scandiumverwendung im Jahr 2011 (EUROPEAN COMMISSION 2014d). Die größte Einsatzmenge geht in Aluminiumlegierungen. In Beleuchtungen trägt Scandiumiodid (ScI_3) in Quecksilberlampen zu großer Helligkeit bei (Flutlicht) (QUADBECK-SEEGER 2007). Scandium wird auch in Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC) eingesetzt.

Tab. 5.39: Weltweite Verwendung von Scandium 2011
(EUROPEAN COMMISSION 2014d)

| Anwendungsbereich | 2013 [%] |
|----------------------|------------|
| Aluminiumlegierungen | 85 |
| Beleuchtung | 10 |
| Brennstoffzellen | 5 |
| | 100 |

Zukunftstechnologien

Die wichtigste scandiumhaltige Zukunftstechnologie mit hohem Wachstumspotenzial ist:

- SOFC – stationäre Brennstoffzelle.

5.10.4 Scandiumbedarf 2035

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 5.40 geschätzt worden. Es wird im Technologieszenario davon ausgegangen, dass Sc-Al-Verbindungen in der Luftfahrt langfristig kaum mehr eine Rolle spielen werden. Der Scandiumbedarf für das untersuchte Segment der Zukunftstechnologien lag im Jahr 2013 bei 17 % der Bergwerksförderung, 2035 könnten es in Bezug auf die Produktion 2013 138 % sein.

Tab. 5.40: Scandiumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien [in t Sc]

| Technologie | Bedarf 2013 | Bedarf 2035 |
|--|-------------|--------------|
| SOFC | 1,1 | 9 |
| Bedarfssumme | 1,1 | 9 |
| Bedarf/Bergwerksproduktion 2013 | 17 % | 138 % |

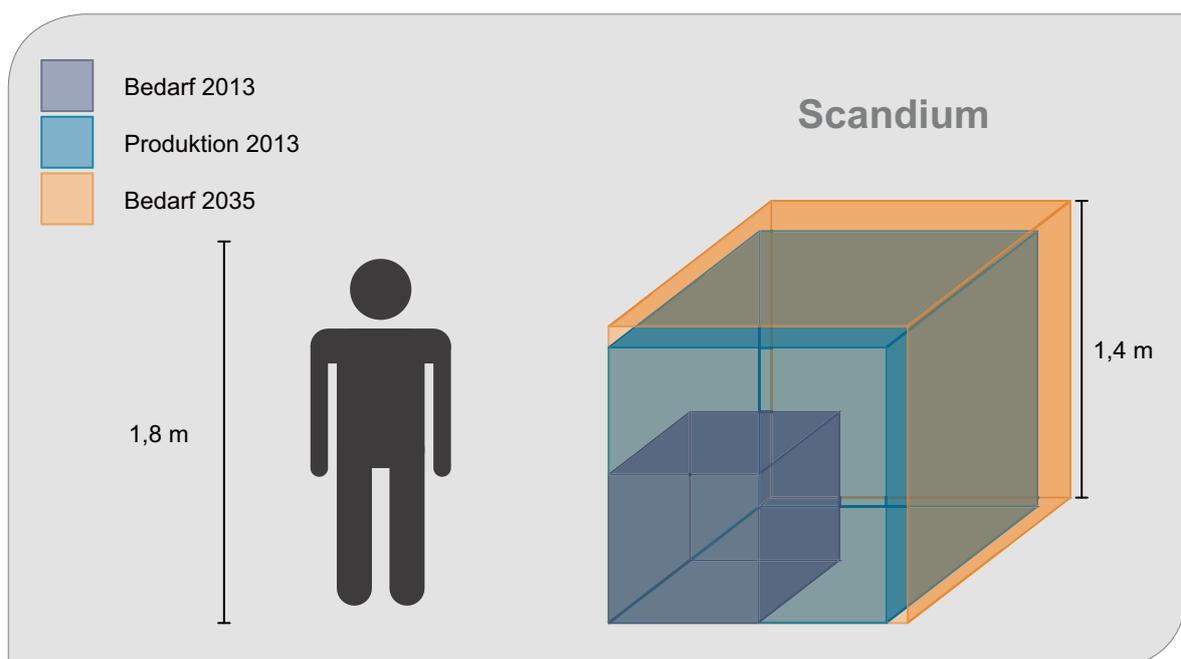


Abb. 5.10: Produktion 2013 und Bedarf von Scandium für Zukunftstechnologien 2013 und 2035

5.11 Seltenerdmetalle

Zu den Metallen der Seltenen Erden zählt man die 14 Lanthanoiden und die drei Elemente Scandium, Yttrium und Lanthan der dritten Hauptgruppe des Periodensystems. Zu den Leichten Seltenerdmetallen gehören: Lanthan, Cer, Praseodym, Neodym, Promethium, Samarium und Europium (Cer-Gruppe). Zu den Schweren Seltenerdmetallen gehören: Yttrium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium und Lutetium. Promethium hat als einziges Lanthanoid kein stabiles Isotop und kommt daher nicht natürlich vor. Die Einteilung ist nicht ganz klar definiert, so wird das wertvolle Europium oft auch zu den Schweren Seltenen Erden gezählt, beispielsweise in ELSNER (2011).

5.11.1 Eigenschaften

In elementarer Form sind die Seltenerdmetalle eisengraue bis silbrig glänzende, relativ weiche und gewöhnlich reaktionsfreudige, ziemlich unedle Metalle. Der Schmelzpunkt schwankt zwischen 798 °C für Cer bis 1.663 °C für Lutetium, das Farbenspektrum reicht von farblos bis gelb, grün und rot. Die meisten Elemente weisen einen starken Paramagnetismus auf.

Für die Chemie der Seltenerdmetalle ist charakteristisch, dass die äußere Elektronenzahl bei allen gleich ist, weil mit ansteigender Ordnungszahl im Periodensystem das tiefer innerliegende 4f-Or-

bital, beginnend beim Cer und endend schließlich mit 14 Elektronen beim Lutetium, aufgefüllt wird. Die Seltenerdmetalle sind sich somit in ihren chemischen Eigenschaften ähnlich, was ihre Abtrennung erschwert. Alle haben die Oxidationszahl +3, sie oxidieren schnell an der Luft und bilden mit Wasser zu Wasserstoff (QUADBECK-SEEGER 2007).

5.11.2 Produktion und Vorkommen

Die Seltenerdmetalle kommen nur gemeinsam vor und können auch nur zusammen abgebaut werden. Die meisten der Seltenen Erden sind in der Erdkruste nicht selten, allerdings sind sie nicht häufig in wirtschaftlich abbaubaren Mengen angereichert. Die Häufigkeit ihres Vorkommens in der Erdkruste ist sehr unterschiedlich und reicht von Cer, mit über 60 ppm, bis Thulium und Lutetium, die mit etwa 0,3 ppm in der Erdkruste vertreten sind. Typischerweise kommen sie in gesteinsbildenden Mineralen als dreiwertige Kationen (Ausnahmen bilden Eu^{2+} und Ce^{4+}) in Verbindungen mit Karbonaten, Oxiden, Phosphaten und Silikaten vor. Die Leichtereren Seltenen Erden (insbesondere Lanthan – Neodym) kommen deutlich häufiger vor als die Schwereren. In den meisten Lagerstätten bilden Lanthan, Cer, Praseodym und Neodym über 90 % der Gesamtvorkommen an Seltenen Erden (ELSNER 2011).

Die Seltenerden-Mineralen Bastnäsit (SEEFCO_3), Monazit ($(\text{SEE,Th})\text{PO}_4$), Xenotim (YPO_4) und Ionen-Adsorptionstone in lateritischen Verwitte-

Tab. 5.41: Eigenschaften von ausgewählten Leichten Seltenerdmetallen

| | Cer | Praseodym | Neodym |
|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Dichte | 6,8 g/cm ³ | 6,5 g/cm ³ | 7,0 g/cm ³ |
| Schmelzpunkt | 795 °C | 935 °C | 1.024 °C |
| Elektrische Leitfähigkeit | 1,35 · 10 ⁶ S/m | 1,43 · 10 ⁶ S/m | 1,56 · 10 ⁶ S/m |
| Wärmeleitfähigkeit | 11 W/(m · K) | 13 W/(m · K) | 17 W/(m · K) |

Tab. 5.42: Eigenschaften von ausgewählten Schweren Seltenerdmetallen

| | Yttrium | Terbium | Dysprosium |
|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Dichte | 4,4 g/cm ³ | 8,2 g/cm ³ | 8,6 g/cm ³ |
| Schmelzpunkt | 1.526 °C | 1.356 °C | 1.407 °C |
| Elektrische Leitfähigkeit | 1,66 · 10 ⁶ S/m | 0,87 · 10 ⁶ S/m | 1,08 · 10 ⁶ S/m |
| Wärmeleitfähigkeit | 17 W/(m · K) | 11 W/(m · K) | 11 W/(m · K) |

rungskrusten in China stellen die Rohstoffgrundlage für die Gewinnung der Seltenen Erden. In Monazit und Bastnäsit sind vor allem die Leichten Seltenen Erden (La – Nd) konzentriert.

Alle Seltenerden-Mineralen können unterschiedliche Mengen an Uran und vor allem Thorium in ihr Kristallgitter einbauen und sind daher unterschiedlich stark radioaktiv.

Seltene Erden werden meist als Beiprodukt z. B. bei der Förderung von Eisenerz, Schwermineralen und Zinnerz gewonnen. Das Hauptprodukt bilden sie beim Abbau von Ionen-Adsorptionstonen.

In den Seltenerdmetall-Lagerstätten sind alle Schweren Seltenerdmetalle in nur sehr geringen Konzentrationen vertreten. Beispielsweise machen sie nur ca. 2,3 % aller Seltenerdmetalloxide in der

Tab. 5.43: Versorgungssituation bei Seltenerdmetallen 2006, 2010 und 2013
(Quellen: DERA 2014, BGR 2015b, USGS 2008c, 2011g, 2015i)

| | 2006 | 2010 | 2013 |
|--|---|--|--|
| Bergwerksförderung ¹ [t SEO] | 136.918 | 120.915 | 86.335 |
| Raffinadeproduktion ¹ [t SEO] | – | 121.878 | 90.011 |
| Produktion Neodymoxid ² [t Nd ₂ O ₃] | – | – | 33.700 |
| Produktion Neodym ³ [t Nd] | | | 28.900 |
| Produktion Praseodymoxid ² [t Pr ₂ O ₃] | – | – | 9.300 |
| Produktion Praseodym ³ [t Pr] | | | 7.700 |
| Produktion Yttriumoxid ² [t Y ₂ O ₃] | – | – | 9.200 |
| Produktion Yttrium ³ [t Y] | | | 5.500 |
| Produktion Terbiumoxid ² [t Tb ₂ O ₃] | | | 500 |
| Produktion Terbium ³ [t Tb] | | | 400 |
| Produktion Dysprosiumoxid ² [t Dy ₂ O ₃] | – | – | 2.200 |
| Produktion Dysprosium ³ [t Dy] | | | 1.900 |
| Reserven ¹ [1000 t SEO] | 87.720 | 113.778 | 136.230 |
| Ressourcen [1000 t SEO] | – | – | – |
| Größte Bergbauländer ¹ | China 97 % Russland 2 % Brasilien 0,4 % | China 97 % Russland 1 % Malaysia 0,3 % | China 96 % Russland 2 % Indonesien 0,7 % |
| Größte Raffinadeländer ¹ | – | China 98 % Russland 1 % USA 1 % | China 93 % USA 4 % Russland 2 % |
| Länderkonzentration Bergbau ^{1,4} | 9.441 | 9.671 | 9.316 |
| Länderkonzentration Raffination ^{1,4} | – | 9.520 | 8.586 |
| Gewichtetes Länderrisiko Bergbau ^{1,4} | –0,55 | –0,55 | –0,56 |
| Gewichtetes Länderrisiko Raffination ^{1,4} | – | –0,54 | –0,48 |
| Preis Neodym [US\$/kg] ⁵ | 20,33 | 60,74 | 90,93 |
| Preis Neodymoxid [US\$/kg] ⁵ | 15,31 | 49,60 | 72,05 |
| Preis Praseodymoxid [US\$/kg] ⁵ | 14,39 | 48,15 | 91,74 |
| Preis Terbium [US\$/kg] ⁵ | 589,43 | 718,26 | 1.356,06 |
| Preis Terbiumoxid [US\$/kg] ⁵ | 464,62 | 553,06 | 925,29 |
| Preis Dysprosium [US\$/kg] ⁵ | 95,06 | 310,29 | 698,65 |
| Preis Dysprosiumoxid [US\$/kg] ⁵ | 71,66 | 231,63 | 557,03 |

¹ alle Seltenerdoxide

³ umgerechnet aus der Oxidproduktion

⁵ min. 99%, fob China

² Kingsnorth 2015

⁴ zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter GLR

größten in Abbau stehenden Lagerstätte Bayan Obo/China aus (ELSNER 2011).

Die Datenlage zu einzelnen Seltenen Erden hat sich über die Jahre verbessert, dennoch liegen viele Angaben nur für alle Seltenen Erden gemeinsam vor (siehe Tab. 5.43). Aus der Tab. 5.43 geht auch hervor, dass die Länderkonzentration und das Länderrisiko der Produktion sehr hoch sind.

Die Ressourcen werden für 2011 mit ca. 308.137 kt Seltenerdoxide angegeben (BGR 2014a).

5.11.3 Verwendungen

Die Einsatzgebiete von Seltenen Erden sind sehr unterschiedlich, eine aktuellere Übersicht geben ROSKILL/KINGSNORTH und IMCOA in EUROPEAN COM-

Tab. 5.44: Weltweite Verwendung von Seltenen Erden 2012
(Quelle: EUROPEAN COMMISSION 2014a)

| Element | Magnete [t SEO] | Batterien [t SEO] | Metallurgie [t SEO] | FCC-Katalysator [t SEO] | PKW-Kat. [t SEO] | Andere Katalysatoren [t SEO] |
|------------------------|-----------------|-------------------|---------------------|-------------------------|------------------|------------------------------|
| Lanthan ¹ | | 8.185 | 3.085 | 13.950 | 450 | |
| Cer ¹ | | 1.275 | 8.490 | 800 | 5.965 | 1.250 |
| Praseodym ¹ | 3.600 | | 195 | | | |
| Neodym ¹ | 17.640 | | 480 | | 340 | |
| Samarium ¹ | 500 | | | | | |
| Europium ¹ | | | | | | |
| Gadolinium | 360 | | 290 | | | |
| Terbium | 70 | | | | | |
| Dysprosium | 835 | | | | | |
| Erbium | | | | | | |
| Yttrium | | | | | | |
| Ho, Tm, Yb, Lu | | | | | | |
| Summe | 23.005 | 9.460 | 12.540 | 14.750 | 6.755 | 1.250 |

| Element | Poliermittel [t SEO] | Glas [t SEO] | Leuchtstoffe [t SEO] | Keramik [t SEO] | Andere [t SEO] | Gesamt [t SEO] |
|------------------------|----------------------|--------------|----------------------|-----------------|----------------|----------------|
| Lanthan ¹ | 470 | 1.600 | 455 | 365 | 2930 | 31.490 |
| Cer ¹ | 16.375 | 5.500 | 1.690 | 365 | 3815 | 45.525 |
| Praseodym ¹ | 105 | | 570 | 365 | 110 | 4.945 |
| Neodym ¹ | 55 | 260 | 185 | 895 | 75 | 19.930 |
| Samarium ¹ | | | | | 15 | 515 |
| Europium ¹ | | | 410 | | 15 | 425 |
| Gadolinium | | | 230 | | 140 | 1.020 |
| Terbium | | | 205 | | 15 | 290 |
| Dysprosium | | | | | 15 | 850 |
| Erbium | | 390 | 135 | | 15 | 540 |
| Yttrium | | | 6.020 | 1600 | 30 | 7.650 |
| Ho, Tm, Yb, Lu | | | | | 75 | 75 |
| Summe | 17.005 | 7.750 | 9.900 | 3.590 | 7.250 | 113.255 |

¹ Leichte Seltenerdmetalle

MISSION 2014a, siehe Tab. 5.44. Das nicht stabile Promethium ist nicht mit aufgeführt; es wird in kg-Mengen künstlich erzeugt und dient in Radionuklid-Batterien der Energieversorgung von Satelliten (QUADBECK-SEEGER 2007).

Zukunftstechnologien

Die wichtigsten Zukunftstechnologien für Seltenerdmetalle mit hohem Wachstumspotenzial sind:

- Windkraftanlagen,

- Elektrische Traktionsmotoren für Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge,
- Hochleistungs-Permanentmagnete.

5.11.4 Bedarf der Seltenerdmetalle 2035

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 5.45 und Tab. 5.46 geschätzt worden.

Tab. 5.45: Bedarf Leichter Seltenerdmetalle für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

| Element | Technologie | Bedarf 2013 | Bedarf 2035 |
|--------------|---|---------------|---------------|
| La | SOFC | 10 | 80 |
| Ce | SOFC | 2 | 20 |
| Nd | Automatisches Pilotieren von Kfz | 0 | 16 |
| Nd | Micro-Energy Harvesting | 2,9 | 1.207 |
| Nd | Festkörper-Laser für die industrielle Fertigung | 0,04 | 0,3 |
| Nd/Pr | Hochleistungs-Permanentmagnete | 28.900 | 62.400 |
| Nd/Pr | Bedarfssumme | 28.903 | 63.624 |
| Nd/Pr | Bedarf/Produktion 2013 | 79 % | 174 % |
| La | Bedarfssumme | 10 | 80 |
| La | Bedarf/Produktion 2013 | 0 % | 0 % |
| Ce | Bedarfssumme | 2 | 20 |
| Ce | Bedarf/Produktion 2013 | 0 % | 0 % |

Zahlen zu Windkraftanlagen, Traktionsmotoren für E-PKW und E-Bikes sowie andere Anwendungen sind in den Angaben zu Hochleistungs-Permanentmagneten enthalten.

Tab. 5.46: Bedarf Schwerer Seltenerdmetalle für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

| Element | Technologie | Bedarf 2013 | Bedarf 2035 |
|--------------|---|--------------|--------------|
| Y | Automatisches Pilotieren von Kfz | 0 | 1.004 |
| Y | SOFC | 0,7 | 5 |
| Y | Festkörper-Laser für die industrielle Fertigung | 15,1 | 43,8 |
| Y | Hochtemperatursupraleiter | 0 | 0,9 |
| Dy | Micro-Energy Harvesting | 0,4 | 162,6 |
| Dy/Tb | Hochleistungs-Permanentmagnete | 2000 | 7.200 |
| Y | Bedarfssumme | 16 | 1.054 |
| Y | Bedarf/Produktion 2013 | 0,3 % | 19 % |
| Dy/Tb | Bedarfssumme | 2.000 | 7.363 |
| Dy/Tb | Bedarf/Produktion 2013 | 85 % | 313 % |

Zahlen zu Windkraftanlagen, Traktionsmotoren für E-PKW und E-Bikes sowie andere Anwendungen sind in den Angaben zu Hochleistungs-Permanentmagneten enthalten.

Für Leichte Seltenerdmetalle könnte der Bedarf in der Anwendung an Neodym und Praseodym auf 174 % der Produktion in der Hochleistungs-Permanentmagnete des Jahres 2013 ansteigen. Auch bei den Schweren Seltenerdmetallen sind die Per-

manentmagnete das Segment mit dem größten Verbrauch, dieser könnte bis zum Jahr 2035 bei Dysprosium und Terbium insgesamt auf 313 % der Produktion des Jahres 2013 ansteigen (vergleiche Tab. 5.46).

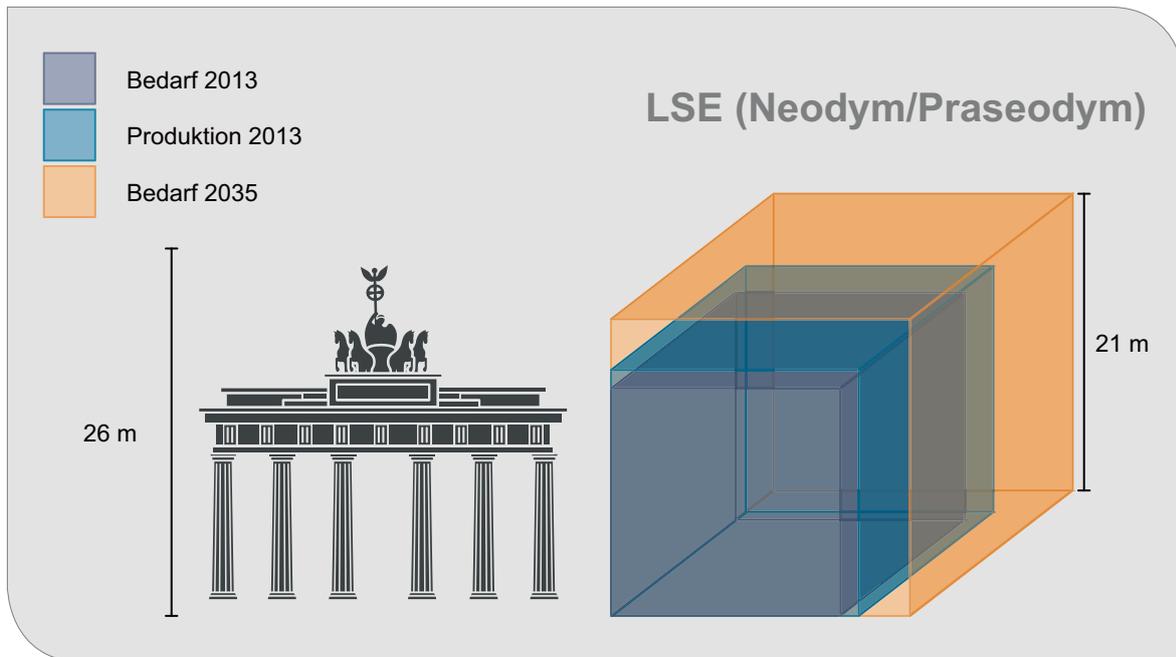


Abb. 5.11: Produktion 2013 und Bedarf von Neodym/Praseodym für Zukunftstechnologien 2013 und 2035



Abb. 5.12: Produktion 2013 und Bedarf von Dysprosium/Terbium für Zukunftstechnologien 2013 und 2035

5.12 Silber

Silber steht in der Münzmetall- bzw. Kupfergruppe des Periodensystems (Cu, Ag, Au) und zählt zu den Edelmetallen.

5.12.1 Eigenschaften

Silber leitet Wärme und Elektrizität unter allen Metallen am besten, so dass es beispielsweise in Kühlkörpern und Loten eingesetzt wird. Unter den wichtigsten technischen Eigenschaften sind auch Duktilität, Schmiedbarkeit und Reflexionsvermögen zu nennen, weshalb Spiegel durch Versilbern von Glas hergestellt werden (QUADBECK-SEEGER 2007, RÖMPP o. J.).

Silber oxidiert als edles Metall auch bei hoher Temperatur nicht an der Luft. Es wird in Legierungen mit Kupfer verwendet, um es zu härten, wobei es seinen Glanz beibehält. Silber wirkt zudem keimtötend, was v. a. in der Lebensmittelhygiene und

Medizin genutzt wird. Von der Lichtempfindlichkeit der Silberhalogenide, insbesondere des Silberbromids, macht man bei der Photographie Gebrauch.

5.12.2 Produktion und Vorkommen

Silber kommt als Hauptprodukt oder als wichtiges Beiprodukt in einer Vielzahl verschiedener Lagerstättentypen vor. Im Jahr 2013 stammten 29 % des gefördert Silbers aus Bergwerken mit Silber als Hauptprodukt. Als Nebenprodukt der Blei-/Zinkgewinnung wurden 38 %, als Nebenprodukt der Kupfergewinnung 20 % und als Nebenprodukt der Goldgewinnung 13 % des Silbers gewonnen (GFMS 2014).

Neuere Silbervorkommen sind im Verbund mit Goldlagerstätten entdeckt worden. In Zukunft werden jedoch Minerale der Basismetalle, die als Nebenprodukt Silber enthalten, zu einem bedeutenden Teil der Reserven und Ressourcen beitragen. Die heutige Förderung und die weltweiten Silberreserven befinden sich in zahlreichen Ländern, weshalb die Länderkonzentration und das Länderisiko als wenig kritisch einzustufen ist (Tab. 5.48).

Tab. 5.47: Eigenschaften von Silber

| | |
|---------------------------|-----------------------------|
| Dichte | 10,49 g/cm ³ |
| Schmelzpunkt | 960,8 °C |
| Elektrische Leitfähigkeit | 61,39 · 10 ⁶ S/m |
| Wärmeleitfähigkeit | 429 W/(m · K) |

Das Silberangebot lag im Jahr 2013 bei insgesamt 30.600 t. Dieses setzte sich aus Anteilen der Bergwerksförderung (26.241 t), recycelten Silber (ca. 6.000 t) und Silber aus der Auflösung von staatlichen Beständen und Beständen des Finanzmarktes zusammen (netto 1.050 t) (GFMS 2014).

Tab. 5.48: Versorgungssituation bei Silber 2006, 2010 und 2013

(Quelle: BGR 2015b, DERA 2014, USGS 2007g, 2011h, 2014j)

| | 2006 | 2010 | 2013 |
|---|---|--|--|
| Bergwerksförderung [t Inh.] | 20.102 | 23.481 | 26.241 |
| Raffinadeproduktion | – | – | – |
| Reserven [t Inh.] | 270.000 | 510.000 | 520.000 |
| Ressourcen [t Inh.] | – | – | – |
| Größte Bergbauländer | Peru 17 % Mexiko 15 %, China 12 % | Mexiko 19 % Peru 16 % China 13 % | Mexiko 22 % China 14 % Peru 14 % |
| Länderkonzentration Bergbau ¹ | 944 | 998 | 1.076 |
| Länderkonzentration Raffination | – | – | – |
| Gewichtetes Länderrisiko Bergbau ¹ | 0,19 | 0,11 | 0,04 |
| Gewichtetes Länderrisiko Raffination | – | – | – |
| Preis ² [US\$/troy] | 11,57 | 20,15 | 23,83 |

¹ zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter GLR, ² Silver: 99,5 %, fine, London, spot, in warehouse

5.12.3 Verwendungen

Der Silberbedarf stieg von 2002 bis 2013 von 25.371 t auf 30.600 t. Tab. 5.49 zeigt die Silberverwendung in den Jahren 2002, 2006 und 2011. Der Silberbedarf für Schmuck und Silberwaren sowie für die Photographie ist deutlich gesunken. Weitgehend stabile Anteile der Silbernachfrage haben Hartlegierungen, Katalysatoren, Spiegel/Reflexive Gläser, Batterien, Plasma-Bildschirme und Münzen. Ein kräftiges Wachstum erfuhr der Silbereinsatz in der Elektrik/Elektronik und einigen anderen industriellen Anwendungen, wie Solar-Paneele und Wasseraufbereitung. Einige Verwendungen, wie die als Lagermetall, in Röntgenfilmen und in Farbpapier, ließen sich nicht eindeutig zuordnen. Auch unter der Rubrik ‚andere‘ finden sich stark wachsende Teilmärkte.

In MEADER et al. (2013) wird die breite Anwendung von Silber für miniaturisierte Antennen in RFID-Transpondern in Pässen und zur Verfolgung (Tracking & Tracing) von Gütern hervorgehoben. Die gute Leitfähigkeit von Silber führt zu einem vermehrten Verbrauch in druckbaren Tinten, Computern, OLEDs u. a. Die antibakteriellen Eigenschaften

von Silber werden zunehmend, teilweise auch massenhaft in neuen Anwendungen genutzt, z. B. in Verbänden zur Wundversorgung, auf Mobiltelefonabdeckungen und zur Geruchsreduzierung in Kleidung (Alltag, Sport). Nanosilber gehört hier zu den Zukunftstechnologien.

Auch der Verkauf von Batterien und Brennstoffzellen, in denen Silber enthalten ist, wird in Zukunft weiter steigen. Silber-Zink-Akkumulatoren sind möglicherweise bald eine Konkurrenz für Lithium-Akkumulatoren, da sie bis zu 40 % mehr Energie speichern können. Auch alkalihaltige Brennstoffzellen könnten in Zukunft an Bedeutung gewinnen, da sie auch mit nicht-platinhaltigen Katalysatoren wie Silber und Gold funktionieren und somit für die Hersteller günstiger werden.

Zukunftstechnologien

Die wichtigsten silberhaltigen Zukunftstechnologien mit hohen Wachstumspotenzialen sind nach derzeitigen Erkenntnissen:

- Nano-Silber in antibakteriellen Anwendungen,

Tab. 5.49: Weltweite Entwicklung der Verwendung von Silber 2002, 2006 und 2011 (Werte für 2011 als Prognose von 2010; Quelle: FORTIS Bank 2008, 2010)

| Anwendungsbereich | 2002 [%] | 2006 [%] | 2011 [%] | Technologie- und Produktbeispiele |
|--------------------------|------------|------------|------------|---|
| Schmuck und Silberware | 42,0 | 29,8 | 25,5 | Juwelier- und Tafelsilber mit ca. 20 % Kupfer-Anteil |
| Photographie | 20,2 | 15,8 | 10,6 | Silberbromid in analoger Photographie |
| Elektrik/Elektronik | 17,7 | 20,4 | 23,3 | elektrische Kontakte |
| Hartlegierungen | 4,5 | 4,3 | 5,1 | Amalgam mit Quecksilber als Zahnfüllung |
| Katalysatoren | 5,6 | 5,1 | 5,1 | Umwandlung von Ethylen in Ethylenoxid (Polyestergrundstoff) |
| Spiegel/Reflexive Gläser | 1,8 | 1,7 | 2,5 | Silberbeschichtung von Scheiben zur Reflexion der Sonneneinstrahlung in Kfz |
| Solar-Paneele | 2,2 | 3,1 | 2,2 | Elektroden |
| Batterien | 1,9 | 1,7 | 2,7 | Silber/Zink-Akkumulatoren |
| Plasma-Bildschirme | 0,9 | 1,1 | 0,7 | |
| Wasseraufbereitung | 1,8 | 2,5 | 3,3 | antibakterielle Imprägnierung |
| Andere | 0,2 | 0,3 | 1,5 | Silberbasierte Leitpasten in RFID-Tags |
| ETF | 0,0 | 13,0 | 8,8 | Börsenhandel |
| Münzen | 1,3 | 1,1 | 8,6 | Münzsilber mit 5–50 % Kupfer und bis zu 20 % Zink |
| Gesamt | 100 | 100 | 100 | |

- Silber-Zink-Akkumulatoren in mobilen Informations- und Kommunikationstechnologien,
- Silber-Katalysatoren in alkalihaltigen Brennstoffzellen.

5.12.4 Silberbedarf 2035

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 5.50 geschätzt worden. Das untersuchte Segment der Zukunftstechnologien benötigt rund ein Fünftel der heutigen Bergwerksförderung von Silber. Diese Menge könnte sich bis 2035 auf 32 % der Bergwerksförderung des Jahres 2013 erhöhen.

Das größte Mengenwachstum der untersuchten Zukunftstechnologien bis 2035 ist beim essenziellen Einsatz von Silber für RFID-Tags zu erwarten, gefolgt vom Silberbedarf für bleifreie Weichlote, die bereits eine breitere Marktetablierung haben. Starkes Wachstum ist auch bei zahlreichen anderen Zukunftstechnologien zu erwarten, ihre absoluten Beiträge zur Silbernachfrage addieren sich zu nennenswerten, aber überschaubaren Mengen.

In der Verwendungsstruktur von Silber zählt nur die analoge Photographie mit einem Silberbedarf von 1.570 t im Jahr 2013 zu den auslaufenden Technologien. Die anderen Technologien werden

ihre Position vermutlich behaupten, so dass von diesen keine merkliche Entlastung der Silbernachfrage zu erwarten ist. Auch angesichts der sehr eingeschränkten Rezyklierbarkeit von Anwendungen wie Nanosilber und den RFID-Tags ist bis 2035 mit einer Nachfrageausweitung für Silber zu rechnen.

Tab. 5.50: Silberbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

| Technologie | Bedarf 2013 | Bedarf 2035 |
|--|--------------|--------------|
| Legierungen für den Airframe-Leichtbau | 0 | 160 |
| Bleifreie Lote | 5.400 | 5.200 |
| RFID – Radio Frequency Identification | 4 | 250 |
| Mikroelektrische Kondensatoren | 70 | 480 |
| Solarthermisches Kraftwerk | 12 | 536 |
| Nanosilber | 280 | 1.000 |
| Hochtemperatursupraleiter | 6 | 720 |
| Bedarfssumme | 5.772 | 8.347 |
| Bedarf/Rohstoffproduktion 2013 | 22 % | 32 % |

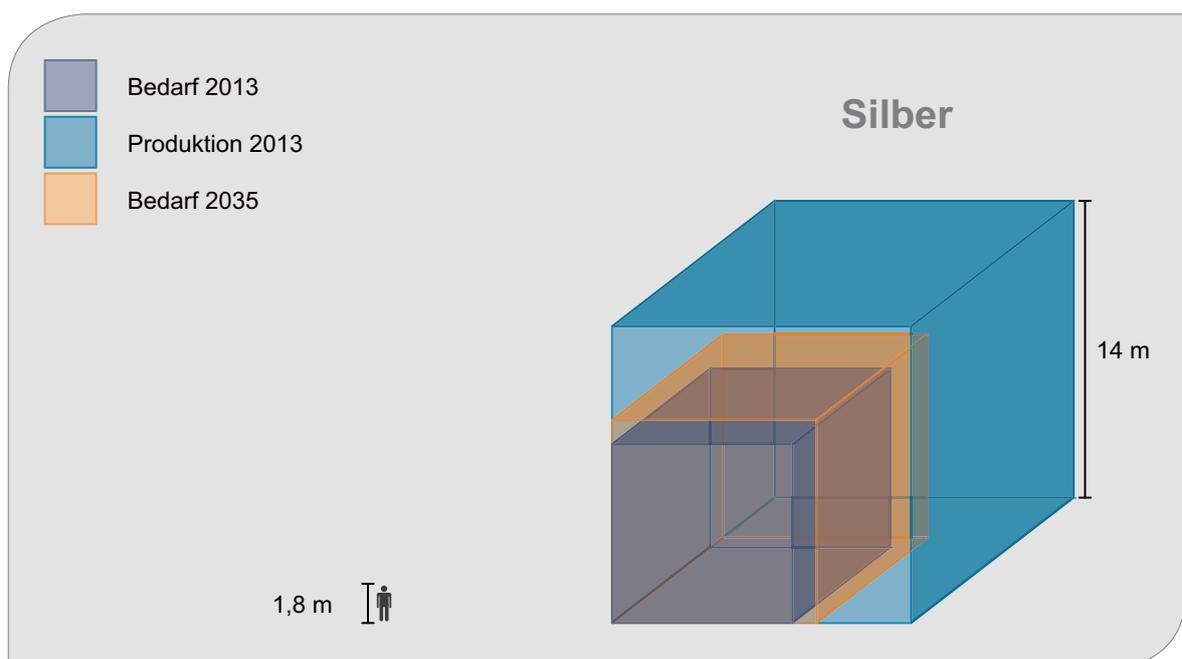


Abb. 5.13: Produktion 2013 und Bedarf von Silber für Zukunftstechnologien 2013 und 2035

5.13 Tantal

Tantal ist ein Element der 5. Nebengruppe des Periodensystems, in der es unterhalb von Vanadium und Niob steht.

5.13.1 Eigenschaften

Tantal ist ein platingraues und sehr korrosionsfestes Metall. Es ist auch bei hohen Temperaturen duktil. Tantal besitzt einen sehr hohen Schmelzpunkt gehört zu den sog. Refraktärmetallen, einer Gruppe von unedlen, hochschmelzenden Metallen, zu denen auch Titan oder das chemisch nahe verwandte Niob gehört.

Tab. 5.51: Eigenschaften von Tantal

| | |
|---------------------------|---------------------------|
| Dichte | 16,7 g/cm ³ |
| Schmelzpunkt | 2.996 °C |
| Elektrische Leitfähigkeit | 7,6 · 10 ⁶ S/m |
| Wärmeleitfähigkeit | 57 W/(m · K) |

5.13.2 Produktion und Vorkommen

Wichtigste Tantalerzminerale sind die Glieder der Mischkristallreihe Columbit-Tantalit (Fe,Mn)(Nb,Ta)₂O₆, gefolgt von Tapiolit FeTa₂O₆, Wodginit (Mn,Sn,Ti)Ta₂O₆ und Mikrolith Ca₂Ta₂O₆(O,OH,F) (ELSNER et al. 2010). In den Handel kommt Tantal als Erzkonzentrat unter dem Namen Tantalit mit 10–40 % Ta₂O₅. Coltan ist eine Abkürzung bzw. ein Lokalname für „Columbit-Tantalit“, eine Bezeichnung, die ursprünglich nur in Teilen Afrikas benutzt wurde, heute aber weiter verbreitet ist.

Tantalvorkommen finden sich vorwiegend in Afrika (z. B. DR Kongo, Ruanda und Nigeria), Brasilien und Australien (vergleiche Tab. 5.52).

5.13.3 Verwendungen

Die wichtigsten Verwendungen von Tantal weltweit sind in Tab. 5.53 dargestellt (nach ROSKILL in EUROPEAN COMMISSION 2014a).

Tab. 5.52: Versorgungssituation bei Tantal 2006, 2010 und 2013

(Quellen: BGR 2015b, DERA 2014, USGS 2007h, 2011i, 2014j)

| | 2006 | 2010 | 2013 |
|--|---|--|--|
| Bergwerksförderung [t Inh.] | 853 | 779 | 1.300 |
| Raffinadeproduktion [t Inh.] | – | – | – |
| Reserven [t Inh.] | 43.001 | 108.200 | 98.000 |
| Ressourcen [t Inh.] | – | – | – |
| Größte Bergbauländer | Australien 56 % Brasilien 21 % Kanada 7 % | Brasilien 23 % Ruanda 18 % DR Kongo 16 % | Ruanda 50 % Brasilien 15 % DR Kongo 14 % |
| Größte Raffinadeländer | – | – | – |
| Länderkonzentration Bergbau ¹ | 3.686 | 1.411 | 3.022 |
| Länderkonzentration Raffination | – | – | – |
| Gewichtetes Länderrisiko Bergbau ¹ | 0,84 | –0,67 | –0,35 |
| Gewichtetes Länderrisiko Raffination | – | – | – |
| Preis ² [US\$/kg Ta ₂ O ₅] | 64,99 | 121,18 | 236,73 |

¹ zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter GLR,

² Tantalite: concentrate, 30 % Ta₂O₅, cif China.

Tab. 5.53: Weltweite Verwendung von Tantal
(Quelle: ROSKILL in EUROPEAN COMMISSION 2014a)

| Anwendungsbereich | 2011 [%] |
|---|------------|
| Kondensatoren | 40 |
| Superlegierungen | 21 |
| Sputtertargets für Beschichtungsverfahren | 12 |
| Walzprodukte | 11 |
| Karbidhaltige Werkzeug- und Schneidstähle | 10 |
| Chemikalien | 6 |
| | 100 |

Zukunftstechnologien

Die wichtigsten tantalhaltigen Zukunftstechnologien mit hohen Wachstumspotenzialen sind:

- Mikroelektrische Kondensatoren,
- Superlegierungen.

5.13.4 Tantalbedarf 2035

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 5.54 geschätzt worden. Der Tantalbedarf für das untersuchte Segment der Zukunftstechnologien lag im Jahr 2013 bei 38 % der Bergwerksförderung. Der Bedarf könnte bis zum Jahre 2035 auf ca. 159 % der Bergwerksproduktion des Jahres 2013 anwachsen.

Tab. 5.54: Tantalbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

| Technologie | Bedarf 2013 | Bedarf 2035 |
|--|-------------|--------------|
| Mikroelektrische Kondensatoren | 128 | 1070 |
| Superlegierungen | 370 | 1.000 |
| Bedarfssumme | 498 | 2.070 |
| Bedarf/Bergwerksproduktion 2013 | 38 % | 159 % |

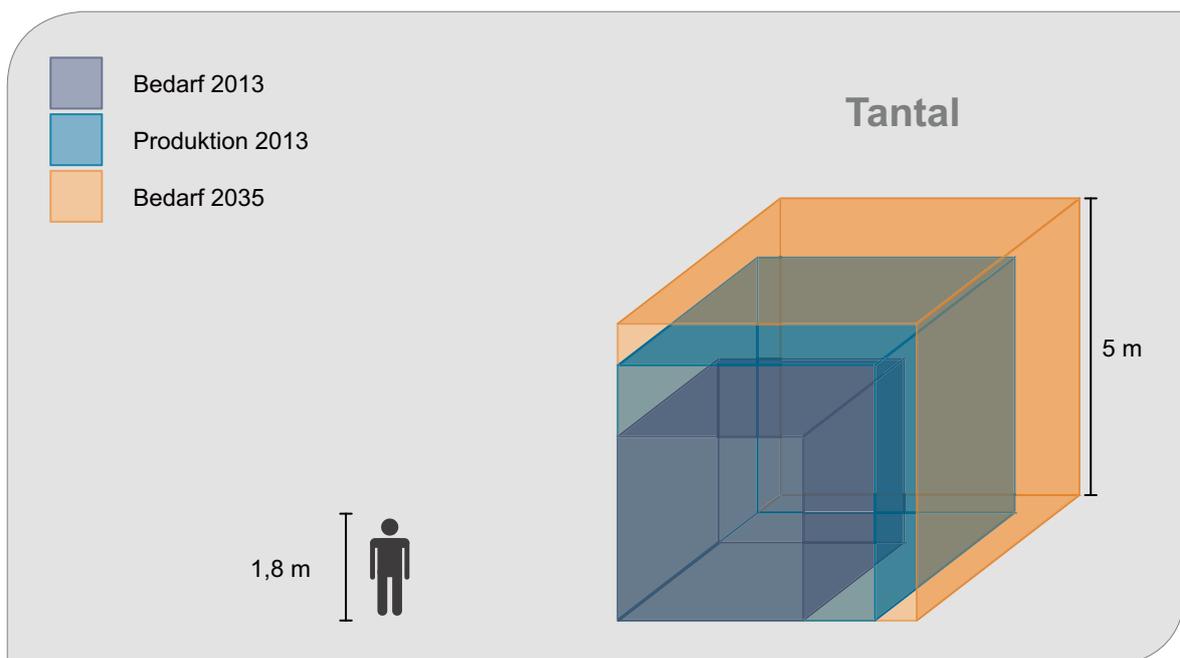


Abb. 5.14: Bergwerksproduktion 2013 und Bedarf von Tantal für Zukunftstechnologien 2013 und 2035

5.14 Titan

Titan ist ein Element der 4. Nebengruppe des Periodensystems (Titangruppe), in der es oberhalb von Zirconium und Hafnium steht.

5.14.1 Eigenschaften

Titan ist ein zähes, silbrig glänzendes Leichtmetall. Es gehört zu den sog. Refraktärmetallen, einer Gruppe von unedlen, hochschmelzenden Metallen, zu denen u. a. auch Zirkon, Vanadium oder Tantal gehören. Durch schon geringe Verunreinigungen ist Titan spröde, hart und nur bei Rotglut schmiedbar, reines Titan kann schon in der Kälte zu Blechen gewalzt werden (RÖMPP o. J). Am häufigsten wird Titan jedoch in oxidischer Form verwendet: TiO_2 findet aufgrund seiner hohen Licht-

brechung als Weißpigment große Verwendung (QUADBECK-SEEGER 2007).

5.14.2 Produktion und Vorkommen

Die wichtigsten Lagerstätten für Titan (Ilmenit, FeTiO_3 /Leukoxen und Rutil, TiO_2) sind Seifen, wobei auf Ilmenit rund 92 % der globalen Titanmineralproduktion entfallen (USGS 2013b). Die größten Reserven von Ilmenit und Rutil liegen in China, Australien und Indien (BGR 2014b), die Bergwerksförderung erfolgte 2013 vor allem in Australien, Südafrika und Kanada. Insgesamt ist die Länderkonzentration im Bergbau seit 2006 zurückgegangen (siehe Tab. 5.56).

5.14.3 Verwendungen

Die wichtigsten Verwendungen von Titan sind in Tab. 5.57 dargestellt (nach USGS in EUROPEAN COMMISSION 2014d). Es überwiegen Anwendungen des Titandioxids als Weißpigment in Farben, Kunststoffen etc. Nur ca. 8 % der geförderten Titanrohstoffe werden zu Metall verarbeitet (Carbide, Legierungen, Chemikalien und andere

Tab. 5.55: Eigenschaften von Titan

| | |
|---------------------------|---------------------------|
| Dichte | 4,5 g/cm ³ |
| Schmelzpunkt | 1.941 °C |
| Elektrische Leitfähigkeit | 2,5 · 10 ⁶ S/m |
| Wärmeleitfähigkeit | 22 W/(m · K) |

Tab. 5.56: Versorgungssituation bei Titan 2006, 2010 und 2013
(Quellen: BGR 2015b, DERA 2014, USGS 2007i, 2011j, 2014k, 2014l)

| | 2006 | 2010 | 2013 |
|---|--|--|--|
| Bergwerksförderung [t TiO_2] | 5.249.900 | 5.181.260 | 4.708.500 |
| Raffinadeproduktion [t Inh.] | 118.000 | 152.400 | 235.700 |
| Reserven [t Inh.] | 43.001 | 108.200 | 98.000 |
| Ressourcen [1.000 t TiO_2] | 2.000.000 | 2.000.000 | 2.000.000 |
| Größte Bergbauländer | Australien 30 % Südafrika 19 % Kanada 18 % | Australien 23 % Kanada 18 % Südafrika 18 % | Australien 24 % Südafrika 15 % Kanada 14 % |
| Größte Raffinadeländer | Japan 32 % Russland 20 % China 15 % | China 37 % Japan 21 % Russland 17 % | China 45 % Japan 21 % Russland 19 % |
| Länderkonzentration Bergbau ¹ | 1.724 | 1.386 | 1.286 |
| Länderkonzentration Raffination | | | |
| Gewichtetes Länderrisiko Bergbau ¹ | 0,92 | 0,75 | 0,59 |
| Gewichtetes Länderrisiko Raffination | | | |
| Preis ² [US\$/kg Ti] | 16,63 | 6,76 | 6,24 |

¹ zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter GLR,

² Ferro-Titanium, basis 70 % Ti, max. 4,5 % Al, del. Europ. consumers' works

Anwendungen). Titanmetall wurde 2012 nach Einschätzung des USGS (2013c) zu 72 % im Bereich der Luftfahrt verwendet.

Tab. 5.57: Verwendung von Titan (Metall plus Oxid) in den USA (Quelle: USGS 2013b)

| Anwendungsbereich | 2012 [%] |
|--------------------------------------|------------|
| Farben | 56 |
| Kunststoffe | 27 |
| Papier | 9 |
| Carbide, Legierungen und Chemikalien | 5 |
| Andere | 3 |
| | 100 |

Zukunftstechnologien

Die wichtigste titanhaltige Zukunftstechnologie mit hohen Wachstumspotenzialen ist:

- Meerwasserentsalzung.

5.14.4 Titanbedarf 2035

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 5.58 geschätzt worden. Die betrachteten Zukunftstechnologien benötigten 2013 ca. 4 % der Titan-Raffinadeproduktion. Der Bedarf könnte bis zum Jahre 2035 auf ca. 17,5 % der Raffinadeproduktion von 2013 anwachsen.

Tab. 5.58: Titanbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

| Technologie | Bedarf 2013 | Bedarf 2035 |
|--|--------------|---------------|
| Mikroelektrische Kondensatoren | 122 | 800 |
| Micro-Energy Harvesting aus der Umgebungsenergie [als Titan] | 0,3 | 126 |
| Meerwasserentsalzung | 8.100 | 39.000 |
| Medizinische Implantate | 820 | 1.240 |
| Bedarfssumme | 9.042 | 41.166 |
| Bedarf/Raffinadeproduktion 2013 | 3,8 % | 17,5 % |

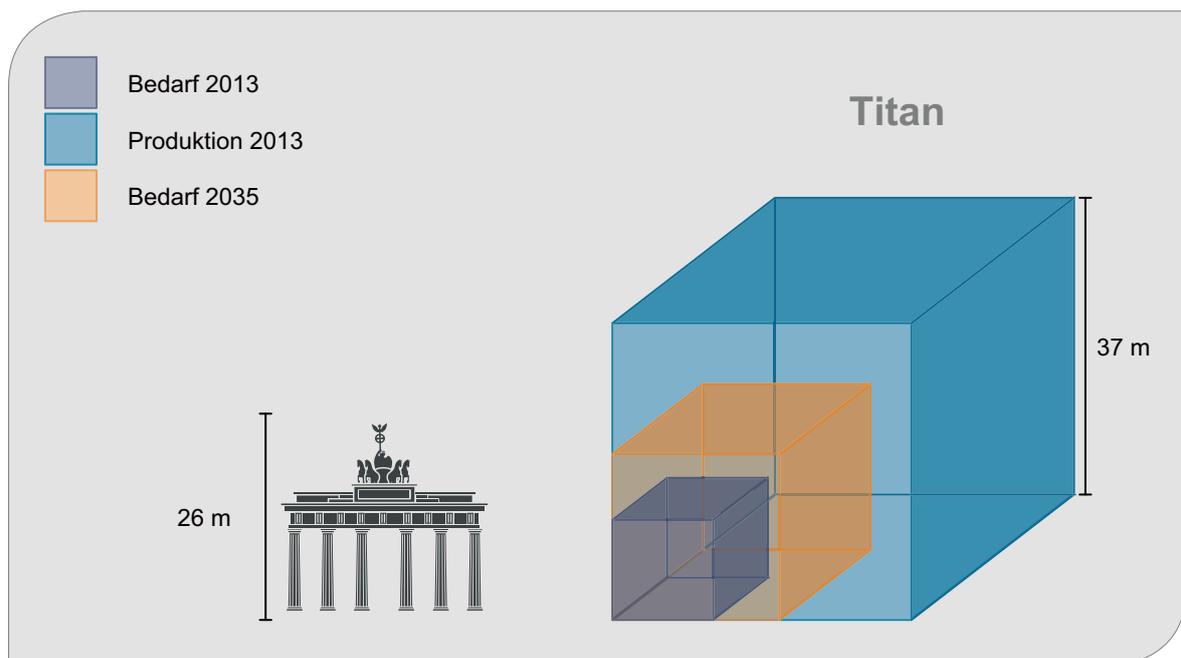


Abb. 5.15: Raffinadeproduktion 2013 und Bedarf von Titan für Zukunftstechnologien 2013 und 2035

5.15 Zinn

Zinn steht in der vierten Hauptgruppe des Periodensystems der Elemente, der Kohlenstoffgruppe, gleich unter den Halbleitern Silicium und Germanium.

5.15.1 Eigenschaften

Zinn hat einen für Metalle sehr niedrigen Schmelzpunkt. Es sieht durch seine Oxidschicht grau aus und lässt sich mit Kupfer zu Bronze legieren. Es besitzt drei Modifikationen, die bei unterschiedlichen Temperaturen stabil sind (QUADBECK-SEEGER 2007).

Tab. 5.59: Eigenschaften von Zinn

| | |
|---------------------------|---------------------------|
| Dichte | 7,3 g/cm ³ |
| Schmelzpunkt | 231,9 °C |
| Elektrische Leitfähigkeit | 8,7 · 10 ⁶ S/m |
| Wärmeleitfähigkeit | 67 W/(m · K) |

5.15.2 Produktion und Vorkommen

Zinn kommt in der Natur hauptsächlich in Form von Zinndioxid, dem Mineral Kassiterit (SnO₂), auch als Zinnstein bezeichnet, vor. Kassiterit ist das wirtschaftlich bedeutendste Erzmineral der industriellen Zinnengewinnung und kann sowohl in Festgesteinslagerstätten, als auch in Sedimenten, sog. Seifen, angereichert sein (ELSNER 2014). Die wichtigsten Förderländer sind Indonesien und China. Die Raffinadeproduktion wird von China dominiert, gefolgt von Indonesien, Malaysia und Peru (Tab. 5.60).

5.15.3 Verwendungen

Die Tab. 5.61 zeigt die Verwendung von Raffinadzinn im Jahr 2013. Die Verwendungen als Lötzinn, in Weißblech und in Chemikalien benötigten 90 % des Gesamtbedarfs.

Tab. 5.60: Versorgungssituation bei Zinn 2006, 2010 und 2013
(Quellen: DERA 2014, BGR 2015b, USGS 2007j, 2011k, 2014m)

| | 2006 | 2010 | 2013 |
|---|--|---|---|
| Bergwerksförderung [t Inh.] | 306.240 | 290.675 | 289.790 |
| Raffinadeproduktion [t Inh.] | 369.623 | 371.516 | 362.996 |
| Reserven [t Inh.] | 6.065.200 | 5.200.200 | 4.681.600 |
| Ressourcen [t Inh.] | – | – | – |
| Größte Bergbauländer | Indonesien 39 % China 34 % Peru 13 % | Indonesien 37 % China 33 % Peru 12 % | Indonesien 32 % China 30 % Myanmar 11 % |
| Größte Raffinadeländer | China 39 % Indonesien 21 % Peru 11 % | China 40 % Indonesien 20 % Malysia 10 % | China 45 % Indonesien 18 % Malysia 9 % |
| Länderkonzentration Bergbau ¹ | 2.878 | 2.660 | 2.189 |
| Länderkonzentration Raffination ¹ | 2.181 | 2.288 | 2.533 |
| Gewichtetes Länderrisiko Bergbau ¹ | –0,55 | –0,42 | –0,48 |
| Gewichtetes Länderrisiko Raffination ¹ | –0,34 | –0,31 | –0,28 |
| Preis ² [US\$/t] | 8.772,80 | 20.396,10 | 22.308,91 |

¹ zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter GLR,

² min. 99.85 %, LME, cash, in LME warehouse

Tab. 5.61 Weltweite Verwendung von Raffinadezinn
(Quelle: ITRI in ELSNER 2014)

| Anwendungsbereich | 2013 [%] |
|-----------------------------|------------|
| Lötzinn | 52 |
| Weißblech | 16–17 |
| Chemikalien | 23 |
| Bronze bzw. Gusslegierungen | 5–6 |
| Flachglasherstellung | 2 |
| Andere | 0–2 |
| | 100 |

Zukunftstechnologien

Die wichtigsten zinnhaltigen Zukunftstechnologien sind:

- Bleifreie Lote,
- Windkraftanlagen.

5.15.4 Zinnbedarf 2035

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 5.62

geschätzt worden. Der Bedarf der untersuchten Segmente der Zukunftstechnologien im Jahr 2013 liegt bei etwa 50–60 % der gesamten Bergwerks- bzw. Raffinadeproduktion an Zinn. Die Menge des benötigten Zinns in bleifreien Loten wird bis 2035 zurückgehen, weshalb, trotz Zunahme des Bedarfs für Windkraftanlagen, die Bedarfssumme rückläufig sein wird.

Tab. 5.62: Zinnbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

| Technologie | Bedarf 2013 | Bedarf 2035 |
|--|----------------|----------------|
| Bleifreie Lote | 173.400 | 133.600 |
| Mikroelektrische Kondensatoren | 30 | 210 |
| Micro-Energy Harvesting aus der Umgebungsenergie | 0,2 | 77,2 |
| Windkraftanlagen | 8.096 | 19.186 |
| Bedarfssumme | 181.526 | 153.073 |
| Bedarf/Bergwerksproduktion 2013 | 63 % | 53 % |
| Bedarf/Raffinadeproduktion 2013 | 50 % | 42 % |

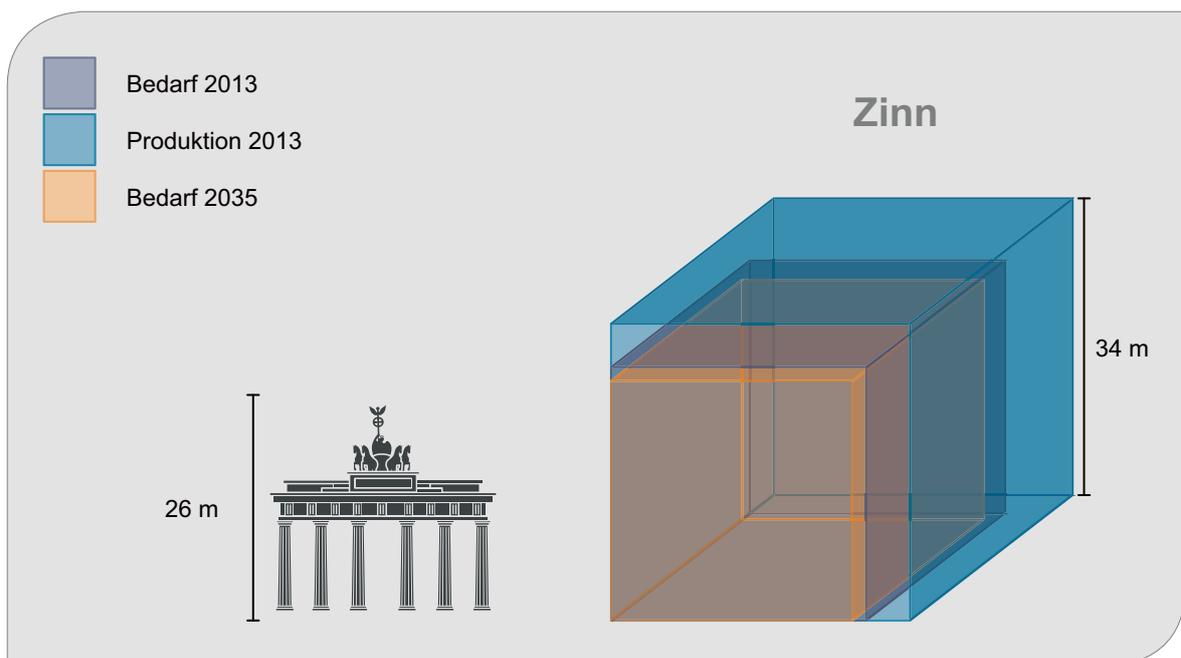


Abb. 5.16: Bergwerksproduktion 2013 und Bedarf von Zinn für Zukunftstechnologien 2013 und 2035

6 Schlussfolgerungen

Zur besseren Abschätzung von möglichen langfristigen Preis- und Lieferrisiken ist eine fundierte und aktuelle Wissensbasis über mögliche Nachfrageentwicklungen von Rohstoffen nötig, die von rohstoffintensiven- und sensitiven Schlüssel- und Zukunftstechnologien ausgeht. Schlüssel- und Zukunftstechnologien umfassen einerseits Effizienzsteigerungen in bestehenden Systemen (z. B. konventionelle Kraftwerkstechnologie oder Steigerung der Werkstoffeffizienz in unterschiedlichen Branchen), aber andererseits auch in potentiell ganz neuen Technologiesystemen (z. B. zur Erzeugung alternativer Energie oder neue Fahrzeug-Antriebssysteme). Sie lösen dabei revolutionäre Innovationsschübe über die Grenzen einzelner Wirtschaftssektoren aus.

Hierzu wurde 2009 die Studie „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“ im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter Federführung des Fraunhofer Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Zukunftstechnologiebewertung Berlin (IZT) erstellt. Die Studie führte dazu, dass die erheblichen Wissensdefizite hinsichtlich des Rohstoffbedarfs für Zukunftstechnologien gemildert werden konnten. Da die Innovationsgeschwindigkeit in den meisten Branchen beständig zunimmt, erfolgte mit der vorliegenden Studie eine Aktualisierung des Wissenstands zum Rohstoffbedarf des technologischen Wandels.

Die hier zusammengestellten Schlussfolgerungen ergeben sich aus den Ergebnissen der Zukunftsszenarien, wobei im Falle mehrerer Szenarien in der Regel das realistischste und plausibelste ausgewählt wurde. Diese dürfen jedoch nicht als gesicherte Prognosen der Zukunft interpretiert werden. Vielmehr zeigen Szenarien Entwicklungsmöglichkeiten auf.

Rohstoffrelevanz der detailliert betrachteten Technologien

Tab. 6.1 fasst die Ergebnisse der detaillierten Technologiebetrachtungen zusammen. Sie enthält eine Abschätzung der Marktreife einzelner Technologien, den potentiellen Rohstoffbedarf und eine Einschätzung des Recyclingpotenzials im Jahr 2035. Unter „Markt 2035“ wird das Verhältnis

von Marktvolumen 2035 zum insgesamt erwarteten Marktpotential der Technologie abgeschätzt. Das Ergebnis wird in drei Kategorien, „Einführung“ (< 25 %), „Durchdringung“ (25–75 %) und „Sättigung“ (> 75 %), bewertet.

Der „Rohstoffbedarf 2035“ der jeweiligen Technologie an einem bestimmten Rohstoff wird nach seinem Verhältnis zur weltweiten Primärproduktion dieses Rohstoffs 2013 eingeordnet: als rohstoffintensiv werden Technologien charakterisiert, von denen vermutet wird, dass sie bei mindestens einem Massenrohstoff (Commodity) eine Nachfragesteigerung von mehr als 25 % der heutigen Weltproduktion dieses Rohstoffs auslösen. Als rohstoffsensibel werden Technologien charakterisiert, die bei mindestens einer Rohstoffspezialität eine Nachfragesteigerung von mehr als 100 % der heutigen Weltproduktion dieses Rohstoffs bewirken. Spezialitäten sind Rohstoffe mit einer Weltproduktion von bis zu einigen 1.000 t/a. Dazu zählen aus dem Projektportfolio die Rohstoffe Indium, Gallium, Germanium, Yttrium, Scandium, Neodym, Tantal und die Platinmetalle. Zu den Massenrohstoffen zählen Eisen und Stahl, Kupfer, Chrom, Kobalt, Zinn, Antimon, Titan, Niob, Silber und andere. Technologien können nach dieser Definition zugleich rohstoffintensiv und rohstoffsensitiv sein.

Beim Recycling wird unter „Recyclingpotential“ zwischen wirtschaftlich in vollem Umfang möglich („ja“), wirtschaftlich eingeschränkt möglich („eingeschränkt“), wirtschaftlich nicht möglich („nein“) und technisch/praktisch nicht möglich („nein, dissipativ“) aufgrund dissipativer Verluste (z. B. Abrieb, feine Verteilung bei Nanosilber) unterschieden.

Die in Tab. 6.1 farblich gekennzeichneten 16 Technologien sollten bei Folgestudien in jedem Fall erneut vertieft betrachtet werden. Gründe dafür können

- eine voraussichtlich hohe Auswirkung auf die Rohstoffnachfrage,
- eine hohe Innovationsdynamik oder
- eine unzureichende Datenlage (insbesondere bei sehr neuen Technologien)

der jeweiligen Technologie sein.

| Zukunftstechnologie | | Rohstoffe | | Stand der Technik 2013 | | | Markt 2035 | | | Rohstoffbedarf 2035 | | | Recyclingpotenzial 2035 | | | | |
|---|---|--|--|------------------------|-------------|----------|------------|------------|---------------|---------------------|------------|------------------|-------------------------|----|---------------|------|------------------|
| | | | | Forschung | Entwicklung | Prototyp | Im Markt | Einführung | Durchdringung | Sättigung | Unkritisch | Rohstoffintensiv | Rostoffsensitiv | Ja | Eingeschränkt | Nein | Nein, dissipativ |
| Energie-, Elektro- und Antriebstechnik | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | Ultraeffiziente industrielle Elektromotoren | Cu | | | | | X | | X | | X | | | X | | | |
| 17 | Thermoelektrische Generatoren | Te, Sb, Ge, Ag, Bi, Pb, Si, Hf, Zr, Mn, Co, Ni, Fe, Sn, Sb, Ru | | | X | | | X | | | | X | | | X | | |
| 18 | Farbstoffsolarzellen | Ru (Farbstoff); Ti (Träger); Sn, In, Pt, Ag (Elektrode) | | | X | | | X | | | X | | | | X | | |
| 19 | Dünnschicht-Photovoltaik | Halbleiter: Cu, In, Se, Ga, Te, Cd, | | | | X | | | | X | | | | | X | | |
| 20 | Solarthermisches Kraftwerk | Al, Ag (Spiegel) | | | X | | | | | | X | | | | X | | |
| 21 | SOFC – Stationäre Brennstoffzellen | Y, Zr, Sc (Feststoffelektrolyt); Y, Zr, Sc, Ni, La, Sr, Mn (Elektrode) | | | X | | | X | | | | X | | | X | | |
| 22 | CCS – Carbon Capture and Storage | Cr, Ni, Co, Mn, Mo, V, Nb (Hochwarmfester Stahl) | | X | | | | | X | | | X | | | X | | |
| 23 | Lithium-Ionen-Hochleistungs-Elektrizitätsspeicher für PKW | Li; Co, Mn (Kathode) | | | | | X | | | | | | | | X | | |
| 24 | Redox-Flow-Speicher | Cr, V | | | X | | | | X | | | X | | | X | | |
| 25 | Vakuuminisolation | Si (Kern); Al (Hülle); bleifreie Lote (Fenster) | | X | | | | | X | | | X | | | X | | |
| 26 | Induktive Übertragung elektrischer Energie | Cu | | | | | X | | | | | X | | | X | | |
| 27 | Thermische Speicher | K, Na, Li, Ca, Si | | | | | X | | | | | X | | | X | | |
| 28 | Micro-Energy Harvesting aus der Umgebungsenergie | Sb, Se, Sn, Cr, Ti, Cu, Nd, Dy, Co | | | | | X | | | | X | | | | X | | |
| 29 | Windkraftanlagen | Nd, Dy, Tb, Pr (Magnete/Generator); Cu | | | | | X | | | | | | | | X | | |

Relevanz der ausgewählten Rohstoffe für Zukunftstechnologien

Zur Einschätzung der Bedeutung bestimmter Rohstoffe für Zukunftstechnologien dient ein Indikator, der den Bedarf des jeweiligen Metalls für die betrachteten Zukunftstechnologien im Jahr 2035 ins Verhältnis zur gesamten globalen Primärproduktion dieses Metalls im Jahr 2013 setzt. Tab. 6.2 fasst die Indikatorwerte für die näher betrachteten Metalle zusammen. Abb. 6.1 veranschaulicht die Ergebnisse.

Für fünf Metalle könnte der Bedarf in 2035 allein für die betrachteten Zukunftstechnologien in der Größenordnung der Primärproduktion 2013 oder darüber liegen: Germanium, Kobalt, Scandium, Tantal, Neodym/Praseodym. Für weitere drei Metalle könnte der Bedarf in 2035 für die analysierten Zukunftstechnologien sogar mehr als das Doppelte der Primärproduktion 2013 ausmachen: Lithium, Dysprosium/Terbium und Rhenium.

Die Ergebnisse in der Tab. 6.2 haben sich gegenüber der Vorgängerstudie Angerer et al. (2009) aus verschiedenen Gründen geändert:

- Die in die Berechnung eingehende unterstellte Produktionsmenge einzelner Metalle, vor allem Gallium und Scandium, ist im Basisjahr 2013 deutlich größer als 2006.
- Es sind seit 2009 Effizienzverbesserungen auf Produkt- und Produktionsebene erzielt worden und es haben sich Substitutionstechnologien auf Material- und Technologieebene durchgesetzt. So kommen heute beispielsweise Brennstoffzellen mit erheblich weniger Platin oder LEDs mit weniger Gallium aus als früher unterstellt. Dies betrifft auch Zinn und Indium.
- In der Vorgängerstudie wurde eine Entwicklung über 24 Jahre betrachtet (2006–2030), in der vorliegenden Studie sind es 22 Jahre (2013–2035).

Tab. 6.2: Globaler Rohstoffbedarf für die analysierten 42 Zukunftstechnologien im Jahr 2013 und 2035 im Verhältnis zur Weltproduktionsmenge des Metalls 2013. Der über die betrachteten Zukunftstechnologien hinaus bestehende Rohstoffbedarf ist nicht berücksichtigt.

| Metall | Bedarf _{20xx} /Produktion ₂₀₁₃ | | Zukunftstechnologien |
|-------------------------------|--|------|------------------------------------|
| | 2013 | 2035 | |
| Lithium | 0,0 | 3,9 | Lithium-Ionen-Akku, Air-Frame Lei. |
| Schwere Seltene Erden (Dy/Tb) | 0,9 | 3,1 | Magnete, E-PKW, Windkraftanlagen |
| Rhenium | 1,0 | 2,5 | Superlegierungen |
| Leichte Seltene Erden (Nd/Pr) | 0,8 | 1,7 | Magnete, E-PKW, Windkraftanlagen |
| Tantal | 0,4 | 1,6 | Mikrocondensatoren, Medizintechnik |
| Scandium | 0,2 | 1,4 | SOFC-Brennstoffzellen |
| Kobalt | 0,0 | 0,9 | Lithium-Ionen-Akku, XtL. |
| Germanium | 0,4 | 0,8 | Glasfaser, IR- Technologie |
| Platin | 0,0 | 0,6 | Brennstoffzellen, Katalyse |
| Zinn | 0,6 | 0,5 | Transparente Elektroden, Lote |
| Palladium | 0,1 | 0,5 | Katalyse, Meerwasserentsalzung |
| Indium | 0,3 | 0,5 | Displays, Dünnschicht-Photovoltaik |
| Gallium | 0,3 | 0,4 | Dünnschicht-Photovoltaik, IC, WLED |
| Silber | 0,2 | 0,3 | RFID |
| Kupfer | 0,1 | 0,3 | Elektromotoren, RFID |
| Titan | 0,0 | 0,2 | Meerwasserentsalzung, Implantate |

Anmerkung: die Ergebnisse in dieser Tabelle sind nicht mit der Vorgängerstudie Angerer et al. (2009) zu vergleichen, da sie sich auf einen anderen Zeitraum (22 statt 24 Jahre), ein anderes Basisjahr (2013 statt 2006), ein anderes Technologieportfolio (42 statt 32) und neuere Erkenntnisse zur Innovationsdynamik beziehen.

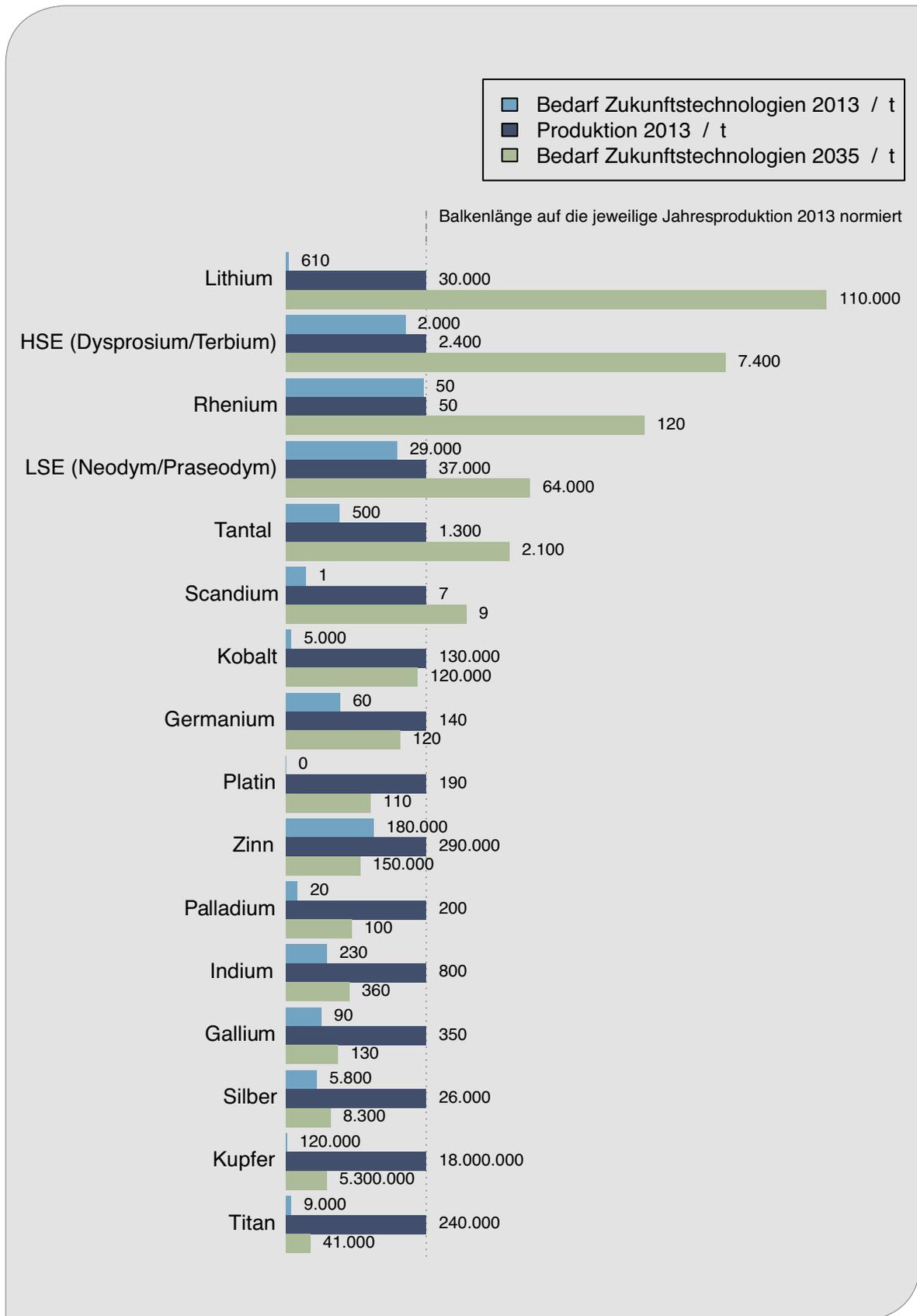


Abb. 6.1: Bedarf unterschiedlicher Rohstoffe für ausgewählte Zukunftstechnologien (Schätzungen für 2013 und 2035) im Vergleich zur Primärproduktion der jeweiligen Rohstoffe im Jahr 2013

- Während wir bei ANGERER et al. (2009) insgesamt 32 Technologien untersucht haben, sind es in der vorliegenden Studie 42.
- Die Datenlage bei den Technologien hat sich deutlich gebessert, beispielsweise musste für die Vorgängerstudie auf Literatur-Daten oder auf Verbräuche ineffizienter Laborprozesse zurückgegriffen werden, jetzt konnten Daten aus der Produktion bzw. aus empirischen Analysen von Produkten verwendet werden (betrifft vor allem Gallium und Indium).
- Bei der vorliegenden Studie konnte für Technologien auf globale Marktstudien zurückgegriffen werden, die 2009 noch nicht vorlagen. Damals mussten daher eigene Abschätzungen gemacht werden. Das ist vor allem für Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) bedeutsam, da hier Innovationszyklen schnell aufeinander folgen.

Vergleich mit der Entwicklung der Rohstoffförderung der letzten 20 Jahre

In der Tabelle sind die mittleren jährlichen Wachstumsraten (CAGR) und das gesamte Wachstum von 1993 bis 2013 für die Produktion verschiedener Metalle dargestellt. Die jährlichen Wachstumsraten liegen zwischen 0,7 % bei Titan und 8,9 % pro Jahr für Indium (vergleiche Tab. 6.3). Entsprechend hat sich die Produktion in den 20 Jahren von 1993 bis 2013 für Titan um den Faktor 1,1 und für Indium um den Faktor 5,5 (bzw. 550 %) gesteigert. Das Weltwirtschaftswachstum ist in den Jahren 1993–2013 um durchschnittlich 2,8 % pro Jahr gewachsen und hat sich damit um den Faktor 1,75 erhöht (IWF o. J.).

Eine Erhöhung des Bedarfs um 100 % und mehr für einzelne Zukunftstechnologien stellt einen wesentlichen Faktor bei der zukünftigen Entwicklung der Rohstoffnachfrage dar, kann aber ggf. durch entsprechende Produktionsausweitung ausgeglichen werden. Neue Technologien können die Nachfrage metallischer Rohstoffe aber auch reduzieren, wie Verbundwerkstoffe demonstrieren: So kann im Automobilbau der Einsatz von Carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) den Stahlbedarf reduzieren.

Es gehört zu ihren Eigenschaften, dass Innovationen jederzeit unvorhersehbar auftreten und die Abschätzungen in Tab. 6.2 und Abb. 6.1 radi-

Tab. 6.3: Entwicklung der globalen Rohstoffproduktion ausgewählter Metalle von 1993 bis 2013 (Quelle: BGR 2015b)

| Metall | CAGR %/a | Steigerungsfaktor von 1993–2013 |
|-------------------|----------|---------------------------------|
| Aluminium (R) | 4,5 | 2,4 |
| Eisen (B) | 5,7 | 3,0 |
| Germanium (R) | 6,2 | 3,3 |
| Indium (R) | 8,9 | 5,5 |
| Kobalt (B) | 8,6 | 5,2 |
| Kupfer (B) | 3,4 | 2,0 |
| Kupfer (R) | 3,5 | 2,0 |
| Lithium (B) | 4,8 | 2,6 |
| Palladium (B) | 3,3 | 1,9 |
| Platin (B) | 1,4 | 1,3 |
| Rhenium (B) | 3,5 | 2,0 |
| Seltene Erden (B) | 2,8 | 1,7 |
| Silber (B) | 2,8 | 1,7 |
| Tantal (B) | 6,5 | 3,5 |
| Titan (B) | 0,7 | 1,1 |
| Zinn (B) | 2,2 | 1,5 |
| Zinn (R) | 2,6 | 1,7 |

B: Bergwerksförderung

R: Raffinadeproduktion

kal verändern können, sowohl in Richtung eines höheren, aber auch in Richtung eines niedrigeren Bedarfs.

Maßnahmen zur Rohstoffsicherung

Wie bedeutend Maßnahmen zur Versorgungssicherung für einzelne Rohstoffe sind, wird in Forschungsarbeiten zur Rohstoffkritikalität untersucht (NRC 2008, GLÖSER 2012, GRAEDEL et al. 2012, ERDMANN & GRAEDEL 2011, DERA 2014). Die in dieser Studie ermittelte Relevanz der Rohstoffe für Zukunftstechnologien ist ein wichtiger Aspekt, der dabei zu berücksichtigen ist.

Eine auf den jeweiligen Rohstoff und die jeweilige Technologie angepasste Kombination verschiedener Maßnahmen kann dazu beitragen, eine langfristige Sicherung der Rohstoffversorgung zu garantieren. Dazu kommen für die Wirtschaft folgende Maßnahmen in Betracht:

- Ausbau und Effizienzsteigerung von Erzbau bzw. Metallgewinnung,
- Substitution auf Material- und Technologieebene,
- Ressourceneffizienz in Produktion und Anwendung,
- Recycling, gewährleistet durch recyclinggerechtes Design, Rückführungsstrategien und effiziente Recyclingtechnologien.

Welche Möglichkeiten zur Rohstoffsicherung bestehen, sollte inhärenter Bestandteil der Grundüberlegungen bei der Entwicklung neuer Technologien sein. Momentan wird, insbesondere bei teuren Spezialmetallen, bereits in der frühen Entwicklungsphase an Substitution und Ressourceneffizienz geforscht, weil daraus direkte ökonomische Vorteile resultieren. Der ökonomische Nutzen des Recyclings erscheint weniger direkt, so dass ein recyclinggerechtes Design, Rückführungsstrategien und effiziente Recyclingtechnologien selten bei der Entwicklung neuer Technologien bedacht werden. Politische Maßnahmen können dafür sorgen, dass vorausschauende Unternehmen profitieren und die Versorgung für die Gesamtwirtschaft bestmöglich gesichert wird.

Aktuelle Rohstoffpreise sind abhängig von vielen Faktoren, unter anderem von vorübergehenden Ungleichgewichten zwischen Angebot und Nachfrage, aber auch von kurzfristigen Spekulationen und politischen Restriktionen. Sie sind kein Maß für die langfristige physische oder ökonomische Verfügbarkeit eines Rohstoffs und sollten daher nicht allein Basis langfristiger zukunftsrelevanter Entscheidungen sein. Vielmehr sollte sich die deutsche Wirtschaft bemühen, ihre Abhängigkeit von den internationalen Rohstoffmärkten zu reduzieren, indem sie die ihr verfügbaren Möglichkeiten im Bereich Substitution, Ressourceneffizienz und Recycling voll ausschöpft und ihre Lieferquellen breit diversifiziert.

7 Quellen

3DRUCK.COM (2016): MakerBot Replicator 2 Desktop 3D-Drucker (Update). – URL: <http://3druck.com/drucker-und-produkte/makerbot-replicator-2-desktop-3d-drucker-045927> [Stand 16. März 2016].

3DGRENZENLOS (2016): Unter 500 Euro: 20 3D-Drucker, die weniger kosten als ein Apple iPhone 5. Veröffentlicht am 21. Juli 2015. – URL: <http://www.3d-grenzenlos.de/magazin/3d-drucker/20-3d-drucker-fuer-unter-500-euro-27119713.html> [Stand 16. März 2016].

AAOS – AMERICAN ACADEMY OF ORTHOPAEDIC SURGEONS (2010): Knee replacement implants. – URL: <http://orthoinfo.aaos.org/topic.cfm?topic=a00221> [Stand 17.11.2015].

AAOS – AMERICAN ACADEMY OF ORTHOPAEDIC SURGEONS (2015a): Total hip replacement. – URL: <http://orthoinfo.aaos.org/topic.cfm?topic=A00377> [Stand 17.11.2015].

AAOS – AMERICAN ACADEMY OF ORTHOPAEDIC SURGEONS (2015b): Total knee replacement. – URL: <http://orthoinfo.aaos.org/topic.cfm?topic=a00389> [Stand 17.11.2015].

AAOS – AMERICAN ACADEMY OF ORTHOPAEDIC SURGEONS (1998): Case price bidding cuts joint replacement cost. – URL: <http://www2.aaos.org/aaos/archives/acadnews/98news/case-21.htm> [Stand 17.11.2015].

ADAC – ALLGEMEINER DEUTSCHER AUTOMOBIL-CLUB (2013): Elektroautos: Marktübersicht/Kenndaten. – URL: http://www.adac.de/_mmm/pdf/27373_46583.pdf [Stand 12.11.2013].

AHMAD, Z. (2003): The Properties and Application of Scandium-Reinforced Aluminum. – The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), 55: 35–39. – URL: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11837-003-0224-6> [Stand 14.11.2015].

AHRENS, T. (2004): Die Umstellung auf bleifreie Elektronikfertigung. Veranstaltungsreihe Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie ISIT; Itzehoe.

AIRBUS (2014): Global Market Forecast. Flying on demand 2014-2033. – URL: <http://www.airbus.com/company/market/forecast> [Stand 18.03.2015].

AIRBUS GROUP (2015): Scalmalloy: Aluminum-Magnesium-Scandium Alloy. – URL: <http://www.technology-licensing.com/etl/int/en/What-we-offer/Technologies-for-licensing/Metallics-and-related-manufacturing-technologies/Scalmalloy.html> [Stand 14.11.2015].

AIRBUS (2015): Passenger Aircraft A380. Dimensions and key data. – URL: <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a380family/specifications> [Stand 05.04.2016].

AIRWISE (2013): Aluminium Makers Fight Plastic Planes With New Alloys. – URL: <http://news.airwise.com/story/view/1371778684.html> [Stand 14.11.2015].

AL BARAZI, S., ELSNER, H., KÄRNER, K., LIEDTKE, M., SCHMIDT, M., SCHMITZ, M., SZURLIES, M. (2016): Mineralische Rohstoffe in Australien – Investitions- und Lieferpotenziale. – DERA Rohstoffinformationen, 29; Berlin.

ALLEGHENY LUDLUM (1999): Corrosion-Resistant Titanium Alloys. Technical Data Sheet. – Pittsburgh.

ALTFahrzeugV (2013): Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen. Fassung in der Bekanntmachung vom 21.06.2002 (BGBl. I S. 2214), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 05.12.2013 (BGBl. I S. 4043) geändert worden ist.

ALUMINIUM-MESSE (2014): Flugzeug-Hersteller fliegen auf Aluminium. – URL: <http://www.aluminium-messe.com/Pressemitteilung/Flugzeug-Hersteller-fliegen-auf-Aluminium/n71/> [Stand 14.11.2015].

AMBERLY, A. (2014): Worldwide Germanium Market Analysed and Forecast by Merchant Research & Consulting in its In-demand Report. Vocus PRW Holdings. – URL: <http://www.prweb.com/releases/2014/11/prweb12318305.htm> [Stand 07.12.2015].

- AMIN, N., KAMARUZZAMAN, S.M. & MAKOTO, K. (2007): Numerical modeling of CdS/CdTe and CdS/CdTe/ZnTe solar cells as a function of CdTe thickness. – *Solar Energy Materials and Solar Cells* 91(13): 1202–1208.
- ANGERER, G. (2007): Zukunftsmarkt synthetische Biokraftstoffe. – Fallstudie im Auftrag des Umweltbundesamtes im Rahmen des Forschungsprojektes Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern, Umweltbundesamt; Dessau. – URL: <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/zukunftsmarkt-synthetische-biokraftstoffe> [Stand 01.12.2015].
- ANGERER, G. (2016): Elektrische Kupferleitungen im Hochbau. – In: Strukturelle und produktionstechnische Determinanten der Ressourceneffizienz. – Studie des Ifeu & Fraunhofer ISI gemäß Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Kennzahl 3712 93 321. Umweltbundesamt, Dessau.
- ANGERER, G., MARSCHIEDER-WEIDEMANN, F., LÜLLMANN, A., ERDMANN, L., SCHARP, M., HANDKE, V. & MARWEDE, M. (2009a): Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. – Studie des Fraunhofer ISI und IZT. Fraunhofer-IRB-Verl., Stuttgart.
- ANGERER, G., MARSCHIEDER-WEIDEMANN, F., WENDL, M. & WIETSCHL, M. (2009b): Lithium für Zukunftstechnologien. Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität. – Studie des Fraunhofer ISI. – URL: http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/n/de/publikationen/Lithium_fuer_Zukunftstechnologien.pdf [Stand 05.04.2016].
- ANGERER, G., MOHRING, A., MARSCHIEDER-WEIDEMANN, F. & WIETSCHL, M. (2010): Kupfer für Zukunftstechnologien. Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität. – Studie des Fraunhofer ISI. – URL: http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e/de/publikationen/Bericht_FSEM_Cu.pdf [Stand 05.04.2016].
- ANZALONE, G.C., ZHANG, C., WIJNEN, B., SANDERS, P.G. & PEARCE, J.M. (2013): A Low-Cost Open Source Metal 3-D Printer. – IEEE. – Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2013.2293018.
- ARCELOR MITTAL (2013): Tailored Blanks. Sustainability in steel. – URL: <http://automotive.arcelormittal.com/tailoredblanks> [Stand 10.12.2015].
- ASTM F2792-12A (2012): Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. – URL: <http://www.astm.org> [Stand 27.04.2015].
- AUDI (Ed.) (2013): 20 Jahre Audi Space Frame – Siegeszug begann auf der IAA. – URL: http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/info_center/de/news/2013/09/Audi_Space_Frame.html [Stand 05.04.2016].
- AUDI (2008): ASR – Die Revolution im automobilen Leichtbau. – Werbeprospekt.
- AUDI (2015): Audi Magazin No. 02/2015, Ingolstadt.
- AUTO.DE (Ed.) (2012): Neuer Elektroantrieb setzt auf hohe Drehzahlen – Keine dauerhafte Erregung. – URL: <http://www.auto.de/magazin/Neuer-Elektroantrieb-setzt-auf-hohe-Drehzahlen-Keine-dauerhafte-Erregung> [Stand 23.11.2015].
- AUVSI – ASSOCIATION FOR UNMANNED VEHICLE SYSTEMS INTERNATIONAL (2013): The Economic Impact of Unmanned Aircraft Systems Integration in the United States. – URL: <http://www.auvsi.org/auvsiresources/economicreport> [Stand 16.04.2015].
- AVK – INDUSTRIEVEREINIGUNG VERSTÄRKTEN KUNSTSTOFFE E.V. (2013): Composites Market Report 2013. Market developments, trends, challenges and opportunities. – Frankfurt.
- AXT (o. J.): Undoped GaAs. – URL: <http://www.axt.com/site/index.php?q=node/38> [Stand 03.12.2014].
- BÄCKER, M. (2012): Rohstoffeffizienz supraleitender Systeme. – Zukunft und Innovation der Energietechnik mit Hochtemperatur-Supraleitern, ZIEHL III. – URL: http://www.ivsupra.de/images/ziehl/zielvortraege_2012/ZIEHL-2012-D-Nano-Michael-Baecker-Rohstoffeffizienz.pdf [Stand 05.04.2016].

- BAECHLER, C., DEVUONO, M. & PEARCE, J.M. (2013): Distributed Recycling of Waste Polymer into RepRap Feedstock. – *Rapid Prototyping Journal* 19(2): 118–125.
- BARLEV, D., VIDU, R. & STROEVE, P. (2011): Innovation in concentrated solar power. – In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95(10): 2703–2725, DOI: 10.1016/j.solmat.2011.05.020.
- BARTOS, R. (2014): Leichtere Autos aus Stahl – die Kombination macht's! – *stahl-blog.de*. – URL: <http://www.stahl-blog.de/index.php/leichtere-autos-aus-stahl-die-kombination-machts> [Stand 05.04.2016].
- BAST, U., BLANK, R., BUCHERT, M., ELWERT, T., FINSTERWALDER, F., HÖRNIG, G., KLIER, T., LANGKAU, S., MARSCHEIDER-WEIDEMANN, F., MÜLLER, J.-O., THÜRIGEN, CH., TREFFER, F. & WALTER, T. (2015): Abschlussbericht zum Verbundvorhaben „Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtriebwerken“. Kennwort: MORE (Motor Recycling). – FKZ: 03X4622. Bundesministerium für Bildung und Forschung.
- BAUER, C., HOFER, J., ALTHAUS, H.J., DEL DUCE, A. & SIMONS, A. (2015): The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework. – *Applied Energy* 157: 871–883. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.01.019.
- BAYER, F. (2013): Leichtbau im Fahrzeugbau. Leichte Metalle, Fertigungsverfahren und Potentiale für die Automobilbranche. – In: WEYRICH, M. (Hrsg.): *Technologien der Fertigungsautomatisierung*. ISSN 2195-9986. Siegen.
- BDEW – BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT (2013): Zahl der Ladepunkte nimmt weiter zu. – *Presseinformation vom 28.10.2013*, Berlin.
- BDI – BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN INDUSTRIE (2016): Implikationen des 3D-Drucks für die Rohstoffsicherung der deutschen Industrie. Positionspapier: 7 S; Berlin. – URL: http://bdi.eu/media/themenfelder/rohstoffe/publikationen/20151022_Positionspapier_3D-Druck_Rohstoffsicherung.pdf
- BEDDER, J. & BAYLIS, R. (2013): Into the melting pot: the superalloy market and its impact on minor metals. – *Minor Metals Conference 28.2.2013*, Roskill Information Services Ltd. London. – URL: http://www.roskill.com/reports/minor-and-light-metals/news/download-roskills-paper-on-the-superalloy-and-minor-metal-markets/at_download/attachment1 [Stand 08.11.2015].
- BEHRENDT, S., FICHTER, K., NOLTE, R., KAMBUROW, C., ANTES, R. & NEUHÄUSER, V. (2008): Nachhaltigkeitsinnovationen in der Display-Industrie – Aktivierung von Umweltentlastungspotenzialen durch Akteurskooperationen in der Display-Branche. – Studie des IZT. Berlin.
- BELFORTE, D. A. (2012): A record year for industrial lasers. *2011 Annual Economic Review and Forecast*. – URL: <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-27/issue-1/features/2011-annual-economic-review-and-forecast.html> [Stand 05.04.2016].
- BENECKE, S., RÜCKSCHLOSS, J., NISSEN, N. F. & LANG, K.-D. (2013): Effects of increasing functionality on environmental impacts for the case of thermo- and piezoelectric energy harvesting systems. – *Conference Proceedings EcoDesign, 8th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, JeJu Island, Korea.
- BENECKE, S. (2014): Schulungsunterlagen AMA-Seminar ‚Autarke Funksensoren‘, Berlin.
- BERGER, R. (2013): Additive manufacturing. A game changer for the manufacturing industry? – Roland Berger Strategy Consultants. München.
- BESI – BE SEMICONDUCTOR INDUSTRIES N.V. (2015): Meco Flex Antenna Plating System. – URL: <http://www.besi.com/products-technology/product-details/product/meco-fap/show> [Stand 05.04.2016].
- BETHUNE, D.S., JOHNSON, R.D., SALEM, J.R., DE VRIES, M.S. & YANNONI, C.S. (1993): Atoms in carbon cages: the structure and properties of endohedral fullerenes. – *Nature* 366: 123–128.
- BETZENDAHL, R. (2014): The 2014 Rare Gases Market Report. – *CryoGas International*: 28–30.
- BEUCKER, S. & FICHTER, K. (2007): Trends und Rahmenbedingungen für das Innovationssystem Farbstoffsolarzelle – *Perspektive 2020*. Studie des

Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit, Berlin.

BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (1989): Resources of fuel and other materials essential for fusion. – Hannover.

BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2004): Bundesrepublik Deutschland – Rohstoffsituation 2003. – Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien; Hannover.

BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2006): Bundesrepublik Deutschland – Rohstoffsituation 2005. – Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien Heft XXXIV; Hannover.

BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2007): Bundesrepublik Deutschland – Rohstoffsituation 2006. – Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien Heft XXXVI; Hannover.

BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2008): Bundesrepublik Deutschland – Rohstoffsituation 2007. – Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien Heft XXXVII; Hannover.

BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2014a): Titan. – Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe. – URL: www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohstoffsteckbrief_ti.pdf [Stand 14.02.2016].

BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2014b): Seltene Erden. – Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe. – URL: www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohstoffsteckbrief_se.html [Stand 16.02.2016].

BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2015a): Deutschland - Rohstoffsituation 2014. – URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/Rohsit-2014.pdf [Stand 27.01.2016].

BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2015b): Fachinformationssystem Rohstoffe. – unveröff., Hannover.

BINDER, H. (1999): Lexikon der chemischen Elemente: Das Periodensystem in Fakten, Daten und Zahlen. – 870 S., S. Hirzel Verlag; Stuttgart.

BINE INFORMATIONSDIENST (2007): Kohlendioxid abtrennen und lagern. – URL: <http://www.bine.info/publikationen/publikation/kohlendioxid-abtrennen-und-lagern> [Stand 05.04.2016].

BINE INFORMATIONSDIENST (2009): Latentwärmespeicher in Gebäuden. Wärme und Kälte kompakt und bedarfsgerecht speichern. – URL: <http://www.bine.info/publikationen/publikation/latentwaermespeicher-in-gebaeuden/> [Stand 05.04.2016].

BINE INFORMATIONSDIENST (2011a): Supraleitende Strombegrenzer im Kraftwerk. – URL: <http://www.bine.info/publikationen/publikation/supraleitende-strombegrenzer-im-kraftwerk> [Stand 05.04.2016].

BINE INFORMATIONSDIENST (2011b): Supraleiter für große Windenergieanlagen. Die Abhängigkeit von seltenen Erden lässt sich vermindern. – URL: <http://www.bine.info/> [Stand 30.04.2014].

BINE INFORMATIONSDIENST (2014): Supraleiter geht in den Testbetrieb. – URL: <http://www.bine.info/newsuebersicht/news/supraleiter-geht-in-den-testbetrieb> [Stand 30.04.2014].

BLASER, S.A. (2006): Environmental Risk Analysis for Silver-containing Nano-functionalized Products. Diplomarbeit. ETHZ, Zürich.

BMW (2014a): BMW treibt Entwicklung von Systemen für induktives Laden von Elektro- und Plug-in-Hybrid-Fahrzeugen voran. Presseinformation vom 08.07.2014. BMW Group Unternehmenskommunikation, München.

BMW – BAYERISCHE MOTOREN WERKE (2014b): Der neue BMW i8. Produktkatalog der BMW AG, München.

BMW – BAYERISCHE MOTOREN WERKE (2014c): Der neue BMW i3. Produktkatalog der BMW AG, München.

BMW i – BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (Hrsg.) (2007): Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. – Studie des RWI Essen, Fraunhofer ISI, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).

- BMW – BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (2014): Auswirkungen der weltweiten Konzentrierung in der Bergbauproduktion auf die Rohstoffversorgung in der deutschen Wirtschaft. – Bericht Nr. 463 – Kurzfassung. Berlin.
- BOEING (2015): Current Market Outlook 2015–2034. – URL: www.boeing.com/cmo [Stand 16.11.2015].
- BOMBARDIER (2015): Market Forecast 2015–2034. – URL: www.bombardier.com/content/dam/Websites/bombardiercom/supporting-documents/BA/Bombardier-Aerospace-20150614-Commercial-Aircraft-Market-Forecast_2015-34_V13.pdf [Stand 16.11.2015].
- BONESMART.ORG (2015a): Knee implants. – URL: <http://bonesmart.org/knee/knee-implants> [Stand 17.11.2015].
- BONESMART.ORG (2015b): Knee replacement implant materials. – URL: <http://bonesmart.org/knee/knee-replacement-implant-materials> [Stand 17.11.2015].
- BONESMART.ORG (2015c): Total knee replacement implants. – URL: <http://bonesmart.org/knee/total-knee-replacement-implants/> [Stand 17.11.2015].
- BONIOL, F., NOULARD, E. & WIELS, V. (2014): Towards new avionics for UAVs. Presentation at Aerial Robotics, 02.-03.10.2014.
- BOSCH (2014): Doppelbatterie für den Stromspeicher Braderup. Pressemitteilung vom 27.05.2014. – URL: <http://www.bosch-presse.de/presseforum/details.htm?txtID=6876&locale=de> [Stand 13.08.2015].
- BOURELL, D.L. (2014): Overview of Materials Used in Additive Manufacturing. NSF Workshop: Environmental Implications of Additive Manufacturing. Arlington VA, 14.10.2014.
- BOURHIS, F., KERBRAT, O., HASCO, J.-Y. & MOGNOL, P. (2013): Sustainable manufacturing: evaluation and modeling of environmental impacts in Additive manufacturing. – The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 69 (9): 1927–1939.
- BÖTTNER, H. (2004): New Thermoelectric Components Using Microsystem Technologies. – Journal of Microelectromechanical Systems, 13(3): 414–420.
- BÖTTNER, H. (2007): Thermoelektrische Multitalente. – Physik Journal 6: 35–41.
- BP (2014): BP Energy Outlook 2035. London.
- BP (2015): BP Energy Outlook 2035. – URL: http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2015/Energy_Outlook_2035_booklet.pdf [Stand: 15.11.2015]
- BRADSHAW, A.M., REUTER, B. & HAMACHER, T. (2013): The Potential Scarcity of Rare Elements for the Energiewende. – Green 3(2): 93–111. DOI: 10.1515/green-2013-2014.
- BRAND, L., GIERLINGS, M., HOFFKNECHT, A. & WAGNER, V. (2009): Kohlenstoff-Nanoröhren: Potenziale einer neuen Materialklasse für Deutschland. – Zukünftige Technologien, 79: 172 S.; Düsseldorf.
- BROSCH, P.F. (2013): Synchron-Reluktanzmotoren erreichen Effizienzklasse IE4. Effizienzklasse IE4 auch ohne Permanentmagnete realisierbar. – Energie 2.0 Kompendium 2013: 198–201.
- BRUMBYA, A., VERHELSTB, M. & CHERET, D. (2007): Recycling GtL – a New Challenge. – Cobalt News (02/07): 5–6. – URL: http://www.thecdi.com/cdi/images/news_pdf/Cobalt_News_Apr07.pdf [Stand 05.04.2016].
- BRÜNGLINGHAUS, C. (2013): Strom aus Abgasen: thermoelektrische Generatoren. Springer. – URL: <http://www.springerprofessional.de/strom-aus-abgasen-thermoelektrische-generatoren/3739946.html> [Stand 27.11.2015].
- BRUNOT, A. & CHARREYRON, V. (2013): Internal report summarising the results of energy sector analysis. CRM_InnoNet Consortium (Hrsg.). – URL: <http://www.criticalrawmaterials.eu/wp-content/uploads/D-4.1-Internal-report-summarising-the-results-of-the-energy-sector.pdf> [Stand 01.12.2015].
- BSB – BAUHERREN-SCHUTZBUND (Hrsg.) (2013): Dämmstoff ABC. Tipps für private Bauherren zur Wärmedämmung. – URL: https://www.bsb-ev.de/fileadmin/user_upload/ratgeber_aktuell/

Ratgeber_aktuell_28_Daemmstoff-ABC_2013.pdf [Stand 05.04.2016].

BÜCHEL, K.H., MORETTO, H.-H. & WODITSCH, P. (1999): Industrielle Anorganische Chemie. – Verlag Wiley-VCH; Weinheim.

BUCHERT, M. (2011): Rare Earths - a Bottleneck for Future Wind Turbine Technologies? Wind turbine supply chain and logistics. – Vortrag vom 29.08.2011. Öko-Institut e. V. Berlin.

BUCHERT, M., MANHART, A., BLEHER, D. & PINGEL, D. (2012): Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten. – LANUV-Fachbericht 38. Öko-Institut e. V., Freiburg.

BUCHKREMER, H.P. (2008): Interview mit BUCHKREMER, H. P., Forschungszentrum Jülich, „SOFC“, geführt von MARWEDE, M., Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 11.09.2008.

BULLIS, K. (2011): Ultracapacitors to Boost the Range of Electric Cars. New energy-storage technology could surpass today's batteries in capacity and durability. – URL: <http://www.technologyreview.com/news/423914/ultracapacitors-to-boost-the-range-of-electric-cars> [Stand 05.04.2016].

BUND – BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND (2009): Nano-Silber – der Glanz täuscht. Immer mehr Konsumprodukte trotz Risiken für Umwelt und Gesundheit. – URL: http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/publikationen/nanotechnologie/20091202_nanotechnologie_nanosilber_studie.pdf [Stand 06.04.2016].

BURCHHARDT, U. (2008): Interview mit BURCHHARDT, U., Vattenfall AG, Projektleiter, Oxyfuel Pilotanlage Schwarze Pumpe, geführt von MARWEDE, M., Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 05.08.2008.

BURKHARDT, M. (2008): Auswaschung von Bioziden aus Fassaden. Vortrag bei der Fachtagung „Biozide und Nanopartikel in Fassaden“, Dübendorf.

BURKHARDT, Y., SCHLEICHER, K. & KLÖPZIG, M. (2014): A novel hybrid excited synchronous machine for (H)EV applications. – In: IEEE (Ed.): International Conference on Electrical Machines (ICEM) 353–359; Berlin.

BURTON, M. (2014): As solder orders dry up, tin price tumble likely to deepen. Unter Mitarbeit von TAYLOR, M., PULLIN, R. (Hrsg). Thomson Reuters. – URL: <http://www.reuters.com/article/metals-tin-demand-idUSL6N0S40EC20141014> [Stand 11.12.2015].

BUSH, S. (2006): Transparent inkjet conductor method uses antimony tin oxide to cut costs. – Electronics Weekly, 22.11.2006. – URL: <http://www.electronicweekly.com/Home/Default.aspx> [Stand 24.06.2008].

BUSINESS WIRE (2014): Research and Markets: Global and Chinese Optical Fiber Preform Industry Report, 2012-2015. – URL: <http://www.businesswire.com/news/home/20130704005265/en/Research-Markets-Global-Chinese-Optical-Fiber-Preform#.VHSbtWMhBHc> [Stand 05.04.2016].

BÜTTNER, C. (2008): Interview mit BÜTTNER, C., Autoliv Inc., geführt von MARWEDE, M., Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 24.06.2008.

CANALYS (2015): Global 3D printing market to reach \$20.2 billion in 2019. Palo Alto, Shanghai, Singapore and Reading (UK), 2015. – URL: <http://www.canalys.com/newsroom/global-3d-printing-market-reach-202-billion-2019> [Stand 27.04.2015].

CANDELISE, C., SPIERS, J.F. & GROSS, R.J.K. (2011): „Materials availability for thin film (TF) PV technologies development: A real concern?“ Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, Nr. 9 (2011): 4972–4981.

CAO, A.Y., DICKRELL, P.L., SAWYER, W.G., GHASEMI-NEJHAD, M.N. & AJAYAN, P.M. (2005): Super-compressible. Foamlite carbon nanotube films. Science 310: 1307–1310.

CDI – COBALT DEVELOPMENT INSTITUTE (2004): Battery Recycling - A perspective from a nickel and cobalt producer. Cobalt News 04/4, Oktober 2004, S. 7–11. Cobalt Development Institute. Guildford, UK, – URL: <http://www.thecdi.com/cobaltnews.php> Stand [22.10.2015].

CDI – COBALT DEVELOPMENT INSTITUTE (2006): Cobalt Facts. Cobalt in Chemicals. – URL: <http://www.thecdi.com/cdi/images/documents/facts/>

- COBALT_FACTS-Chemicals%202015.pdf [Stand 22.10.2015].
- CDI – COBALT DEVELOPMENT INSTITUTE (2008): Cobalt in Electronics. Cobalt Development Institute. Guildford, UK.
- CDI – COBALT DEVELOPMENT INSTITUTE (2015): Cobalt Facts. Cobalt Supply and Demand 2014. – URL: <http://www.thecdi.com/cdi/images/documents/facts/Cobalt%20Facts%20-%20Supply%20%20Demand%20-%202014.pdf> [Stand 22.10.2015].
- CEMEP – EUROPEAN COMMITTEE OF MANUFACTURERS OF ELECTRICAL MACHINES AND POWER ELECTRONICS (Ed.) (2011): Electric Motors and Variable Speed Drives. Standards and legal requirements for the energy efficiency of low-voltage three-phase motors. – European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics; Frankfurt.
- CHANCEREL, P., DEUBZER, O., NISSEN, N.F. & LANG, K. (2012): From CRT to flat displays - Consequences for collection and recycling. – In: LANG, K.-D., Nissen, N. F., Middendorf, A., Chancerel, P. (Eds.): Electronics Goes Green 2012+: Taking green to the next level: Proceedings of the Joint International Conference and Exhibition: September 9-12, 2012, Berlin. – Fraunhofer Verlag; Stuttgart.
- CHAU, K.T. & LI, W. (2014): Overview of electric machines for electric and hybrid vehicles. – International Journal of Vehicle Design 64: 46–71.
- CHEMIE.DE (Ed.) (2016): Tantal. – URL: <http://www.chemie.de/lexikon/Tantal.html> [Stand 25.02.2016].
- CHEN, Q., CHEN, Z., SHI, L., LI, X., ZHOU, G. & ZHANG, Y. (1996): Preparation of zinc sulfide thin films by the hydrothermal method. – Thin Solid Films, 272: 1–3.
- CIA – CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY (2015): The World Fact Book. 2015. – URL: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/fields/2097.html?countryName=&countryCode=®ionCode=n> [Stand 03.12.2015].
- CLIFTON, A. (2013): Material Challenges for the Aerospace Sector. – Presentation for COST Symposium: Materials in a resource-constrained world, 18.-19.11.2013, Delft. – URL: <http://www.cost.eu/events/materials> [Stand 17.08.2015].
- CLINTON GLOBAL INITIATIVE (2008): Solar Thermal Power Commitment 2007. – URL: <http://commitments.clintonglobalinitiative.org/projects.htm?mode=view&rid=209734> [Stand 25.09.2008].
- CM (2008): Cobalt and Cobalt Alloys. Edited by Key to Metals AG. Zürich. – URL: <http://www.key-to-metals.com> [Stand 25.10.2008].
- COHEN, D. (2011): Revision rates for metal on metal hip joints are double that of other materials. In: BMJ (British Medical Journal) 343: S. d5977.
- COHERENT LASERSYSTEMS (2010): Excimer Laser. Photonic Stamps with Micron Resolution. In: Photonics Handbook. – URL: <http://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?Tag=Lasers&AID=25164> [Stand 22.04.2015].
- COHERENT LASERSYSTEMS (2013): Anwendungsbericht der Coherent LaserSystems GmbH & Co. KG: Kilowatt-UV-Linienlaser zur Kristallisation amorpher Siliziumschichten. – Photonik 6: 14.
- COLOMINA, I. & MOLINA, P. (2014): Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 92: 79–97.
- CONDUCTIX (2011): Praxistest zum kabellosen Laden von Elektrofahrzeugen von Daimler und Conductix-Wampfler. Pressemitteilung von Conductix-Wampfler AG vom 05.12.2011; Weil am Rhein. – URL: <http://www.conductix.de/de/aktuelles/2012-02-23/praxistest-zum-kabellosen-laden-von-elektrofahrzeugen-von-daimler-und-conductix-wampfler> [Stand 19.02.2015].
- CONDUCTIX (2012): Induktives Ladesystem von Conductix Wampfler. Heise Autos Online. – URL: <http://www.heise.de/autos/artikel/Induktive-Lade-konzepte-von-Conductix-Wampfler-1612803.html?artikelseite=2> [Stand 19.02.2015].
- CONSÉE, M.R. (2014): Die Zukunft der Löttechnik ist mikrolegiert. Clever gemixt: Der richtige Draht zum Kunden. – URL: <http://www.all-electronics.de/die-zukunft-der-loettechnik-ist-mikrolegiert/> [Stand 11.12.2015].

- CONSTELLIUM (2013): Airware. – URL: <http://www.constellium.com/aluminium-innovation/aluminium-innovation-success-stories/airware-r> [Stand 14.11.2015].
- CONTINENTAL AG (2015): Hybrid Electric Vehicle. 12V Power Net System. – URL: http://www.conti-online.com/www/automotive_de_en/themes/passenger_cars/powertrain/hybrid_en.html?page=2 [Stand 23.11.2015].
- CORMOS, C.-C., VATOPOULOS, K. & TZIMAS, E. (2013): Assessment of the consumption of water and construction materials in state-of-the-art fossil fuel power generation technologies involving CO₂ capture. – *Energy* 51: 37–49.
- COURTLAND, R. (2015): Gordon Moore: The Man Whose Name Means Progress. The visionary engineer reflects on 50 years of Moore's Law. – *IEEE Spectrum*. – URL: <http://spectrum.ieee.org/computing/hardware/gordon-moore-the-man-whose-name-means-progress> [Stand 09.12.2015].
- CREMER, C. (2007): Zukunftsmarkt CO₂-Abscheidung und -Speicherung. – Fallstudie im Auftrag des Umweltbundesamtes im Rahmen des Forschungsprojektes Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern, Umweltbundesamt; Dessau. – URL: <http://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/zukunftsmarkt-co2-abscheidung-speicherung> [Stand 16.11.2015].
- CRU CONSULTING (2014): Glistening particles of industrial silver. A report prepared for The Silver Institute. – London. – URL: <https://www.silverinstitute.org/site/wp-content/ploads/2011/06/GPISDec2014.pdf> [Stand 17.08.2015].
- CUBOYO (2013): Cubyoyo Releases A Study on the Environmental Impact of 3D Printing. – URL: <http://printingddd.com/2013/10/21/cubyoyo-releases-a-study-on-the-environmental-impact-of-3d-printing/> [Stand 06.04.2015].
- DAIMLER (2011): Elektroauto unplugged – Daimler erprobt induktives Laden im Alltagstest. – Presse-Information vom 07.12.2011. Daimler Communications, Stuttgart.
- D'ALESSANDRO, D.M., SMIT, B. & LONG, J.R. (2010): Carbon dioxide capture: prospects for new materials. – *Angewandte Chemie*, 49(35): 6058–6082.
- DAMBROWSKI, J. (2013): Welche Ladezustands-Bestimmung eignet sich für LiFePO₄/Li₄Ti₅O₁₂? Übersicht zu Elektrodenmaterialien von Lithium-Ionen-Akkus. – URL: <http://www.elektroniknet.de/power/energiespeicher/artikel/104344/4/> [Stand 01.12.2015].
- DAS, S. (2011): Life cycle assessment of carbon fiber-reinforced polymer composites. – *International Journal of Life Cycle Assessment* 16: 268–282.
- DE BEER, N. (2013): Additive Manufacturing. Turning mind into matter. Industry Evaluation and Recommendations Report. – Sierra College Center for Applied Competitive Technologies (CACT). – URL: <http://www.prweb.com/releases/2013/8/prweb11020164.htm> [Stand 07.04.2016].
- DEHNAVI, P.Y. (2013): Global cycle of Gallium. Production, Use and Potential Recycling. – TRITA-LWR Degree Project 13:23. – URL: http://www2.lwr.kth.se/Publikationer/PDF_Files/LWR_EX_13_23.pdf [Stand 11.08.2015].
- DELZEIT, R. & BLEISCHWITZ, R. (2005): Tantal – A Case Study on Sustainable Resource Management – In: MARTENS, P. N. (Hrsg.): Aachen International Mining Symposia „Sustainable Development Indicators in the Minerals Industry“, 18.-20.05.2005, 917–942.
- DEPUY ORTHOPAEDICS (2008): DePuy Hips Designed to Restore Your Motion and Reduce Your Pain. – URL: https://www.hipreplacement.com/technology/depuy_hipimplants [Stand 18.11.2015].
- DERA – DEUTSCHE ROHSTOFFAGENTUR IN DER BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2014): DERA-Rohstoffliste 2014. – DERA Rohstoffinformationen, 24: 112 S., Berlin. – URL: http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-24.pdf?__blob=publicationFile&v=4 [Stand 24.02.2016].
- DERA – DEUTSCHE ROHSTOFFAGENTUR IN DER BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2015): Produktionsdaten. Persönliche Mitteilung.

DESTATIS (2009a): Fallpauschalenbezogene Krankenhausstatistik (DRG-Statistik). Operationen und Prozeduren der vollstationären Patientinnen und Patienten in Krankenhäusern. Ausführliche Darstellung. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.

DESTATIS (2009b): Fallpauschalenbezogene Krankenhausstatistik (DRG-Statistik). Operationen und Prozeduren der vollstationären Patientinnen und Patienten in Krankenhäusern – Ausführliche Darstellung. 2006. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.

DESTATIS (2009c): Fallpauschalenbezogene Krankenhausstatistik (DRG-Statistik). Operationen und Prozeduren der vollstationären Patientinnen und Patienten in Krankenhäusern – Ausführliche Darstellung. 2005. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden (Artikelnummer: 5231401057015).

DESTATIS (2009d): Fallpauschalenbezogene Krankenhausstatistik (DRG-Statistik). Operationen und Prozeduren der vollstationären Patientinnen und Patienten in Krankenhäusern – Ausführliche Darstellung. 2008. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden (Artikelnummer: 5231401087015).

DESTATIS (2010): Fallpauschalenbezogene Krankenhausstatistik (DRG-Statistik). Operationen und Prozeduren der vollstationären Patientinnen und Patienten in Krankenhäusern – Ausführliche Darstellung. 2009. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden (Artikelnummer: 5231401097015).

DESTATIS (2011): Fallpauschalenbezogene Krankenhausstatistik (DRG-Statistik). Operationen und Prozeduren der vollstationären Patientinnen und Patienten in Krankenhäusern – Ausführliche Darstellung. 2010. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden (Artikelnummer: 5231401107015).

DESTATIS (2012): Fallpauschalenbezogene Krankenhausstatistik (DRG-Statistik). Operationen und Prozeduren der vollstationären Patientinnen und Patienten in Krankenhäusern – Ausführliche Darstellung. 2011. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden (Artikelnummer: 5231401117014).

DESTATIS (2013): Fallpauschalenbezogene Krankenhausstatistik (DRG-Statistik). Operationen und Prozeduren der vollstationären Patientinnen und Patienten in Krankenhäusern – Ausführliche Dar-

stellung. 2012. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden (Artikelnummer: 5231401127015).

DESTATIS (2014): Fallpauschalenbezogene Krankenhausstatistik (DRG-Statistik). Operationen und Prozeduren der vollstationären Patientinnen und Patienten in Krankenhäusern – Ausführliche Darstellung. 2013. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden (Artikelnummer: 5231401137015).

DESTATIS (2015): Fallpauschalenbezogene Krankenhausstatistik (DRG-Statistik). Operationen und Prozeduren der vollstationären Patientinnen und Patienten in Krankenhäusern – Ausführliche Darstellung. 2014. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden (Artikelnummer: 5231401147015).

DEUBZER, O., BERGAMOS, M., CASAMAYOR, J., CHANCEREL, P., JORDAN, R., MARWEDE, M. & VASSEUR, K. (2012): Mass flow model: Deliverable 2.2 of the FP7 project Cycling resources embedded in systems containing Light Emitting Diodes (cycLED, 282793).

DEUBZER, O., BERGAMOS, M., SU, D. & VASSEUR, K. (2014): Options for life-time extension, collection, separation, pre-treatment and recycling. Deliverable 5.1 of the FP7 project Cycling resources embedded in systems containing Light Emitting Diodes (cycLED, 282793).

DGS – DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR SONNENENERGIE (2008): Lithium bewegt die Welt. – URL: http://www.dgs.de/164.0.html?&tx_ttnews-%5Btt_news%5D=1330&tx_ttnews%5B-backPid%5D=2&cHash=9aa1d10391 [Stand 27.11.2008].

DHL (2014): Unmanned Aerial Vehicles in Logistics. A DHL perspective on implications and use cases for the logistics industry. – URL: http://www.dhl.com/content/dam/downloads/g0/about_us/logistics_insights/DHL_TrendReport_UAV.pdf [Stand 30.04.2015].

DIETZEL, Y. (2004): Beschichtung von textilen Flächen mit den PVD-Technologien reaktives Vakuumbogen-Verdampfen und reaktives Magnetron-Sputtern. – Dissertation, Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität Dresden.

DISPLAYSEARCH (2012): TV shipments worldwide in 2012, by technology (in 1,000's). – URL: <http://>

www.statista.com/statistics/260316/global-tv-shipments-by-technology [Stand 11.08.2015].

DISPLAYSEARCH (2014): Delays in OLED TV Shipments Impede Growth of OLED Material Market, According to NPD DisplaySearch. – URL: http://www.displaysearch.com/cps/rde/xchg/display-search/hs.xsl/140414_delays_in_oled_tv_shipments_impede_growth_of_oled_material_market.asp [Stand 11.08.2015].

DLR – DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (2007): Solarthermische Kraftwerke für die Meerwasserentsalzung. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. – URL: www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/documents/AQUA-CSP_Zusammenfassung.pdf [Stand 10.12.2015].

DLR – DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (Hrsg.) (2011a): Feststoffspeicher für den Temperaturbereich 100–600 °C. – URL: http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/tp/Handout-TP_Feststoff_2011-final.pdf [Stand 15.11.2012].

DLR – DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (Hrsg.) (2011b): Latentwärmespeicher für den Temperaturbereich 120–350 °C; Stuttgart. – URL: http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/tp/Handout-Latentw_rmespeicher_2011-final.pdf [Stand 16.06.2015].

DLR – DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (2014): Fahrdratlose Energieübertragung bei Schienenfahrzeugen des Vollbahnverkehrs. – Abschlussbericht für das Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg; Stuttgart. – URL: http://elib.dlr.de/90435/1/20140423_Abschlussbericht_Fahrdratlose_Energie%20C3%BCbertragung_Langfassung.pdf [Stand 22.10.2015].

DLR – DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT & CIEMAT – CENTRO DE INVESTIGACIONES ENERGÉTICAS, MEDIOAMBIENTALES Y TECNOLÓGICAS (2008): New Energy Externalities Developments for Sustainability NEEDS. – D12.2 Final report concentrating solar thermal power plants (Sixth framework programme, 502687).

DOE – DEPARTMENT OF ENERGY (2011): The Department of Energy Hydrogen and Fuel Cells

Program Plan. – URL: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f12/program_plan2011.pdf [Stand 25.11.2015].

DONALDSON, J.D. & BEYERSMANN, D. (2011): Cobalt and Cobalt Compounds. – In: ULLMANN, F. (Hrsg.): Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry 9: 430–465; Weinheim.

DORNER, U. (2013): Rohstoffrisikobewertung – Kupfer. – DERA Rohstoffinformationen, 16: 31 S., Berlin. – URL: http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-16.pdf?__blob=publicationFile&v=7 [Stand 28.03.2016].

DOYLE, C. (2013): New vacuum-insulated window glass aims to cut heat lost through traditional windows. – Journal Sentinel. – URL: <http://www.jsonline.com/business/new-vacuum-insulated-window-glass-aims-to-cut-heat-lost-through-traditional-windows-b9949965z1-215617491.html> [Stand 12.11.2015].

DRY, M.E. (2002): The Fischer-Tropsch process: 1950–2000. – Catalysis Today 71 (3–4): 227–241.

DUBBEL (1983): Taschenbuch für den Maschinenbau. – Springer Verlag; Heidelberg.

DURSun, T. & SOUTIS, C. (2014): Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. Review. – In: Materials and Design 56: 862–871.

DWV – DEUTSCHER WASSERSTOFF- UND BRENNSTOFFZELLEN-VERBAND (2014): Nicht schuldig im Sinne der Anklage. Platin und der Preis für das Brennstoffzellenauto. – URL: <http://www.pressportal.de/nr/65341> [Stand 25.11.2015].

E4TECH (Hrsg.) (2015): The Fuel Cell Industry Review. – URL: <http://www.fuelcellindustryreview.com/FCIRarchive.html> [Stand 25.11.2015].

EADS/EOS – EUROPEAN AERONAUTIC DEFENCE AND SPACE COMPANY/ELECTRO OPTICAL SYSTEMS (2013): Die Wissensbasis erweitern: ökologisches Design einer Anwendung in der Luft- und Raumfahrt durch Nutzung der Additiven Fertigungstechnologie. Studie „Life Cycle Cooperation“ von EADS IW und EOS; Krailling.

EE TIMES ASIA (2008): Tantalum capacitors bank on reliability. – URL: <http://www.eetasia.com>.

EICHENSEER, M. (2003): Aufbau und Charakterisierung eines hochstabilen Nd:YAG Lasers für ein Indium Frequenznormal. – Dissertation an der Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München.

ELECTROCHEMISTRY ENCYCLOPEDIA (2008): Solid Oxide Fuel Cells. – URL: <http://electrochem.cwru.edu/ed/encycl/art-f02-sofc.htm> [Stand 25.09.2008].

ELEKTROTECHNIK VOGEL (Hrsg.) (2010): Konstruktions-Know-how eröffnet neue Potenziale für IE2-/IE3-Motoren. – URL: <http://www.elektrotechnik.vogel.de/elektromotoren/articles/261757/> [Stand 11.11.2015].

ELEKTROTECHNIK VOGEL (2013): IE4-Antriebspaket mit Synchronreluktanzmotor. Energieeffizienz. – URL: <http://www.elektrotechnik.vogel.de/elektromotoren/articles/393232/> [Stand 11.11.2015].

ELSNER, H., MELCHER, F., SCHWARZ-SCHAMPERA, U. & BUCHHOLZ, P. (2010): Elektronikmetalle - zukünftig steigender Bedarf bei unzureichender Versorgungslage? – Commodity Top News, 33: 13 S. – URL: http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/33_elektronikmetalle.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [Stand 05.05.2014].

ELSNER, H. (2011): Kritische Versorgungslage mit schweren Seltenen Erden - Entwicklung „Grüner Technologien“ gefährdet? – Commodity Top News, 36: 8 S. – URL: http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/36_kritische-versorgungslage.pdf?__blob=publicationFile&v=4 [Stand 18.10.2012].

ELSNER, H. (2014): Zinn – Angebot und Nachfrage bis 2020. – DERA Rohstoffinformationen, 20: 255 S.; Berlin.

ELWERT, T., GOLDMANN, D., SCHIRMER, T., STRAUSS, K. (2012): Recycling von Li-Ionen-Traktionsbatterien – Das Projekt LiBR. – In: THOME-KOZMIENSKY, K.-J., GOLDMANN, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, 5: 679–690; Berlin.

ENGHAG, P. (2004): Lexikon der Elemente; Weinheim.

ENOB (2011): Vakuumdämmung auf dem Prüfstand. Forschung für Energieoptimiertes Bauen. – URL: <http://www.enob.info/de/neue-technologien/projekt/details/vakuumdaemmung-auf-dem-pruefstand/> [Stand 12.11.2015].

ENOB (2015): Vakuumdämmung. Forschung für Energieoptimiertes Bauen. – URL: <http://www.enob.info/de/glossar/akronym/true/#sbakronym-manager78> [Stand 12.11.2015].

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2005): Solders in Electronics: A Life-Cycle Assessment. Summary. – URL: <http://www2.epa.gov/saferchoice/life-cycle-assessment-lead-free-solder-electronics-publications> [Stand 02.12.2015].

EPFL – ECOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE (2013): EPFL's campus has the world's first solar window. – URL: <http://actu.epfl.ch/news/epfl-s-campus-has-the-world-s-first-solar-window> [Stand 15.12.2015].

EPIA – EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION, GREENPEACE (2010): Solar Generation VI: Executive Summary. – URL: www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/climate/2010/SolarGeneration2010.pdf [Stand 08.04.2016].

EPIA – EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION, GREENPEACE (2011): Solar generation 6. Solar photovoltaic electricity empowering the world. – URL: www.greenpeace.org/international/Global/international/publications/climate/2011/Final%20SolarGeneration%20VI%20full%20report%20lr.pdf [Stand 08.04.2016].

EPIC – EUROPEAN PHOTONICS INDUSTRY CONSORTIUM (2015): The European Laser Ecosystem. Entwurf. – URL: www.epic-assoc.com/wp-content/uploads/2015/03/European-Laser-Ecosystem-DRAFT-9-March-2015.doc [Stand 22.04.2015].

EPRD – Endoprothesenregister Deutschland (2015): Statusbericht 2014. Mit Sicherheit mehr Qualität. – URL: www.eprd.de [Stand 17.11.2015].

- ERDMANN, L., BETTE, K., VELTE, D. & MORENO, J.M. (2015): CRM_InnoNet: Substitution of Critical Raw Materials. Roadmap for the Substitution of Critical Materials in Electric Motors and Drives. – URL: www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/v/en/publikationen/CRM-InnoNet-Roadmap-for-CRM-substitution_Electric_Motors_And_Drives.pdf [Stand: 14.12.2015].
- ERDMANN, L. & GRAEDEL, T. E. (2011): Criticality of Non-Fuel Minerals: A Review of Major Approaches and Analyses. Supporting Information. – *Environ. Sci. Technol.*, 45 (18): 7620–7630. DOI: 10.1021/es200563g.
- ERNHOFER, W. (2012): Linde kauft Choren-Technologie. *Process Chemie Pharma Verfahrenstechnik*. – URL: <http://www.process.vogel.de/management/articles/352566/> [Stand 08.04.2016].
- EUROPEAN COMMISSION (2011): Materials Roadmap Enabling Low Carbon Energy Technologies. Commission Staff Working Paper; Brüssel.
- EUROPEAN COMMISSION (Hrsg.) (2013): Concentrating Solar Power. Thematic research summary. – URL: setis.ec.europa.eu/energy-research. [Stand 14.08.2015].
- EUROPEAN COMMISSION (2014a): Report of Critical Raw Materials for the EU. Critical Raw Materials Profiles. With assistance of Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. European Commission; Brüssel.
- EUROPEAN COMMISSION (2014b): S. 64 Ein neues Zeitalter der Luftfahrt. Öffnung des Luftverkehrsmarktes für eine sichere und nachhaltige zivile Nutzung pilotferngesteuerter Luftfahrtsysteme. Mitteilung der Europäischen Kommission an das Europäische Parlament und den Rat. COM(2014) 207 final.
- EUROPEAN COMMISSION (2014c): Concentrated solar power. – URL: <https://setis.ec.europa.eu/mis/technology/concentrated-solar-power> [Stand 14.08.2015].
- EUROPEAN COMMISSION (2014d): Report on Critical Raw Materials for the EU. Non-critical Raw Materials Profiles. With assistance of Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. European Commission; Brüssel.
- EUROPEAN COMMISSION (2015): Carbon Capture and Storage. – URL: <https://setis.ec.europa.eu/mis/technology/carbon-capture-and-storage> [Stand 12.11.2015].
- EUWID (2015): Illegale Exporte von Altfahrzeugen kritisiert. – *Euwid Recycling und Entsorgung*, 14.2015: 27; Gernsbach.
- EUWID (2015): VDI-Befragte fordern Lösungen beim CFK-Recycling. *Euwid Recycling und Entsorgung* 8:17; Gernsbach.
- EVELAND, K. (2011): Fibre optic cable growth continues in 2012. – Integer Research Limited. – URL: <https://www.integer-research.com/integer-alert/fibre-optic-cable-growth-continues-in-2012/> [Stand 09.12.2015].
- ExONE (2016): 3D-Druck-Bindemittel. – URL: <http://www.exone.com/de-de/Ressourcen/Binder> [Stand 16.03.2016].
- FAA – FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (2010): FAA Aerospace Forecast. Fiscal Years 2010–2030. – U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration Aviation Policy and Plans. – URL: https://www.faa.gov/data_research/aviation/aerospace_forecasts/media/2010%20Forecast%20Doc.pdf (Stand 15.04.2016).
- FALK, F. (2006): Physik und Technologie von Solarzellen. Vorlesungsscript. – Institut für Photonische Technologien; Jena. – URL: www.ipht-jena.de/fileadmin/user_upload/redaktion/Lehre/Vorlesungsscripte/PVtot_deutsch.pdf [Stand 11.08.2015].
- FALUDI, J., BAYLEY, C., BHOGAL, S. & IRIBARNE, M. (2014): Comparing Environmental Impacts of Additive Manufacturing vs. Traditional Machining via Life-Cycle Assessment. – Green Manufacturing and Sustainable Manufacturing Partnership Series. – URL: <https://escholarship.org/uc/item/Ogv882qk#page-1> [Stand 08.04.2016].
- FAT – FORSCHUNGSVEREINIGUNG AUTOMOBILTECHNIK E. V. (2008): Analyse der sekundären Gewichtseinsparung. – FAT-Schriftenreihe 230; Berlin.
- FAURECIA (2015): Faurecia präsentiert das erste System zur Umwandlung von Abgasen in Strom

und Energie. – URL: www.faurecia.de/files/site_de_country/news/file/faurecia_ehpg_140915_de.pdf [Stand 27.11.2015].

FCM – FREIBERGER COMPOUND MATERIALS GMBH (o. J.): Produktinformation zu Galliumarsenid kompakt. – URL: http://www.freiberger.com/fileadmin/Download/GaAs_kompakt_Produktinfo_deu_Rev_K.pdf [Stand 03.12.2014].

FEE LASER CRYSTALS (2015): Homepage. – URL: <http://www.fee-io.de/> [Stand 22.04.2015].

FELLMAN, M. (2012): Taking solar technology up a notch. New inexpensive, environmentally friendly solar cell shines with potential. – Northwestern University. – URL: <http://www.northwestern.edu/newscenter/stories/2012/05/solid-state-solar-cell.html> [Stand 15.12.2015].

FIRST SOLAR (2011): Annual Report 2011. – URL: http://files.shareholder.com/downloads/FSLR/2736125941x0x559533/4BF0E522-1F34-489C-921D-6C77BF43DE01/Final_11_Annual_Report.pdf [Stand 16.10.2013].

FISCHLE, H. (2005): Superkondensatoren, made by WIMA. – Sonderdruck. – URL: www.ie4u.de/uploads/media/WIMA_Doppelschicht_Kondensatoren.pdf [Stand 22.12.2015].

FLANDERSDRIVE (2013): Electric powertrain with switch reluctance (SR) motors and optimised battery pack. – URL: <http://www.flandersdrive.be/en/projects/electric-powertrain> [Stand 10.04.2015].

FLEINER, M.S. (2013): LG Fuel Cell Systems. – Hydrogen and fuel cell Technical Advisory Committee. – URL: www.hydrogen.energy.gov/pdfs/htac_apr13_6_fleiner.pdf [Stand 08.04.2016].

FLEURIAL, J.-P. (1993): Selection and evaluation of materials for thermoelectric applications. Conf. Short Course on Thermoelectrics; Yokohama.

FLIR (o. J.): LWIR Uncooled Thermal Camera Core Products. – URL: <http://www.flir.com/cvs/cores/view/?id=51981> [Stand 12.12.2014].

FLUGREVUE (2014): Triebwerke für unbemannte Flugsysteme. – URL: <http://www.flugrevue.de/flugzeugbau/triebwerke/triebwerke-fuer-unbemannte-flugsysteme/540600> [Stand 08.04.2016].

FOE – FRIEND OF THE EARTH (2009): Nano & bio-cidal silver. – URL: <http://emergingtech.foe.org.au/wp-content/uploads/2014/06/Nanosilver-Report-2009.pdf> [Stand 17.08.2015].

FORTIS BANK (Hrsg.) (2008): Silver Book 2008. – URL: http://www.kitco.com/reports/fortis-vm/fortis-vm_2008-01-23_Silver_Book.pdf [Stand 17.08.2015].

FORTIS BANK (Hrsg.) (2010): Silver Book 2010. – URL: http://www.metalprices.com/freesite/metals/broker/abn_amro_silver_book_06-10.pdf [Stand 17.08.2015].

FRAHM, C. (2015): Toyota Mirai: Wasserstoff marsch! – Spiegel Online Auto. – URL: <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/toyota-mirai-im-test-warten-auf-die-zukunft-a-1059127.html> [Stand 08.04.2016].

FRAUNHOFER-ICT (2007): Lithium-Ion System. – Produktinformation; Pfinztal.

FRAUNHOFER ICT (2015): Großprojekt »RedoxWind«. – URL: <http://www.ict.fraunhofer.de/de/komp/ae/rfb/redoxwind.html#tabpanel-3> [Stand 13.08.2015].

FRAUNHOFER ISE (2014): Organische Photovoltaik am laufenden Meter. EU-Projektpartner zeigen sechs Meter lange Folie auf LOPEC in München. – URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/presseinformationen-2014/organische-photovoltaik-am-laufenden-meter-2013-eu-projektpartner-zeigen-sechs-meter-lange-folie-auf-lopec-in-muenchen> [Stand 08.04.2016].

FRAUNHOFER IWS (2015): Persönliche Mitteilung 18.11.2015.

FRAUNHOFER IZM (2007): EuP Preparatory Studies „Televisions“. – URL: www.ebpg.bam.de/de/ebpg_medien/005_studyf_07-08_complete.pdf [Stand 11.08.2015]

FREIBERGER (2008): Interview mit Freiburger, Freiburger Compound Materials GmbH, geführt von MARWEDE, M., Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 17.09.2008.

- FROST & SULLIVAN (2007): Developments in Tomography Technologies. – Frost & Sullivan Technical Insights; San Antonio, TX, USA.
- FROST & SULLIVAN (2009): World Passive Components Market. – N4ED-25.
- FROST & SULLIVAN (2013): 2013 Global Medical Imaging Equipment Market Outlook. – NC8B-54.
- FROST & SULLIVAN (2015a): Analysis of the Global Ultracapacitor Market. Manufacturers Exploring New Verticals to Drive Growth. – NDBC-27.
- FROST & SULLIVAN (2015b): Analysis of Global Desalination Market. Increasing Global Water Scarcity Owing to Rapid Industrialisation and Urbanisation Fuels Market Growth. – MAA0-15.
- FROST & SULLIVAN (2015c): Analysis of Sensors in the Global Internet of Industrial Things Market. Impending Paradigm Change-High Revenue through Remote Connectivity for Monitoring and Control. – NF87-32.
- FTHENAKIS, V. (2009): „Sustainability of photovoltaics: The case for thin-film solar cells. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9): 2746–2750.
- FUTURECARBON GMBH (2014): FutureCarbon acquires from Bayer patents for Carbon-Nanotubes and Graphene. – URL: <http://www.future-carbon.de/news-events/detail/futurecarbon-acquires-from-bayer-patents-for-carbon-nanotubes-and-graphene/> [Stand 13.11.2015].
- GARCHE, J. (2006): Elektrochemische Energiespeicher: Stand, Probleme, Perspektiven. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 56(10): 61–70.
- GARTNER (2009): Global mobile phone sales to end users from 2009 to 2013, by vendor (in million units). – URL: <http://www.statista.com/statistics/270243/global-mobile-phone-sales-by-vendor-since-2009> [Stand 11.08.2015].
- GARTNER (2013): Gartner Says It's the Beginning of a New Era: The Digital Industrial Economy. *Pressemitteilung*. – URL: <http://www.gartner.com/newsroom/id/2602817> [Stand 11.08.2015].
- GAUTSCHI, G. (2002): *Piezoelectric Sensoric*. – Springer Verlag; Heidelberg.
- GERLACH, G. (2006): *Einführung in die Mikrosystemtechnik*. – Hanser-Verlag; Leipzig.
- GFMS (2011): The future of silver industrial demand. Commissioned by the Silver Institute. – URL www.silverinstitute.org/images/stories/silver/PDF/futuresilverindustrialdemand.pdf [Stand 22.01.2016]
- GFMS (2014): World Silver Survey 2014. A Summary. – The Silver Institute (Hrsg.). – URL: <http://www.silverinstitute.org/site/wp-content/uploads/2011/06/WSS2014Summary.pdf> [Stand 22.01.2016].
- GILDEMEISTER (2013): Reif für die Insel. – URL: <http://energy.gildemeister.com/de/unternehmen/news/pellworm-cellcube-installation/226930> [Stand 08.04.2016].
- GLASER, S. (2012): *Produktionstechniken für Vakuum-Isolierglas (ProVIG). Abschlussbericht*. – Studie von Glaser FMB, Grenzebach Maschinenbau, Schunk Sonosystems, Fraunhofer IWM und ZAE Bayern für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.
- GLOBAL CCS INSTITUTE (2015): Large Scale CCS Projects. Projects Overview and Projects Database. – URL: <http://www.globalccsinstitute.com/projects/large-scale-ccs-projects> [Stand 13.11.2015].
- GLÖSER, S. (2012): Quantitative Analysis of the Criticality of Mineral and Metallic Raw Materials Based on a System Dynamics Approach. *Proceedings of the 30th International Conference of the System Dynamics Society*, St. Gallen, Switzerland, 22-26.07.2012. – URL: http://student.systemdynamics.org/wp/wp-content/ulf/colloquia/2012-proceedings/2012_gloeser_paper.pdf [Stand 08.04.2016].
- GLÖSER, S., SOULIER, M. & TERCERO ESPINOZA, L.A. (2013): Dynamic analysis of global copper flows. Global stocks, postconsumer material flows, recycling indicators & uncertainty evaluation. *Supporting Information*. – *Environ. Sci. Technol.*, 47 (12): 6564–6572.

- GLÖSER-CHAHOU, S. & TERCERO ESPINOZA, L. (2015): Dynamische Materialfluss-Analyse von Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe. – Studie des Fraunhofer ISI.
- GOEDE, M. (2005): Sustainable Production Technologies of Emission Reduced Light Weight Car Concepts. – Public presentation SuperLIGHT-Car project. – Volkswagen AG, Wolfsburg.
- GOJNY, F.H., WICHMANN, M.H.G., KÖPKE, U., FIEDLER, B. & SCHULTE, K. (2004): Carbon nanotube-reinforced epoxy-composites: enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content. – *Composites Science and Technology* 64 (15): 2363–2371.
- GOMATAM, B. (2014): Optical Communications Infrastructure, Investment and Emerging Markets. State of the Industry. – OFC 2014 Marketwatch Panel. – Sterlite Technologies Ltd.
- GORONCY, J. (2013): Effiziente Getriebe für die urbane E-Mobilität. – VDI Nachrichten. URL: <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Wirtschaft/Effiziente-Getriebe-fuer-urbane-E-Mobilitaet-Nr-4> [Stand 23.11.2015].
- GRABNER, C. (2013): Neue Anforderungen und innovative Lösungen für hocheffiziente AC-Motoren aus Österreich. – URL: www.energyagency.at/fileadmin/dam/image/veranstaltungen/004_Grabner_ATB_AEA_6Dez2013_Web.pdf [Stand 08.04.2016].
- GRAEDEL T. E., ALLWOOD, J., BIRAT, J., BUCHERT M., HAGELÜKEN, C., RECK, B. K. ET AL. (2011): Recycling Rates of Metals. A Status Report. – Working Group on the Global Metal Flows, International Resource Panel, UNEP (Hrsg.). – URL: http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metals_Recycling_Rates_110412-1.pdf [Stand 18.09.2012].
- GRAEDEL, T. E., BARR, R., CHANDLER, C., CHASE, T., CHOI, J., CHRISTOFFERSEN, L. ET AL. (2012): Methodology of metal criticality determination. – *Environ. Sci. Technol.*, 46(2): 1063–1070. DOI: 10.1021/es203534z.
- GRAND VIEW RESEARCH (2015a): Dye Sensitized Solar Cell Market Analysis By Application (Portable Charging, BIPV/BAPV, Embedded Electronics, Outdoor Advertising, Automotive (AIPV)) And Segment Forecasts To 2022. – URL: <http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/dye-sensitized-solar-cell-market> [Stand 15.12.2015].
- GRAND VIEW RESEARCH (2015b): Carbon Nanotubes (CNT) Market Analysis By Product (Single Walled Carbon Nanotubes (SWCNT), Multi Walled Carbon Nanotubes (MWCNT)), By Application (Polymers, Energy, Electrical & Electronics) And Segment Forecasts To 2022. – URL: <http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/carbon-nanotubes-cnt-market> [Stand 08.04.2016].
- GREEN, M.A. (2011): Learning experience for thin-film solar modules: First Solar, Inc. case study. – *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19 (4): 498–500.
- GRÜNWARD, R.: CO₂-Abscheidung und -Lagerung bei Kraftwerken. – Arbeitsbericht des Büros für Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages Nr. 120.
- GÜNTHER, B. (2006): Nanosilber in Beschichtungen. – 3. Fachkonferenz Nanotechnologie in der Lackpraxis. – *Farbe & Lack*: 87–95.
- GUPTA, S.G., GHONGE, M.M. & JAWANDHYIYA, P.M. (2013): Review of Unmanned Aircraft System (UAS). – *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology* 2: 1646-1658.
- GWEC – GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (2015): Global Wind Statistics 2014. – URL: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2015/02/GWEC_GlobalWindStats2014_FINAL_10.2.2015.pdf [Stand 08.04.2016].
- GWEC GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, GREENPEACE, DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT, ECOFYS & UNIVERSITY OF UTRECHT (2014): Global Wind Energy Outlook 2014. – URL: http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/10/GWEO2014_WEB.pdf [Stand 08.04.2016].
- HABIB, K., SCHIBYE, P.K., VESTBØ, A.P., DALL, O. & WENZEL, H. (2014): Material flow analysis of NdFeB magnets for Denmark: a comprehensive waste flow sampling and analysis approach. – *Environ. Sci. Technol.*, 48(20): 12229–12237. DOI: 10.1021/es501975y.

- HAGELÜKEN, C. (2009): Verluste werthaltiger Rohstoffe durch Aufbereitung und Export von Elektronikschrott in Drittländer. Branchenforum 2009. Umicore. Düsseldorf, 12.02.2009.
- HARMSSEN, J.H.M., ROES, A.L. & PATEL, M.K. (2013): The impact of copper scarcity on the efficiency of 2050 global renewable energy scenarios. – *Energy*, 50: 62–73. DOI: 10.1016/j.energy.2012.12.006.
- HARRISON, G.J (2013): Unmanned Aircraft Systems (UAS): Manufacturing Trends. – Congressional Research Service – <http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/single-sky/uas/library/industry-p20130524-congressional-research-service-usa-uas-manufacturing-trends-130130.pdf> [Stand 27.04.2015].
- HASSAN, A. (2001): Rohstoffeinsparung durch Kreislaufführung von verbrauchten Katalysatoren aus der chemischen Industrie. – Reihe Texte Nr. 21/2001. –, Umweltbundesamt; Berlin.
- HAUER, A. (2013): Thermal Energy Storage. – IEA-ETSAP and IRENA Technology Brief E17. – International Energy Agency - Energy Technology Systems Analysis Programme (IEA-ETSAP) & International Renewable Energy Agency (IRENA) (Hrsg.). – URL: iea-etsap.org/web/Highlights%20PDF/E17IR%20ThEnergy%20Stor_AH_Jan2013_final_GSOK%201.pdf [Stand 08.04.2016].
- HAUSDORF, A. (2014): Persönliche Mitteilung 2.12.2014
- HAUSKEN, T. (2012): A Record-Breaking Year for Lasers. *Laser Technik Journal* 9(3): 20-23. – URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/latj.201290031/pdf> [Stand 08.04.2016].
- HAWKSWORTH, J., CHAN, D., NEVIN, A., DREISPIEL, G., TAY, P. & WALEWSKI, M. (2015): The World in 2050. Will the shift in global economic power continue? With assistance of ZHANG, A., WIJERATNE, D., THORPE, J., OGIER, T., LANCEFIELD, D., SENTENCE, A. et al. – PWC (Hrsg.). – URL: <http://www.pwc.com/gx/en/issues/economy/the-world-in-2050.html> [Stand 08.04.2016].
- HEINEMANN, U., WEINLÄNDER, H. & GINTARS, D. (2011): Dämmen durch Vakuum. Hocheffizienter Wärmeschutz für Gebäudehülle und Fenster. – BINE Themeninfo 1/2011. – FIZ Karlsruhe & Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur GmbH (Hrsg.).
- HENNING, H.-M., RAGWITZ, M., BÜRGER, V., KRANZL, L. & SCHULZ, W. (2013): Erarbeitung einer Integrierten Wärme- und Kältestrategie (Phase 2) – Ziel-systeme für den Gebäudebereich im Jahr 2050. – Studie des Fraunhofer ISE, Fraunhofer ISI, TU Wien, Ökoinstitut & Fraunhofer IFAM für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- HERING, G. (2012): Das Jahr des Drachen. – *Photon*, 4: 42–72.
- HERRTWICH, R.G. (2014): Autonomes Fahren wird stufenweise Realität. – Presseinformation vom 25.09.2014. – Daimler AG; Stuttgart.
- HIGGINS, S. (2014): Velodyne Announces \$ 7,999 „Puck“ LiDAR Sensor. – URL: <http://www.spar3d.com/news/lidar/vol12no37-velodyne-announces-puck-lidar-sensor> [Stand: 10.3.2015].
- HIGH PERFORMANACE COMPOSITES (2009): The outlook for unmanned aircraft. – URL: <http://www.compositesworld.com/articles/the-outlook-for-unmanned-aircraft> [Stand 08.04.2016].
- HILLMANN, J. (2012): The new Golf VII – Lightweight Design in Large Scale Production. – Fachvortrag Aachener Karosserietage; Aachen.
- HINSCH, A., VEURMAN, W., BRANDT, H., JENSEN, K.F. & MASTROIANNI, S. (2014): Status of dye solar cell technology as a guideline for further research. – *Chemphyschem: a European journal of chemical physics and physical chemistry*, 15 (6): 1076–1087. – DOI: 10.1002/cphc.201301083.
- HIRN, G. (2012): Phasenübergang speichert Wärme. Neue Fluide als Wärmeträger in der Klima- und Kältetechnologie einsetzen. – BINE Informationsdienst Projektinfo 16/2012. – URL: <http://www.bine.info/themen/energiesysteme/waerme-kaeltespeicherung/publikation/phasenuebergang-speichert-waerme/> [Stand 08.04.2016].
- HISCHIER, R., CLASSEN, M., LEHMANN, M. & SCHARNHORST, W. (2007): Life Cycle Inventories of Electric and Electronical Equipment: Production Use and Disposal. – *econinvent report* Nr. 18. – econinvent centre, EMPA; St. Gallen/Dübendorf.

- HOENDERDAAL, S., TERCERO ESPINOZA, L., MARSCHIEDER-WEIDEMANN, F. & GRAUS, W. (2013): Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies? – *Energy*, 49: 344–355. – DOI: 10.1016/j.energy.2012.10.043.
- HOLLEMAN, A.F., WIBERG, E. (1985): *Lehrbuch der anorganischen Chemie*. – de Gruyter.
- HORVARTH, A. & STOKES, J. (2011): Life-Cycle Energy Assessment of Alternative Water Supply Systems in California. – URL: www.energy.ca.gov/2013publications/CEC-500-2013-037/CEC-500-2013-037.pdf [Stand 08.04.2016].
- HOVDE, D.C., PROUTY, M.D., HRVOIC, I. & SLOCUM, R.E. (2013): Commercial Magnetometers and their Application. In: BUDKER, D. & JACKSON KIMBOLL, D.F. (Hrsg.): *Optical Magnetometry*. – Cambridge University Press; Cambridge.
- HUANG, S.-L., HE, X.-J. & WANG, K.-Z. (2012): Joint replacement in China: progress and challenges. – *Rheumatology*, 51(9): 1525–1526. DOI: 10.1093/rheumatology/kes077.
- HUMPHRIES, M. (2011): *Rare Earth Elements: The Global Supply Chain*. – Congressional Research Service R41347. – URL: fas.org/sgp/crs/natsec/R41347.pdf [Stand 08.04.2016].
- HUND-RINKE, K., MARSCHIEDER-WEIDEMANN, F. & KEMPER, M. (2008): Beurteilung der Gesamtumweltexposition von Silberionen aus Biozid-Produkten. Gutachten für das Umweltbundesamt, FKZ: 360 04 020 (Texte 43/08). – URL: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/beurteilung-gesamtumweltexposition-von-silberionen> [Stand 17.08.2015].
- HUNT, J.A., CHEN, R., WILLIAMS, D. & BAYON, Y. (2012): Surgical Materials. In: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. DOI: 10.1002/14356007.a26_001.pub2.
- IBM – INTERNATIONAL BUSINESS MACHINES CORPORATION (2015): IBM Research Breakthrough Paves Way for Post-Silicon Future with Carbon Nanotube Electronics. \$3B Chip R&D Investment Continues to Deliver Innovations To Help Meet Advanced Computing Needs of the Cognitive Era. – URL: <https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/47767.wss> [Stand 08.04.2016].
- IBS MAGNET (o. J.): Hochenergiemagnete. – URL: <http://www.ibsmagnet.de/knowledge/hochenergie.php> [Stand 08.04.2016].
- IC INSIGHTS (o. J.): Global LCD-LED TV shipments forecast from 2009 to 2016 (in million units). – URL: <http://www.statista.com/statistics/260371/global-lcd-led-tv-shipments-forecast> [Stand 08.04.2016].
- IDA – INTERNATIONAL DESALINATION ASSOCIATION (2016): *Desalination by the Numbers*. – URL: <http://idadesal.org/desalination-101/desalination-by-the-numbers/> [Stand: 11.12.2015].
- IDC (o. J. a): Forecast for global shipments of tablets, laptops and desktop PCs from 2010 to 2017 (in million units). – URL: <http://www.statista.com/statistics/272595/global-shipments-forecast-for-tablets-laptops-and-desktop-pcs> [Stand 08.04.2016].
- IDC (o. J. b): Global smartphone shipments forecast from 2010 to 2018 (in million units). – URL: <http://www.statista.com/statistics/263441/global-smartphone-shipments-forecast> [Stand 08.04.2016].
- IDTECHEx (2013): *Conductive Ink Markets 2013-2018: Forecasts, Technologies, Players*. – URL: <http://www.idtechex.com/research/reports/conductive-ink-markets-2013-2018-forecasts-technologies-players-000311.asp> [Stand 08.04.2016].
- IDTECHEx (2014a): Passive RFID market grows to 6.9 billion units in 2014, valued at \$8.89 billion. – URL: <http://www.convertquarterly.com/industry-news/articles/id/7407/passive-rfid-market-grows-to-69-billion-units-in-2014-valued-at-889-billion.aspx> [Stand 08.04.2016].
- IDTECHEx (2014b): *Graphene Markets, Technologies and Opportunities 2014-2024*. – URL: http://siografen.se/wp-content/uploads/2014/12/Summary_marketanalysis_SIOGrafen.pdf [Stand 08.04.2016].
- IDTECHEx (2015a): IDTECHEx – Report Energy Harvesting and Storage for Electronic Devices 2011-2021; – URL: <http://www.energyharvesting-journal.com/articles/4158/energy-harvesting-for-wireless-sensors-1-6-million-units-2011> [Stand 08.04.2016].

- IDTECHEx (2015b): IDTECHEx - Energy harvesting technologies: forecasts for the next decade; – URL: <http://www.idtechex.com/research/articles/energy-harvesting-technologies-forecasts-for-the-next-decade-00005943.asp?donotredirect=true> [Stand 08.04.2016].
- IDTECHEx (2015c): Report Piezoelectric Energy Harvesting 2012-2022: Forecast, Technologies, Players, – URL: <http://www.energyharvesting-journal.com/articles/4664/piezoelectric-energy-harvesting-market-to-reach-145-million-in-2018> [Stand 08.04.2016].
- IDTECHEx (2015d): The diversification of 3D printing. – 3D Printing Europe, 28.-29.04.2015; Berlin.
- IEA ETSAP (2010): Liquid Fuels Production from Coal & Gas. – IEA ETSAP - Technology Brief S02. – URL: http://www.iea-etsap.org/Energy_Technologies/Energy_Supply/coal&gas_liquidfuels.asp [Stand 27.11.2015].
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2010): World Energy Outlook 2010: Paris.
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2011): Technology Roadmap. Biofuels for transport. – URL: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/biofuels_roadmap_web.pdf [Stand 25.11.2015].
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2012): Barriers to implementation of CCS: capacity Constraints. – URL: <https://www.globalccsinstitute.com/publications/barriers-implementation-ccs-capacity-constraints> [Stand 16.11.2015].
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2013a): Technology Roadmap. Carbon Capture and Storage-Carbon Capture and Storage. – URL: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-carbon-capture-and-storage-2013.html> [Stand 16.11.2015].
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2013b): Global EV Outlook. Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020. – Edited by Clean energy, Electric Vehicle initiative. – URL: www.iea.org/publications/globalevoutlook_2013.pdf [Stand 08.04.2016].
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2013c): World Energy Outlook 2013. – URL: <http://www.worldenergyoutlook.org/weo2013/> [Stand 20.01.2015].
- IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2014): Technology Roadmap. Solar Thermal Electricity. – URL: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-solar-thermal-electricity---2014-edition.html> [Stand 11.11.2015].
- IFAK – INSTITUT FÜR AUTOMATION UND KOMMUNIKATION (2011): Begleitforschung zum kabellosen Laden von Elektrofahrzeugen. Chancen und Risiken beim kabellosen Laden von Elektrofahrzeugen, Technologiefolgenabschätzung für eine Schlüsseltechnologie in der Durchbruchphase der Elektromobilität. – Abschlussbericht – URL: <http://www.erneuerbar-mobil.de/de/projekte/foerderprojekte-aus-dem-konjunkturpaket-ii-2009-2011/pkw-feldversuche/abschlussberichte/abschlussbericht-justpark.pdf> [Stand 15.04.2015]
- IFT – INSTITUT FÜR FENSTERTECHNIK E.V. ROSENHEIM (2014): Forschungsbericht zur Dauerhaftigkeit von Vakuum-Isolations-Paneelen. – URL: <https://www.ift-rosenheim.de/shop/forschungsbericht-2012-dauerhaftigkeit-vip-schutzschicht-download> [Stand 12.11.2015].
- IJIMA, S. & ICHIHASHI, T. (1993): Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. – Nature 363: 603–605.
- I-MICRONEWS (o. J.): Uncooled Infrared Imaging Technology & Market Trends. – URL: <http://www.i-micronews.com/photronics-report/product/uncooled-infrared-imaging-technology-market-trends.html> [Stand 08.04.2016].
- INCINEA GMBH (2015): Persönliche Mitteilung zum Verbleib von Endoprothesen nach einer Feuerbestattung am 19.11.2015.
- INFINERGIA CONSULTING (2015): Sub-wattthermoelectric energy harvesting: industry and market analysis. – URL: http://www.analog-eetimes.com/en/thermoelectric-energy-harvesting-on-steep-rise.html?cmp_id=7&news_id=222906568; 05/2015 [Stand 08.04.2016].
- INFORMATIONSTELLE EDELSTAHL ROSTFREI 2006 (o. J.). – URL: <http://www.edelstahl-rostoffrei.de/> [Stand 08.12.2015].

INSG – INTERNATIONAL NICKEL STUDY GROUP (2014): The Global E-bike Market. – INSG Insight, 23.

INT – FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR NATURWISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE TRENDANALYSEN (2006): Auswertung des INT nach Daten von VDEW auf Basis des Endenergieverbrauchs in Deutschland 2004. Euskirchen.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (Hrsg.) (2005): IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. – Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Cambridge, New York.

IÖW – INSTITUT FÜR ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG (2014): Dezentrale Produktion, 3D-Druck und Nachhaltigkeit. Trajektorien und Potenziale innovativer Wertschöpfungsmuster zwischen Maker-Bewegung und Industrie 4.0. – Schriftenreihe des IÖW 206/14; Berlin.

IPA – INTERNATIONAL PLATINUM GROUP METALS ASSOCIATION (2015): Primary Production. Edited by International Platinum Group Metals Association. – URL: <http://ipa-news.com/index/platinum-group-metals/primary-production.html> [Stand 08.04.2016].

IPC - INSTITUTE OF PRINTED CIRCUITS (2015): Issues and Outlook for Lead-Free Electronics in Military & Aerospace Applications. – URL: <https://www.electronics.ca/store/lead-free-electronics-in-military-and-aerospace-applications.html> [Stand 08.04.2016].

IPG PHOTONICS (2015): Homepage. – URL: <http://german.ipgphotonics.com/> [Stand 22.04.2015].

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (2012a): Renewable Energy Cost Analysis. Concentrating Solar Power. – Irena Working Paper. – URL: http://www.irena.org/documentdownloads/publications/re_technologies_cost_analysis-csp.pdf [Stand 11.11.2015]

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (2012b): Water Desalination Using Renewable Energy. – IEA-ETSAP & IRENA Technology Brief 112. – URL: http://www.ecowrex.org/system/files/documents/2012_water-desalination-using-renewable-energy_technology-brief_iea-etsap-irena.pdf [Stand 09.12.2015].

ISC – FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SILICATFORSCHUNG (2015): Ormocere. – URL: <http://www.isc.fraunhofer.de/arbeitsgebiete/ormocerre/> [Stand 12.11.2015].

ISO/IEC TR (2007): Information Technology – Radio frequency identification for item management – Implementation guidelines – 24729-2:2007 Part 2: Recycling and RFID tags. Technical report, First edition, Proof/épreuve.

ITRI (2015): ITRI forecasts market deficit despite drop in tin demand. – Pressemitteilung vom 26.11.2015; Hertfordshire.

ITRIMEX (2013): Itrimex specialises in the recovery of all metals from scrap PCB boards. – URL: <http://www.itrimex.com/> [Stand 11.12.2015].

IUTA – INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTECHNIK E. V. (2007): Untersuchung der Recyclingfähigkeit der verschiedenen Brennstoffzellen-Typen und deren Komponenten sowie Entwicklung geeigneter Verwertungsmethoden. Abschlussbericht AiF-Vorhaben-Nr. N 13869, Duisburg.

IVSUPRA – INDUSTRIEVERBAND SUPRALEITUNG (o. J.): Drähte und Materialien. – URL: <http://www.ivsupra.de/produkte/draehte-und-materialien.html> [Stand 21.12.2015].

IVERS-TIFFÉE, E. (2004): Werkstoffe der Elektrotechnik. – Teubner-Verlag; Wiesbaden.

IVERS-TIFFÉE, E. (2012): Batterien und Brennstoffzellen. – Vorlesungsskript WS 2012/2013. – Karlsruher Institut für Technologie (KIT); Karlsruhe.

IWCC – INTERNATIONAL WROUGHT COPPER COUNCIL (2015): Copper end-use data. – URL: <http://www.coppercouncil.org/Documents/Stats/GenEUse.pdf> [Stand 08.04.2016].

IWF – INTERNATIONAL MONETARY FUND (Hrsg.) (o. J.): IMF eLibrary data. International Monetary Fund. – URL: data.imf.org [Stand 08.04.2016].

IZT – INSTITUT FÜR ZUKUNFTSSTUDIEN UND TECHNOLOGIEBEWERTUNG & EMPA – EIDGENÖSSISCHE MATERIALPRÜFUNGS- UND -FORSCHUNGSANSTALT (2009): Einfluss von RFID auf die Abfallentsorgung. UBA-Texte 27/2009; Berlin.

IZT – INSTITUT FÜR ZUKUNFTSSTUDIEN UND TECHNOLOGIEBEWERTUNG, EMPA – EIDGENÖSSISCHE MATERIALPRÜFUNGS- UND -FORSCHUNGSANSTALT, BSI – BUNDESAMT FÜR SICHERHEIT IN DER INFORMATIONSTECHNIK (2004): Risiken und Chancen des Einsatzes von RFID-Systemen. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Eidgenössische Materialprüfungs- und -forschungsanstalt und Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. Bonn.

JEFFERIES & COMPANY (o. J.): Feature phone and smartphone shipments worldwide from 2008 to 2020 (in 1,000 units). – URL: <http://www.statista.com/statistics/225321/global-feature-phone-and-smartphone-shipment-forecast> [Stand 11.04.2016].

JIANG, G. & PICKERING, S.J. (2011): Recycling of Graphene Supercapacitors. – URL: <http://www.electrograph.eu/sites/default/files/publicdocuments/Recycling%20of%20Graphene%20Supercapacitors.pdf> [Stand 11.04.2016].

JOCHEM, E., SCHÖN, M., ANGERER, G., BALL, M., BRADKE, H., CELIK, B. ET AL. (2004): Werkstoffeffizienz. Einsparpotenziale bei Herstellung und Verwendung energieintensiver Grundstoffe. – Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

JOCHEM, E., BRADKE, H., CREMER, C., DREHER, C., EBERSBERGER, B., EDLER, J., KREBS, A., MARSCHEIDER-WEIDEMANN, F., VON OERTZEN, J., RADGEN, P., RUHLAND, S., SOM, O., MANNSBART, W. & FRIETSCH, R. (2007): Developing an Assessment Framework to Improve the Efficiency of R&D and the Market Diffusion of Energy Technologies EduaR&D. – Bericht für das BMWi. – Fraunhofer ISI, Karlsruhe.

JOHNSON, M. (Hrsg.) (2014): PGM Market Report. Forecast of Platinum Supply & Demand in 2014; London.

JONES, E.W., BARRIOZ, V., IRVINE, S.J.C. & LAMB, D. (2009): Towards ultra-thin CdTe solar cells using MOCVD: Thin Film Chalogenide Photovoltaic Materials (EMRS, Symposium L). – Thin Solid Films 517(7): 2226–2230.

JUNK, S. (2014): Investigation of Material and Consumption Characteristics in Additive Manufacturing Using Fused Deposition Modeling. – Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Konferenz, 12.-13.03.2014, Berlin.

KAISER, O. S., EICKENBUSCH, H., GRIMM, V. & ZWECK, A. (2008): Zukunft des Autos. – Zukünftige Technologien (Band 75). – URL: www.vditz.de/fileadmin/media/publications/pdf/Band_75.pdf [Stand 26.03.2015].

KÄLLHAMMER, J.-E. (2006): The road ahead for car night-vision. – Nature Photonics, 5: 12–13. – URL: <http://npg.nature.com/nphoton/journal/vsample/nsample/full/nphoton.2006.5.html> [Stand 26.03.2015].

KALLMAYER, C. (2015): Interview mit Frau Christine Kallmayer vom Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration am 24.02.2015.

KAMALASANAN, M.N. (1996): Sol-gel synthesis of ZnO thin films. – Thin Solid Films 288 (1–2): 112–115.

KATZMAIER, D. (2014): Samsung to end plasma TV production this year. – URL: <http://www.cnet.com/news/samsung-reportedly-ending-plasma-tv-production/> [Stand 11.04.2016].

KELK (o. J): Internetzugriff. – URL: <http://www.kelk.co.jp/english/thermo/pdf/thermo.pdf> [Stand 09.04.2015].

KHARAS, H. (2010): The emerging middle class in developing countries. – OECD Development Centre Working Paper No. 285.

KHARE, S., DELL'AMICO, M., KNIGHT, C. & MCGARRY, S. (2012): Selection of materials for high temperature latent heat energy storage. – Solar energy materials and solar cells, 107: 20–27.

KHARE, S., DELL'AMICO, M., KNIGHT, C. & MCGARRY, S. (2013): Selection of materials for high temperature sensible heat energy storage. – Solar energy materials and solar cells, 115: 114–122. – URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024813001220> [Stand 11.11.2015].

KINGSNORTH, D. (2014): Der globale Markt der Seltene Erden - Ein Balanceakt. – In: KAUSCH, P., BERTAU, M., GUTZMER, J. & MATSCHULLAT, J. (Hrsg.): Strategische Rohstoffe - Risikoversorge. S. 97–120 [Auswahl von Beiträgen der Tagungen: 4. Symposium Freiburger Innovationen zum Thema „Strategische Rohstoffe - Risikoversorge“, 19.-20.04.2012, und Deutsch-Französische

- Tagung „Life and Innovation Cycles in the Field of Raw Materials Supply and Demand - a Transdisciplinary Approach“, Orléans, April 2012]. Springer Spektrum; Berlin.
- KINGSNORTH, D. (2015): persönliche Mitteilung.
- KIT (2012): Miniatur-Radar mit Millimeter-Genauigkeit. – URL: http://www.pro-physik.de/details/news/2559291/Miniatur-Radar_mit_Millimeter-Genauigkeit.html. [Stand 15.04.2015].
- KJMAGNETICS (o. J.): Material Safety Data Sheet – URL: http://www.kjmagnetics.com/kjm_msds.pdf [Stand 27.07.2015].
- KLEIJN, R. & VAN DER VOET, E. (2010): Resource constraints in a hydrogen economy based on renewable energy sources: An exploration. – *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9): 2784–2795. DOI: 10.1016/j.rser.2010.07.066.
- KLEMPERT, O. (2014): Künftig kommt unser Trinkwasser aus dem Meer. – URL: <http://www.welt.de/wirtschaft/webwelt/article130214530/Kuenftig-kommt-unser-Trinkwasser-aus-dem-Meer.html> [Stand 11.04.2016].
- KLUSS, D., BADER, R., ZENK, K. & MITTELMEIER, W. (2012): Empfehlungen zur Dokumentation von Vorkommnissen mit Medizinprodukten in der Orthopädischen Chirurgie. – *Zeitschrift für Orthopädie und Unfallchirurgie* 150(6): 633–640. DOI: 10.1055/s-0032-1327934.
- KNEEREPLACEMENTCOSTS.COM (2013): Which type of implant is right for you? – URL: <http://www.kneereplacementcosts.com/implant-types.html> [Stand 17.11.2015].
- KOBAYASHI, Y., TOMIDA, K., NISHURA, M., HIWATASHI, K., KISHIZAWA, H. & TAKENOBU, K. (2015): Development of Next-Generation Large-Scale SOFC toward Realization of a Hydrogen Society. In: *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review* Vol. 52 (2), S. 111–116.
- KÖHLER, A.R., SOM, C., HELLAND, A. & GOTTSCHALK, F. (2008): Studying the potential release of carbon nanotubes throughout the application life cycle. – *J. Clean. Prod.* 16 (8-9): 927–937. – DOI:10.1016/j.jclepro.2007.04.007.
- KOLTUN, P. & THARUMARAJAH, A. (2014): Life Cycle Impact of Rare Earth Elements. – *ISRN Metallurgy* – URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/907536> [Stand 11.04.2016].
- KÖNIG, J., TARANTIK, K., HEUER, J. & BARTHOLOMÉ K. (2015): Thermoelectric research and developments at Fraunhofer IPM. *Thermoelectrics: Ready for Progress to industrialization.* – Symposium on waste heat recovery, 24.02.2015, Tokio.
- KONTER, M. (2012): Gas Turbine Materials with Focus on Re and RE Utilization and Trends. – The MMTA's International Minor Metals Conference. Alstom Thermal Power; Köln.
- KOOP, D. (2011): Choren verkauft und entlässt. Investor für eins der drei Unternehmen gefunden. – *Erneuerbare Energien.* – URL: <http://www.erneuerbareenergien.de/choren-verkauft-und-entlaesst/150/482/32159/> [Stand 11.04.2016].
- KOSCHIKOWSKI, J. (2011): Water Desalination: When and Where Will it Make Sense? – URL: <https://ec.europa.eu/jrc/en/page/jrc-aaas-2011-9261?search> [Stand 10.12.2015].
- KOTADIA, H.R., HOWES, P.D. & MANNAN, S.H. (2014): A review: On the development of low melting temperature Pb-free solders. – *Microelectronics Reliability*, 54(6-7): 1253–1273. – DOI: 10.1016/j.microrel.2014.02.025.
- KÖTZ, R. (2002): Doppelschichtkondensatoren – Technik, Kosten, Perspektiven. – *Tagungsband Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik*: 138–149.
- KÖTZ, R., DIETRICH, P., HAHN, M. & BÜCHI, F. (2005): Supercaps – Eigenschaften und Fahrzeuganwendungen. – *VDI-Berichte 1874*: 175–188.
- KRAUSE, B., RITSCHEL, M., TÄSCHNER, C., OSWALD, S., GRÜNER, W., LEONHARDT, A. & PÖTSCHKE, P. (2010): Comparison of nanotubes produced by fixed bed and aerosol-CVD methods and their electrical percolation behaviour in melt mixed polyamide 6.6 composites. – *Composites Science and Technology*, 70(1): 151–160. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2009.09.018.
- KREIGER, M. & PEARCE, J.M. (2013): Environmental Life Cycle Analysis of Distributed Three-Dimen-

- sional Printing and Conventional Manufacturing of Polymer Products. – ACS Sustainable Chem. Eng. 1(12): 1511–1519. – DOI: 10.1021/sc400093k.
- KREIGER, M.A., MULDER, M.L., GLOVER, A.G. & PEARCE, J.M. (2014): Life Cycle Analysis of Distributed Recycling of Post-consumer High Density Polyethylene for 3-D Printing Filament. – Journal of Cleaner Production, 70: 90–96. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.009>.
- KRUCZKOWSKI, P. (2012): UAVs And Electronic Payloads: Navigating Turbulent Times, Bright Skies Ahead. – URL: <http://www.rfglobalnet.com/doc/uavs-and-electronic-payloads-navigating-turbulent-times-bright-skies-ahead-0001> [Stand 11.04.2016].
- KSB AG (2012): Series production of the new IE4 motor about to start. – URL: http://www.ksb.com/ksb-en/Press_and_News/Press-Releases/854724/series_production_new_ie4_motor_.html [Stand 11.11.2015].
- KÜHN, A., NOVINSKY, P. & SCHADE, W. (2014): GLOMO - Global Mobility Model. Beschreibung und Ergebnisse. Fraunhofer ISI Working Paper Sustainability and Innovation, 13/2014. – URL: <http://fachliteratur.isi.fraunhofer.de/isipubl-extern/WP13-2014-GLOMO.pdf> [Stand 11.04.2016].
- KULTERER, K. (2014): Elektromotoren: Gewaltige Stromverbraucher mit hohem Einsparpotenzial. – Erneuerbare Energien 2014/02: 18–21. – URL: http://www.aee.at/aee/index.php?option=com_content&view=article&id=813&Itemid=113 [Stand 11.11.2015].
- KUPHALDT, R.R. (2000): Diodes and Rectifiers. – Lessons In Electric Circuits, III – URL: http://www.ibiblio.org/kuphaldt/electricCircuits/Semi/SEMI_3.html [Stand 23.06.2008].
- LANG, S.B. (2005): Pyroelectricity: From Ancient Curiosity to Modern Imaging Tool. Physics Today, 60(8): 31.
- LASER MATERIALS CORPORATION (2008): Neodymium YAG. – Product Brochure.
- LASETER, T. & HUTCHISON-KRUPAT, J. (2013): A Skeptic's Guide to 3D Printing. Excitement about any new technology should be balanced with the application of time-tested forecasting tools. – Strategy and Business. – URL: <http://www.strategy-business.com/article/00219?pg=all> [Stand 11.04.2016].
- LAU, J.H. & LIU, K. (2004): Global Trends in Lead-free Soldering. – Solid State Technology. – URL: <http://electroiq.com/blog/2004/01/global-trends-in-lead-free-soldering> [Stand 11.12.2015].
- LE GOFF, A., ARTERO V., JOUSSELME, B., TRAN, P.D., GUILLET, N., MÉTAYÉ, R., FIIHRI, A, PALACIN, S. & FONTECAVE, M. (2009): From hydrogenases to noble metal-free catalytic nanomaterials for H₂ production and uptake. – Science 326: 1384–1387. – DOI: 10.1126/science.1179773.
- LEDJEFF-HEY, K. (1996): Brennstoffzellen. Entwicklung, Technologie, Anwendung. – C.F. Müller Verlag; Heidelberg.
- LEE, G.C., CUSHNER, F.D., CANNELLA, L.Y. & SCOTT, W.N. (2005): The effect of total knee arthroplasty on body weight. – Orthopedics 28(3): 321–323.
- LEE, Y.D. (2015): Thermodynamic, economic and environmental evaluation of solid-oxide fuel-cell hybrid power-generation systems. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin. – URL: https://opus4.kobv.de/opus4-tuberlin/files/6857/lee_young_duk.pdf [Stand 25.10.2015].
- LENZEN, F. (2014): Overview of Parabolic troughs and linear Fresnel receivers. – IEA CSP Workshop, 03.03.2014 – URL: www.iea.org/media/workshops/2014/solarelectricity/FrankLenzenOverviewofParabolictroughslinearFresnelreceivers.pdf [Stand 15.12.2015].
- LEXIKON DER PHYSIK (1970): Thermoelektrischer Generator. – Frank'sche Verlagsbuchhandlung; Stuttgart.
- LI, M.-J., TANDON, P., BOOKBINDER, D.C., BICKHAM, S.R. & McDERMOTT, M.A. (2008): Ultra-low Bending Loss Single-Mode Fiber for FTTH. – Journal of Lightwave Technology 27: 376–382. – URL: www.corning.com/uploadedFiles/Corporate/ww/R+_D/Our_Innovation_Library/2008_Corning_Research/docs/NTR105066.pdf [Stand 26.11.2014].

- LILLEY, P.D., ERDLE, E. & GROSS, F. (1989): Market potential of solid oxide fuel cells (SOFC): European Commission.
- LINDE ENGINEERING (2013): Linde and Forest BtL sign licensing agreement for Carbo-V® technology. – URL: http://www.linde-healthcare.com/en/news_and_media/press_releases/news_130125.html [Stand 11.04.2016].
- LIU, J. & CHINNASAMY, C. (2012): Rare Earth Magnet Recycling. – Rare Earth Elements Workshop, 10.05.2012, Colorado.
- LOSSIN, A. (2011): Copper. – In: ULLMANN, F. (Hrsg.): Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 7. Edition – Wiley-VCH; Weinheim.
- LUCAS, R. & WILTS, H. (2011): Weltweite Wiedergewinnung von Platingruppenmetallen (PGM). – Meilensteinbericht des Arbeitspaketes 2.2 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes). Wuppertal Institut, Wuppertal.
- MAGNETICA (2014): Next Generation MRI Technologies – URL: <http://www.magnetica.com/page/innovation/todays-mri-market/> [Stand 11.04.2016].
- MAI, A. (2015): Kritische Materialien in oxidkeramischen BZ (SOFC): wirklich kritisch? Strategien für den nachhaltigen Umgang mit „Kritischen Materialien“. – Hexis; Dübendorf.
- MALOZEMOFF, A., MANNHART, J. & SCALAPINO, D. (2006): Hochtemperatur-Supraleiter in der Technik: 20 Jahre Hochtemperatur-Supraleitung. – Phys. Unserer Zeit 37 (4): 162–169. – DOI: 10.1002/piuz.200601103.
- MARKET RESEARCH STORE (2015): Global Solid Oxide Fuel Cell Market Outlook - Trends, Forecast, and Opportunity Assessment (2014-2022). – URL: <http://www.marketresearchstore.com/report/global-solid-oxide-fuel-cell-market-outlook-35893> [Stand 17.11.2015].
- MARKETS AND MARKETS (2012): Direct Drive (Gearless) Wind Turbine Market, By Permanent Magnet (PMSG) & Electrically Excited (EESG) Generator Technology, Turbine Size/Capacity Range – Global Trends & Forecasts to 2017. – URL: <http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/direct-drive-gearless-wind-turbine-market-805.html> [Stand 25.11.2015].
- MARKETS AND MARKETS (2014): Fiber Optics Market by Application (Telecom & Broadband, Utilities, Oil & Gas, Private Data Networks, Military/Aerospace, Cable Television & Others) - Global Trends & Forecasts to 2019. – URL: <http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/fiber-optics-market-238443438.html> [Stand 20.11.2015].
- MARKETS AND MARKETS (2015): Building Thermal Insulation Market by Material (Wool Insulation, Plastic Foams and Others) and Application (Roof, Wall and Floor) – Global Trends & Forecasts to 2020. – URL: <http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/building-insulation-materials-market-510.html> [Stand 12.11.2015].
- MARKT (2011): Markt im Dritten vom 11.10.2011. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=g3wO-7v9jhYA> [Stand 16.04.2015].
- MARKT UND MITTELSTAND (2013): Neuer Elektromotor beschleunigt Elektroauto. – URL: <http://www.marktmittelstand.de/themen/energie/neuer-elektromotor-beschleunigt-elektroauto-1181631/> [Stand 23.11.2015].
- MARTIN, S., GARCIA-YBARRA, P.L. & CASTILLO, J.L. (2010): High platinum utilization in ultra-low Pt loaded PEM fuel cell cathodes prepared by electrospraying. – International Journal of Hydrogen Energy 35(19): 10446–10451. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.07.069.
- MARWEDE, M. & RELLER, A. (2012): Future recycling flows of tellurium from cadmium telluride photovoltaic waste. – Resources, Conservation and Recycling 69: 35–49.
- MARWEDE, M. (2013): Cycling critical absorber materials of CdTe- and CIGS-photovoltaics: Material efficiency along the life-cycle. – Dissertation. – Universität Augsburg. – URL: <http://opus.bibliothek.uni-augsburg.de/opus4/frontdoor/index/index/docId/2440> [Stand 23.06.2015].
- MATHOY, A. (2008): Die Entwicklung bei Batterien und Antriebstechnik für Elektroautomobile. – Bulletin SEV/VSE, 1: 8–13.

- MATSUMOTO, T., KOMATSU, T., ARAI, K., YAMAZAKI, T., KIJIMA, M., SHIMIZU, H. ET AL. (2004): Reduction of Pt usage in fuel cell electrocatalysts with carbon nanotube electrodes. – *Chemical communications* (7): 840–841. – Cambridge; England. – DOI: 10.1039/b400607k.
- McKINSEY & COMPANY (2008): Carbon Capture & Storage. Assessing the Economics.. – McKinsey Climate Change Initiative. – URL: <https://assets.wwf.ch/downloads/mckinsey2008.pdf> [Stand 16.11.2015].
- McKINSEY GLOBAL INSTITUTE (2012): Manufacturing the future: the next era of global growth and innovation. – URL: http://www.mckinsey.com/insights/manufacturing/the_future_of_manufacturing [Stand 04.11.2015].
- McKINSEY (2011): Lighting the way: Perspectives on the global lighting market. – URL: http://www.mckinsey.com/insights/manufacturing/the_future_of_manufacturing [Stand 11.08.2015].
- McKINSEY (2013): Disruptive technologies: Advances that will transform life, business and the global economy. – URL: <http://www.mckinsey.com/business-functions/business-technology/our-insights/disruptive-technologies> [Stand 14.04.2016].
- MERCHANT RESEARCH & CONSULTING, LTD (2014): Germanium: 2015 World Market Review and Forecast. – URL: <http://mcgroup.co.uk/researches/germanium> [Stand 25.11.2014].
- MERTENS, A. & KOCH, M. (2003): Tailored Blank: Geschichte eines Erfolgs. SLT 2003: 169–172.
- METAL SUPPLIERS ONLINE (2008): Stainless Steel 254 SMO™. Material Property Data. – URL: <http://www.suppliersonline.com> [Stand 12.04.2016].
- METALCOR (2016): Datenblatt Alloy 718. – URL: <http://www.metalcor.de/datenblatt/105/>. [Stand 22.03.2016].
- METEYER, S., XUB, X., PERRY, N. & ZHAO, Y.F. (2014): Energy and Material Flow Analysis of Binder-jetting Additive Manufacturing Processes. – 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering. – *Procedia CIRP* 15:19–25.
- MEYER, F. (2009): Klimatisieren und Kälte speichern mit Salzlösungen. – BINE Projektinfo 02/09. – <http://www.bine.info/publikationen/publikation/klimatisieren-und-kaelte-speichern-mit-salzloesungen/> [Stand 12.04.2016].
- MEYER, F. (2015a): Wärmespeicher in Form gebracht. Wissenschaftler optimieren Zeolithe für den Einsatz in thermochemischen Speichern. BINE-Projektinfo07/2015. – URL: www.bine.info/fileadmin/content/Presse/Projektinfos_2015/PM_07_2015/ProjektInfo_0715_internetx.pdf [Stand 12.04.2016].
- MEYER, K. (2015b): CFK Recyclingprozess. CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG. Karl Meyer AG, Stade 2015. – URL: <http://www.cfk-recycling.com/index.php?id=6> [Stand 03.04.2015].
- MEYER-GÜLDNER, F. (2007): Die „China RoHS“ im Überblick. – URL: www.mg-e.de/chinarohs.pdf [Stand 12.04.2016].
- MICRODRONES (2015): Unmanned Cargo System. – URL: <http://www.microdrones.com/de/anwendungen/anwendungsgebiete/unmanned-cargo-system/> [Stand 30.04.2015].
- MICROGEN (o. J.): Internetzugriff Fa. Micro-Gen, – URL: <http://www.microgensystems.co> [Stand 27.07.2015].
- MIERITZ, T. (2007): Bewertung der Abscheidung und Lagerung von Kohlendioxid in Deutschland vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeit und Ansätze zur Integration in den Emissionshandel. – Diplomarbeit, Fachhochschule Eberswalde.
- MIROVSKY, Y., BENDOV, A., LEIBOVICH, H., GURMAN, A., YUROVICH, Y., DISKIN, A. ET AL. (2014): Clean sky: The future of the aviation industry - Developments at Israel aerospace industries. – 54th Israel Annual Conference on Aerospace Sciences, 3: 1715–1723.
- MIT – MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (2015a): Carbon Capture and Sequestration Technologies. Power Plant CCS Projects. – URL: http://sequestration.mit.edu/tools/projects/index_capture.html [Stand 13.11.2015].
- MIT – MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (2015b): Power Plant Carbon Dioxide Capture and

- Storage Projects. Pilot Projects. – URL: https://sequestration.mit.edu/tools/projects/index_pilots.html [Stand 11.11.2015].
- MMTA – MINOR METALS TRADE ASSOCIATION (2015): Re – Rhenium. – URL: <http://www.mmta.co.uk/metals/Re> [Stand 02.02.2016].
- MOON, S.K., TAN, Y.E., HWANG, J. & YOON, Y.-J. (2014): Application of 3D Printing Technology for Designing Light-weight Unmanned Aerial Vehicle Wing Structures. – *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology* 3(1-2014): 223-228.
- MORONES, J.R., ELECHIGUERRA, J.L., CAMACHO, A., HOLT, K., KOURI, J.B., RAMÍREZ, J.T. & YACAMAN, M.J. (2005): The bactericidal effect of silver nanoparticles. – *Nanotechnology*, 16(10):2346–2353. – URL: <http://iopscience.iop.org/0957-4484/16/10/059/> [Stand 08.09.2015].
- MOSS, R.L., TZIMAS, E., WILLIS, P., ARENDORF, J. & TERCERO ESPINOZA, L. (2012): Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector. Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies. – European Commission. – URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-277677.html> [Stand 12.04.2016].
- MOSS, R.L., TZIMAS, E., KARA, H., WILLIS, P. & KOOROSHY, J. (2011): Critical Metals in Strategic Energy Technologies. Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies. – European Commission. – URL: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC65592> [Stand 15.11.2012].
- MORDOR INTELLIGENCE LLP (2016): Global Scandium Market. – URL: <http://www.reportlinker.com/p03281933-summary/Global-Scandium-Market-Segmented-by-Product-Type-End-User-Industry-and-Geography-Trends-and-Forecasts.html> [Stand 05.02.2016].
- MOTOR BRAIN (2014): Compact and Efficient Electromotor Without Rare Earth Metals. The “Motor-Brain” Research Team Presents the First Prototype at the Hannover Messe 2014. – URL: https://assrv2.haw-aw.de/motorbrain_neu/index.php/hidden-news/78-compact-and-efficient-electromotor-without-rare-earth-metals [Stand 23.11.2015].
- MOUGENOT, M., CAILLARD, A., BRAULT, P., BARANTON, S. & COUTANCEAU, C. (2011): High Performance plasma sputtered PdPt fuel cell electrodes with ultra low loading. – *International Journal of Hydrogen Energy* 36(14): 8429–8434. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.04.080.
- MULHOLLAND, J., SHEAHEN, T.P. & McCONNELL, B. (2001): Analysis of Future Prices and Markets for High Temperature Superconductors.
- MÜLLER, B. (2002): Die Macht der kleinen Schritte. – *Pictures of the Future 2002 (Frühjahr)*: 61–63. – URL: http://www.siemens.com/innovation/de/publikationen/zeitschriften_pictures_of_the_future/pof_fruehjahr_2002.htm [Stand 08.11.2015].
- MÜLLER-LANGER, F., MAJER, S. & O’KEEFFE, S. (2015): Biofuels-State of the art and future developments. – FNR - Konferenz Neue Biokraftstoffe, 2./3.3.2015; Berlin. – URL: https://veranstaltungen.fnr.de/fileadmin/veranstaltungen/2015/neuebiokraftstoffe2015/Mueller-Langer_New_Biofuels_2015.pdf [Stand 25.11.2015].
- MURATA (2007): Choosing between ceramic and tantalum capacitors. – *Dataweek, Electronics and Communications Technology (Hrsg.)* – URL: <http://www.dataweek.co.za/news.aspx?pk1-newsid=27008> [Stand 21.12.2015].
- NASA (2013): Perspectives on Unmanned Aircraft Classification for Civil Airworthiness Standards. NASA/TM–2013-217969; Hampton (Virginia).
- NAUJOKS, I. (2000): Ökologischer und ökonomischer Vergleich von CuInS_2 - und CuInSe_2 -Dünnschichtsolarmodulen über den Lebenszyklus. – Diplomarbeit, TU-Berlin.
- NAUMOV, A.V. (2008): Review of the World Market of Rare-Earth Metals. – *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 49(1): 14–22.
- NAVIGANT (2006): High Temperature Superconductivity Market Readiness Review. Investigation of the status of HTS technology, the requirements of key applications and barriers to future success. – URL: www.htspeerreview.com/2006/pdfs/Plenary/07_Navigant_HTS_Market_Readiness_Study.pdf [Stand 14.12.2015].

- NAVIGANT (2012): Annual Sales of Electric Bicycles Will Surpass 47 Million by 2018. – URL: <http://www.navigantresearch.com/newsroom/annual-sales-of-electric-bicycles-will-surpass-47-million-by-2018-2> [Stand 14.12.2015].
- NAVIGANT (2013): Thermal Energy Storage Market to Reach \$3.6 Billion Worldwide by 2020. – URL: <http://www.navigantresearch.com/newsroom/thermal-energy-storage-market-to-reach-3-6-billion-worldwide-by-2020-forecasts-pike-research> [Stand 11.11.2015].
- NAVIGANT (2014): Electric Bicycles. Throttle-Control and Pedal-Assist E-Bicycles, Batteries, and Motors: Global Market Opportunities, Barriers, Technology Issues, and Demand Forecasts. – URL: <http://www.navigantresearch.com/research/electric-bicycles> [Stand 14.12.2015].
- NAVIGANT (2015): Electric Motorcycles and Scooters. Market Drivers and Barriers, Technology Issues, Key Industry Players, and Global Demand Forecasts. – URL: <https://www.navigantresearch.com/research/electric-motorcycles-and-scooters> [Stand 14.12.2015].
- NEMES, S., GORDON, M., ROGMARK, C. & ROLFSON, O. (2014): Projections of total hip replacement in Sweden from 2013 to 2030. – *Acta orthopaedica*, 85(3): 238–243. – DOI: 10.3109/17453674.2014.913224.
- NEUHÄUSLER, P., ROTHENGATTER, O. & FRIETSCH, R. (2014): Patent Applications – Structures, Trends and Recent Developments. – Fraunhofer ISI (Hrsg.). – Studien zum deutschen Innovationssystem. – URL: www.e-fi.de/fileadmin/Innovationsstudien_2014/StuDIS_4_2014.pdf [Stand 03.03.2016].
- NGI – NORWEGIAN GEOTECHNICAL INSTITUTE (2010): Environmental risks of CdTe PV modules regarding use and final disposal. – URL: <http://www.dtsc.ca.gov/LawsRegsPolicies/upload/Norwegian-Geotechnical-Institute-Study.pdf> [Stand 11.8.2015].
- NICCOLAI, J. (2015): Intel pushes 10nm chip-making process to 2017, slowing Moore's Law. To make up for the delay, Intel has added a new chip design to its roadmap. InfoWorld. – URL: <http://www.infoworld.com/article/2949153/hardware/intel-pushes-10nm-chipmaking-process-to-2017-slowing-moores-law.html> [Stand 09.12.2015].
- NIEDERMAYER, M., BENECKE, S., WIRTH, R., ARMBRUSTER, E. & LANG, K.-D. (2014): Wireless Condition Monitoring for Industrial Applications based on Radio Sensor Nodes with Energy Harvesting. – *International Journal on Advances in Networks and Services*, 7(3–4): 130–137.
- NIESING, B. (2015): Leichter fertigen. – *Das Fraunhofer-Magazin weiter.vorn* 2/15: 8-13.
- NIPPON STEEL & SUMITOMO METAL (o. J.): Nippon Steel & Sumitomo Metal Group products, engineering and technology in water resources desalination plant. Titanium material adopted for cooling pipes from the viewpoint of anti-corrosive performance. – URL: <http://www.nssmc.com/en/product/use/resource/water/index.html> [Stand 08.12.2015].
- NIST – NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (2014): Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing. A Literature Review and Discussion. – NIST Special Publication 1176.
- NJR – NATIONAL JOINT REGISTRY (2014): NJR 11th Annual Report 2014. – URL: www.njrcentre.org.uk [Stand 12.04.2016].
- NKT PHOTONICS (2013): Modal properties of the DC-200/40-PZ-Yb LMA fiber. – White paper v1.0 12/2013.
- NOLTE, F. (2012): Energieeffiziente Antriebstechnik. – *etz (Elektrotechnik und Automation)*, S1: 2–5.
- NORTHWEST UAV PROPULSION SYSTEMS (2011): Northwest UAV Propulsion Systems Awarded STTR Research & Development Grant to develop Advanced Materials for the Design of Lightweight JP5/JP8/DS2 Fueled Engines for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). – Presseerklärung vom 6. Januar 2011 von Northwest UAV Propulsion Systems, McMinnville, Oregon. – URL: <http://www.nwuav.com/nwuav-press-releases/NWUAV-Navy-STTR.pdf> (Download: 16.04.2016).
- NOVINSKY, P. (2014): Entwicklung eines systemdynamischen Modells zur Analyse potentieller Versorgungsengpässe von Kobalt als Batterierohstoff für alternative Fahrzeugantriebe. Masterarbeit. KIT, Karlsruhe.

- NOWACK, B., KRUG, H.F. & HEIGHT, M. (2011): 120 Years of Nanosilver History: Implications for Policy Makers. – *Environmental Science and Technology*, 45(4): 1177–1183.
- NOWACK, B. & MUELLER, N.C. (2008): Exposure modeling of engineered nanoparticles in the environment. – *Environmental Science and Technology*, 42(12): 4447–4453.
- NRC – NATIONAL RESEARCH COUNCIL (2008): Minerals, critical minerals and the U.S. economy. – URL: http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12034 [Stand 12.04.2016].
- NÜSSLE, F.D. & WISSEL-STOLL, K. (2010): Zwischenbericht der Arbeitsgruppe 5: Materialien und Recycling. – im Auftrag der Nationalen Plattform Elektromobilität. – URL: www.bmvi.de/cae/servlet/contentblob/60008/publicationFile/30842/elektromobilitaet-ag-5.pdf [Stand 12.04.2016].
- NUTTALL, W.J., CLARKE, R.H. & GLOWACKI, B.A. (2012): Resources: Stop squandering helium. – *Nature* 485: 573–575 [Stand 14.10.2015].
- O'BRIEN, E. (2013): Gas to Liquids Plants: Turning Louisiana Natural Gas into Marketable Liquid Fuels. – URL: http://dnr.louisiana.gov/assets/TAD/newsletters/2013/2013-11_topic_1.pdf [Stand 27.11.2015].
- OAKDENE HOLLINS RESEARCH & CONSULTING (2015): Study of By-Products of Lead, Zinc, Copper and Nickel. – Studie im Auftrag der International Study Group for Nickel, International Study Group for Lead & Zinc und International Study Group for Copper.
- OEBBEKE, A. (Hrsg.) (2011): Neue Komponenten und Verfahren sollen Vakuum-Isolations-Paneele verbilligen. – URL: <http://www.baulinks.de/webplugin/2011/1923.php4> [Stand 12.11.2015].
- OEBBEKE, A. (Hrsg.) (2014a): Isolierglas vom Flachglas MarkenKreis speziell für Renovation und Denkmalschutz. – URL: <http://www.baulinks.de/webplugin/2014/1820.php4> [Stand 12.11.2015].
- OEBBEKE, A. (Hrsg.) (2014b): Leichtere Isoliergläser im Sinne von Energieeffizienz, EnEV, Energiewende und Co. – URL: <http://www.baulinks.de/webplugin/2014/1460.php4> [Stand 12.11.2015].
- OECD – ORGANISATION FÜR WIRTSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT UND ENTWICKLUNG (2011): Hip and knee replacement. – In: *Health at a Glance 2011*. OECD Indicators, S. 92–93.
- OECD – ORGANISATION FÜR WIRTSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT UND ENTWICKLUNG (2012): OECD Economic Outlook. Volume 2012/1.
- OECD – ORGANISATION FÜR WIRTSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT UND ENTWICKLUNG (2015): Hip and knee replacement. – In: *Health at a Glance 2015*. OECD Indicators, S. 112–113.
- OERTEL, D. (2008): Energiespeicher - Stand und Perspektiven. Sachstandsbericht zum Monitoring „Nachhaltige Energieversorgung“. – Arbeitsbericht Nr. 123. – Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (Hrsg.). – URL: <http://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab123.pdf> [Stand 05.05.2014].
- OICA – INTERNATIONAL ORGANIZATION OF MOTOR VEHICLE MANUFACTURERS (2014): Production statistics 2013, 2014. – URL: <http://www.oica.net/category/production-statistics/2013-statistics/> [Stand 12.04.2016].
- OPERATION-ENDORPROTHETIK.DE (2015): Knieprothese. – URL: <http://www.operation-endoprothetik.de/knie/knieprothese/> [Stand 17.11.2015].
- ORNL (2007): ORNL Superconducting Technology Program for Electric Power Systems. – Annual report for FY 2006.
- ORTHOMETALS (2015): About OrthoMetals. – URL: <http://orthometals.com/> [Stand 19.11.2015].
- OUTOKUMPU (2006): Al Hidd desalination plant is the largest multiple-effect distillation plant to date. – URL: <http://www.outokumpu.com/de/stainless-news/fallstudien/the-right-package-for-desalination/Seiten/default.aspx> [Stand 08.12.2015].
- OUTOKUMPU (2008): Rostfreie Coil Produkte von extra breit bis hauchdünn. URL: http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Rostfreie_Coil_Produnkte.pdf [Stand 10.12.2015].

- OUTOKUMPU (2013): Saudi's DualDuplex steel inspired water and power solution. – URL: <http://www.outokumpu.com/en/stainless-news/cases/saudi-dualduplex/Pages/default.aspx> [Stand 08.12.2015].
- OUTOKUMPU (o. J.): Produktlebenszyklus. – URL: <http://www.outokumpu.com/de/nachhaltigkeit/nachhaltiger-produkte/produktlebenszyklus/Seiten/default.aspx> [Stand 12.04.2016].
- VERTON, G. (2013): Photonic Materials: Chemical element availability impacts the future of photonics. – URL: <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-49/issue-02/features/photronics-applied--photonic-materials--chemical-element-availabi.html> [Stand 12.04.2016].
- OWENS, B. & MCGUINNESS, J. (2015): GE-Fuels Cells the Power of Tomorrow. – URL: www.ge.com/sites/default/files/GE_FuelCells.pdf [Stand 12.04.2016].
- PALT, K. (Hrsg.) (2015): Flugzeuglexikon. – URL: http://www.flugzeuginfo.net/acdata_dt.php [Stand 16.11.2015].
- PASCHOTTA, R. (2008a): Laser crystals. – In: *The Encyclopedia of Laser Physics and Technology*. – Wiley-VCH. – ISBN 978-3-527-40828-3.
- PASCHOTTA, R. (2008b): Rare-earth-doped gain media. – In: *The Encyclopedia of Laser Physics and Technology*. – Wiley-VCH. – ISBN 978-3-527-40828-3.
- PASCHOTTA, R. (2013): Laser Gain Media: A Diverse Family of Materials. – *Photonics Spectra*. – URL: <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=53768> [Stand 12.04.2016].
- PEHRKE, J. (2013): BAYER beendet das Geschäft mit Kohlenstoff-Nanoröhrchen – Gesundheitliche Risiken unklar. – URL: <http://www.nrhz.de/flyer/beitrag.php?id=19036> [Stand 10.11.2015].
- PERPETUUM (o. J.): Internetauftritt der Fa. Perpetuum. – URL: www.perpetuum.co.uk [Stand 27.07.2015].
- PETERMANN, K. (2015): Herstellung von Lichtwellenleitern (TECH). – Einführung in die optische Nachrichtentechnik. – Institut für Hochfrequenz- und Halbleiter-Systemtechnologien, TU Berlin, Berlin.
- PETROSA (2015): GTL Technology. – URL: http://www.petrosa.co.za/innovation_in_action/Pages/GTL-TECHNOLOGY.aspx [Stand 25.11.2015].
- PHILIPS (2008): Schneller drehen mehr sehen: Hochleistungs-Computertomograph von Philips bietet neue Möglichkeiten in der Diagnostik. – Pressemitteilung vom 23.4.2008 – URL: http://www.newscenter.philips.com/de_de/healthcare/news/press/2008/20080423_ct_germany.wpd#Vw0bl0ZR73A [Stand 29.07.2015].
- PHOTONICS21 (2009): Towards Green Electronics in Europe: Strategic Research Agenda Organic & Large Area Electronics. – URL: http://www.photonics21.org/download/olae_sra.pdf [Stand 11.08.2015].
- PICHLER, G. (2015): E-Auto C1 lädt sich per Induktion kabellos auf. Pressemitteilung vom 23.07.2011, Nachrichtenagentur presstext, Wien.
- PIHL, E., KUSHNIR, D., SANDÉN, B. & JOHNSON, F. (2012): Material constraints for concentrating solar thermal power. – *Energy* 44(1): 944–954. – DOI: 10.1016/j.energy.2012.04.057.
- PLASTVERARBEITER (2013): BMW startet Serienproduktion des i3 mit CFK-Karosserie. – URL: <http://www.plastverarbeiter.de/15981/bmw-startet-serienproduktion-des-i3-mit-cfk-karosserie/> [Stand: 19.2.2015].
- PLÖTZ, P., GNANN, T., KÜHN, A. & WIETSCHEL, M. (2013): Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge. – Studie im Auftrag der acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und der Arbeitsgruppe 7 der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) – Fraunhofer ISI; Karlsruhe.
- POLLMANN, M. (2011): Geschichte der Supraleiter. Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. – URL: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/stoffe/supraleiter/geschichte/> [Stand: 23.10.2015]
- POOLMAN, R.W., VERHAAR, J.A.N., SCHREURS, B.W., BOM, L.P.A., NELISSEN, R.G.H.H., KOOT, H.W.J. ET AL. (2015): Finding the right hip implant for patient and surgeon: the Dutch strategy – empowering patients. – *Hip international: the journal of clini-*

cal and experimental research on hip pathology and therapy 25(2): 131–137. – DOI: 10.5301/hip-int.5000209.

PRIEMER, B. (2015): Selbstversuch mit BMW i3 Remote Parking. – Auto Motor Sport Online. URL: <http://www.auto-motor-und-sport.de/news/selbstversuch-bmw-i3-remote-parking-parken-mit-hang-zur-perfektion-9143838.html> [Stand: 19.2.2015].

PRUSSEIT, W. (2014): Supraleiterindustrie International. Zukunft und Innovation der Energietechnik mit Hochtemperatur-Supraleitern. – URL: http://www.ivsupra.de/images/ziehl/zielvortraege_2014/ZIEHL_2014_Energiewende_Supraleiterindustrie-International_ivSupra_Prusseit.pdf [Stand 12.04.2016].

PUSCHMANN, S. (2008): Kernspintomographie. – URL: <http://www.radiologie-damme.de/dkernspintomographie.htm> [Stand 29.07.2015].

PUTNAM, G. (2014): EMC Metals Corp – Investor Presentation. – URL: <http://emcmetals.com/i/pdf/Presentation.pdf> [Stand 14.11.2015].

PV MAGAZINE (2013): First Solar invests in Mexican tellurium mine. – URL: http://www.pv-magazine.com/news/details/beitrag/first-solar-invests-in-mexican-tellurium-mine_100004692/#axzz2OB-Sm9Kwe [Stand 12.04.2016].

PwC 3D PRINTING (2014): Beyond prototyping. – URL: <http://www.pwc.com/us/en/industrial-products/next-manufacturing/3d-printing-beyond-prototyping.jhtml> [Stand 12.04.2016].

QUADBECK-SEEGER, H.-J. (2007): Die Welt der Elemente - Die Elemente der Welt. – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

QUASCHNING, V. (2011): Regenerative Energiesysteme. Technologie - Berechnung - Simulation. 7. Aufl. Hanser; München.

RAGWITZ, M. (2007): Zukunftsmarkt Solarthermische Stromerzeugung. Umwelt, Innovation und Beschäftigung (3). – URL: <http://opus.kobv.de/zlb/volltexte/2008/6347/pdf/3446.pdf> [Stand 08.10.2015].

RAND EUROPE, RWTH AACHEN, P3 INGENIEURSGESELLSCHAFT (2012): SMART TRASH: Study on RFID tags and the recycling industry. – Studie für die Europäische Kommission (D6) SMART 2010/0042.

RAUGEI, M. (2012): Energy pay-back time: methodological caveats and future scenarios. – Progress in Photovoltaics 21(4): 797–801 – DOI: 10.1002/pip.1249 – URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.1249/abstract?globalMessage=0> [Stand: 13.04.2016].

REIDL, A. (2013): Chinas E-Bike-Boom auf Kosten der Umwelt. – URL: <http://blog.zeit.de/fahrrad/2013/12/20/chinas-e-bike-boom-auf-kosten-der-umwelt/> [Stand 14.12.2015].

REISER, M.F. & SEMMLER, W. (2002): Magnetresonanztomographie. – Springer-Verlag; Heidelberg.

REPORTLINKER.COM (2015): Global Consumer Electronics Market Outlook 2020. – URL: <http://www.reportlinker.com/p01103485-summary/Global-Consumer-Electronics-Market-Outlook.html> [Stand 30.11.2015].

RESEARCH AND MARKETS (2014): Global Insulation Market 2014-2018. – URL: http://www.researchandmarkets.com/research/frscrd/global_insulation [Stand 12.11.2015].

RESEARCH AND MARKETS (2015): Industrial Motors Market Analysis - By Product; By Voltage Range; By Rotor; By End Use - With Forecast (2015 - 2020). – URL: http://www.researchandmarkets.com/research/qpc9l7/industrial_motors [Stand 11.11.2015].

REVE (2014): Top 10 wind turbines suppliers. – URL: <http://www.evwind.es/2014/03/27/top-10-wind-turbines-suppliers/44405> [Stand 25.11.2015].

RFID JOURNAL (2015): How much does an RFID tag cost today? – URL: <http://www.rfidjournal.com/faq/show?85> [Stand: 05.03.2015].

ROBINSON, J.C., POZEN, A., TSENG, S. & BOZIC, K.J. (2012): Variability in costs associated with total hip and knee replacement implants. – The Journal of bone and joint surgery, 94(18): 1693–1698. – DOI: 10.2106/JBJS.K.00355.

- RODITI (2015): Nd:YAG Laser Crystal- Neodymium-Doped: Yttrium Aluminium Garnet. – URL: http://www.roditi.com/Laser/Nd_Yag.html. [Stand: 22.04.2015].
- ROFIN (2014): Geschäftsbericht 2013.
- ROGLIA, E. & CRAGLIA, M. (2012): UAV assessment to support EU policies. Präsentation. – JRC - Joint Research Center. – URL: <http://3dom.fbk.eu/repository/files/uav/slides/roglia.pdf> (Download: 15.04.2016).
- ROHRIG, K. (Hrsg.) (2014): Windenergie Report Deutschland 2013. – URL: http://windmonitor.ives.fraunhofer.de/windmonitor_de/5_Veroeffentlichungen/1_windenergiereport/index.html
- ROHS-DIRECTIVE (2011): Directive on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment: RoHS-Directive 174.
- ROHSGUIDE.COM (2015): Other RoHS Green Initiatives Worldwide. – URL: <http://rohsguide.com/rohs-future.htm> [Stand 11.12.2015].
- RÖMPP (Hrsg.) (o. J.): Chemisches Lexikon. – URL: <http://www.roempp.com/prod/roempp.php> [Stand 08.04.2016].
- RÖMPP (2015a): Polyacrylnitrile. Römpp-online. Georg Thieme Verlag KG. – URL: <https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-16-03017> [Stand 19.02.2015].
- RÖMPP (2015b): Kohlenstoff-Fasern. Römpp-online. Georg Thieme Verlag KG. – URL: <https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-11-01496> [Stand 19.02.2015].
- RÖMPP (2015c): Ammonoxidation. Römpp-online. Georg Thieme Verlag KG. – URL: <https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-01-02185> [Stand 19.02.2015].
- ROOS, G. (2007): Expect mixed prices, slow growth for tantalum capacitors (Market overview). – URL: <https://www.highbeam.com/doc/1G1-171768746.html> [Stand 15.11.2007].
- ROSE, B. (2015): 120.000 Brennstoffzellen-Heizgeräte bei Ene-Farm. – URL: <http://www.hzwei.info/blog/2015/09/10/120-000-brennstoffzellen-heizgeraete-bei-ene-farm/> [Stand: 17.11.2015].
- ROSKILL INFORMATION SERVICES (2010): Rhenium: Market Outlook to 2015. – URL: <http://imining.com/2011/11/16/rhenium-market-outlook-to-2015-8th-edition-2010/> [Stand 10.02.2016].
- ROSKILL INFORMATION SERVICES (2011): Rare Earths & Yttrium: Market Outlook to 2015. 14. – Edition 2011; London, England.
- ROTTER, V.S., UEBERSCHAAR, M. & PERRINE, C. (2013): Rückgewinnung von Spurenmetallen aus Elektroaltgeräten. – In: THOMÉ-KOZMIENSKY, K.J. & GOLDMANN, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe; Neuruppin.
- SANDER, K., SCHILLING, S., WAMBACH, K., SCHLENKER, S., MÜLLER, A., SPRINGER, J., FOUQUET, D., JELITTE, A., STRYI-HIPP, G. & CHROMETZKA, T. (2007): Studie zur Entwicklung eines Rücknahme- und Verwertungssystems für Photovoltaische Produkte. – URL: http://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2012/12655/pdf/Gesamtbericht_PVCycle_de.pdf [Stand 30.06.2015].
- SANDMEYER STEEL COMPANY (2008): SAF 2507®. Produktdatenblatt.
- SCHADE, W., WIETSCHEL, M. & WEAVER, P.M. (2007): Reframing Sustainable Transport: Exploring Hydrogen Strategies Using Integrated Sustainability Assessment. – MATISSE Working Papers, 15 (07/2007). – SERI Nachhaltigkeitsforschung und -kommunikations GmbH; Wien.
- SCHADE, W., ZANKER, C., KÜHN, A., KINKEL, S., JÄGER, A., HETTESHEIMER, T. & SCHMALL, T. (2012): Zukunft der Automobilindustrie. Innovationsreport. – Studie des Fraunhofer ISI für das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. – TAB Arbeitsbericht Nr. 152.
- SCHMAL, V. (2010): Neodym-Nachfrage für Zukunftstechnologien. Diplomarbeit. Duale Hochschule Baden-Württemberg; Heidenheim.
- SCHMIDT, M. (2014a): Mobilität 2035. Hat der Verbrennungsmotor eine Zukunft? – Vortrag des Vorstandsvorsitzenden der BP Europe SE auf der Zeit-Konferenz am 05.05.2014 in Stuttgart.

- SCHMIDT, M. (2014b): Rohstoffrisikobewertung – Platingruppenmetalle. Platin, Palladium, Rhodium (Datenstand: Dezember 2014). – DERA Rohstoffinformationen, 26; Berlin.
- SCHMIDTKE, K., PALM, F., HAWKINS, A., EMMELMANN, C. (2011): Process and Mechanical Properties: Applicability of a Scandium modified Al-alloy for Laser Additive Manufacturing. – Physics Procedia 12: 369–374.
- SCHNEIDER, B. (2014): Vakuumentank speichert Wärme. Perlit-Pulver in Speicherwand reduziert Wärmeverluste. – BINE Projektinfo 14/2014. – FIZ Karlsruhe, Leibniz-Institut für Informationsinfrastruktur GmbH (Hrsg.). – URL: www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Projekt-Infos/2014/Projekt_14-2014/ProjektInfo_1414_internetx.pdf [Stand: 13.04.2016].
- SCHRAVEN, S., KLEY, F. & WIETSCHEL, M. (2010): Induktives Laden von Elektromobilen. Eine techno-ökonomische Bewertung. – Studie des Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung für das Projekt Meregio Mobil des BMWi. – Working Paper Sustainability and Innovation, 8/2010.
- SCHRIEFL, E., BRUCKNER, M., HAIDER, A. & WINDHABER, M. (2013): Metallbedarf von Erneuerbare-Energie-Technologien. Progress Report 2 im Rahmen des Projekts Feasible Futures for the Common Good. – URL: www.umweltbuero-klagenfurt.at/feasiblefutures/wp-content/uploads/FFProgressReport2_final_22072013_endversion.pdf [Stand: 13.04.2016].
- SCHRÖDER, T. (2004): CT-Detektor-Know-how. Wie aus Keramik und Elektronik Medizintechnik wird. – Medical Solutions, 07/2004: 62–68.
- SCHRÖDER, T. (2015): Steckdose ade. – Fraunhofer Magazin weiter.vorn 2/15: 32–34.
- SCHÜLER, D., BUCHERT, M., LIU, R., DITTRICH, S. & MERZ, C. (2011): Study on Rare Earths and Their Recycling. – Studie des Öko-Institut e. V. für die Fraktion der Grünen/EFA im Europäischen Parlament. – URL: www.oeko.de/oekodoc/1112/2011-003-en.pdf [Stand: 13.04.2016].
- SCHWARZ, J.A., CONTESCU, C.I. & PUTYERA, K. (2004): Dekker encyclopédia of nanoscience and nanotechnology. – CRC Press.
- SEILER, E. & WOIDASKY, J. (2013): Recycling von Windkraftanlagen. Vortrag auf der Hamburg T.R.E.N.D. am 06.02.2013.
- SEILNACHT.COM (2016): Scandium. – URL: <http://www.seilnacht.com/Lexikon/21Scandi.htm> [Stand: 13.02.2016].
- SHELL (2014): Shell PKW-Szenarien bis 2040. Fakten, Trends und Perspektiven für Auto-Mobilität. – URL: <http://www.shell.de/aboutshell/media-centre/annual-reports-and-publications/shell-pkwszenarien.html> [Stand 19.02.2015].
- SIEMENS (2004): Keramikdetektoren. – Picture of the future, Herbst 2004; München. – URL: <http://www.siemens.com/innovation/de/home/pictures-of-the-future/archiv.html> [Stand 29.07.2015].
- SIEMENS (2006): MAGNETOM Avanto. – Produkt-Umweltdeklaration; München. – URL: <http://www.siemens.com/about/sustainability/de/umweltportfolio/produkte-loesungen/gesundheitsversorgung/somatom-definition-as.htm> [Stand 29.07.2015].
- SIEMENS (2007): SOMATOM Definition. – Produkt-Umweltdeklaration; München.
- SIEMENS (2011a): Induktives Laden für Elektroautos. – Siemens Innovation Day 2011; München. <http://www.siemens.com/press/pool/de/events/2011/corporate/2011-05-InnovationDay/Fact-Sheet-Induktives-Laden.pdf> [Stand 19.02.2015]
- SIEMENS (2011b): SOMATOM FLASH. – Produkt-Umweltdeklaration; München. – URL: <http://www.siemens.com/about/sustainability/de/umweltportfolio/produkte-loesungen/gesundheitsversorgung/somatom-definition-flash.htm> [Stand 05.08.2015].
- SIEMENS (2014): Alles was Sie über 3D-Druck wissen müssen. – URL: <http://www.siemens.com/innovation/de/home/pictures-of-the-future/industrie-und-automatisierung/3d-druck-infografik.html> [Stand 27.04.2015].

- SIMPSON, C. (2012): The Deadly Tin Inside Your Smartphone. – URL: <http://www.bloomberg.com/bw/articles/2012-08-23/the-deadly-tin-inside-your-ipad#p4> [Stand 11.12.2015].
- SITTINGER, V. (2012): interviewt durch Max Marwede, 25. September 2012, Frankfurt am Main; Large Area Electronics.
- SNWG - SILVER NANOTECHNOLOGY WORKING GROUP (2014): Comments of the silver nanotechnology working group for review by the European Commission Scientific committee on emerging and newly identified health risks (SCENIHR); Durham.
- SPECTRA-PHYSICS (2015): LIDAR Erbium Pulsed Fiber Lasers. – URL: <http://www.spectra-physics.com/applications/lidar#overview> [Stand 18.04.2015].
- SPEISER, J. (2014): History, principles and prospects of thin-disk lasers. – URL: http://www.eli-beams.eu/wp-content/uploads/2013/11/Speiser_thin_disk_hist_scaling.pdf German [Stand 15.04.2015]
- SPIEGEL (2014): Das Auto von morgen. – DER SPIEGEL Wissen, 4: 14–17.
- SPLETTSTÖSSER, J. (2008): Interview mit J. Splettstößer, United Monolithic Semiconductors, geführt von MARWEDE, M., Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung.
- STAHL-INFORMATIONEN-ZENTRUM (Hrsg.) (2005): Merkblatt 401. Elektroband und -blech.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2015a): Inlandsproduktsberechnung - Lange Reihen ab 1970–2014. – Fachserie 18, Reihe 1.5. – URL: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/VolkswirtschaftlicheGesamtrechnungen/Inlandsprodukt/InlandsproduktsberechnungLangeReihen-PDF_2180150.html [Stand 01.02.2016].
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2015b): Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes 2013. – Fachserie 4, Reihe 4.3. – URL: <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Strukturdaten/Kostenstruktur.html> [Stand 01.02.2016].
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2015c): Preise und Preisindizes für gewerbliche Produkte (Erzeugerpreise). – Fachserie 17, Reihe 2. – URL: <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Erzeugerpreise/Erzeugerpreise.html> [Stand 01.02.2016].
- STEINBERGER-WILCKENS, R. (2008): Interview mit R. STEINBERGER-WILCKENS, Forschungszentrum Jülich, geführt von MARWEDE, M., Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 11.09.2008.
- STEINFELDT, M., GLEICH, A. v., PETSCHOW, U., HAUM, R., CHUDOBA, T. & HAUBOLD, S. (2004): Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte. – Studie des Instituts für ökologische Wirtschaftsforschung, Berlin für das BMBF.
- STEPHENSON, R. ET AL. (2004): Electrical Performance Characteristics of MLCC's with low Lay-down AgPd Powders. – CARTS Europe 2004: 18th Annual Passive Components Conference, 18.-21.10.2004; Helsinki, Finnland.
- STERN (2015a): Am Ende muss einer entscheiden. Interview mit Martin Winterkorn – Stern, 10: 77–81.
- STERN (2015b): Kumpel, fahr du! Lenkzeit wird Freizeit. stern-Reporter Boris Wintzenburg vertraute sein Leben dem rollenden Roboter Jack an – als erster Journalist auf deutschen Autobahnen. – Stern 9: 86–89.
- STIELER, W. (2005): Atomkraft zur Meerwasserentsalzung. Interview mit Anne Lauvergeon (Fa. Areva). – URL: <http://www.heise.de/tr/Atomkraft-zur-Meerwasserentsalzung-/artikel/66059>.
- STIFTUNG WARENTEST (2006): Hüftoperation: Kust der kleinen Schnitte. – test 4/2006: 88–91. – URL: <https://www.test.de/hueftoperation-kunst-der-kleinen-schnitte-1359862-1359872/> [Stand 17.11.2015].
- STRATEGY ANALYTICS (2014): Home 3D Printers Could Drive \$70Bn in Annual Global Market Revenues. – URL: <https://www.strategyanalytics.com/default.aspx?mod=pressreleaseviewer&a0=5600> [Stand 17.03.2015].
- SUMITOMO ELECTRIC (2015): Recycle. – URL: http://global-sei.com/super/hts_e/recycle.html [Stand 07.12.2015].

- SUMITOMO ELECTRIC (2016): Sumitomo BSCCO Wire (DI-BSCCO) Type H. – URL: http://global-sei.com/super/hts_e/type_h.html [Stand 27.11.2015].
- SUZUKI, T. & TAKAHASHI, J. (2005): Prediction of Energy Intensity of Carbon Fiber Reinforced Plastics for Mass-Produced Passenger Cars. – The Ninth Japan International SAMPLE Symposium, 29.11.-02.12.2005, S. 14–19.
- SWEATMAN, K. & SUPERIOR, N. (2006): Fact and fiction in lead-free soldering. – Global SMT and Packaging, 2006: 26–28. – URL: www.solderrecovery.com/pdf/Lead%20Free%20Article%20.pdf [Stand 11.12.2015].
- TAB – BÜRO FÜR TECHNIKFOLGEN-ABSCHÄTZUNG BEIM DEUTSCHEN BUNDESTAG (2011): Stand und Perspektiven der militärischen Nutzung unbemannter Systeme. – TAB Arbeitsbericht Nr. 144.
- TALBOT, D. (2015): Megascale Desalination. The world's largest and cheapest reverse-osmosis desalination plant is up and running in Israel. – URL: <http://www.technologyreview.com/featuredstory/534996/megascale-desalination/> [Stand 17.09.2015].
- TEAL GROUP (2012): World Unmanned Aerial Vehicle Systems: Market Profile and Forecast. – URL: <http://tealgroup.com/index.php/about-teal-group-corporation/press-releases/66-teal-group-predicts-worldwide-uav-market-will-total-89-billion-in-its-2012-uav-market-profile-and-forecast> [Stand 30.04.2015]
- TERABIT CONSULTING, INC. (2014): 2014 Submarine Cable Market Industry Report. – URL: www.terabitconsulting.com/downloads/2014-submarine-cable-market-industry-report.pdf [Stand 13.04.2016].
- TERCERO ESPINOZA, L., HUMMEN, T., BRUNOT, A., HOVESTAD, A., PENA GARRAY, I., VELTE, D., SMUK, L., TODOROVIC, J., VAN DER EIJK, C. & JOCE, C. (2014): Critical Raw Materials Substitution Profiles. – URL: <http://cdn.awsripple.com/www.criticalrawmaterials.eu/uploads/Raw-materials-profiles-report.pdf> [Stand 09.12.2014].
- THAIL, M. (2006): The trouble with lithium. Implications of future PHEV production for lithium demand. – Meridian International Research (Hrsg.); Martainville. – URL: http://www.evworld.com/library/lithium_shortage.pdf [Stand 12.11.2015].
- THE WORLD BANK (2015): Population estimates and projections. – URL: <http://data.worldbank.org/data-catalog/population-projection-tables> [Stand 18.11.2015].
- THOMÉ-KOZMIENSKY & K.J. & GOLDMANN, D. (Hrsg.) (2013): Recycling und Rohstoffe. – TK Verlag; Neuruppin.
- THYSSENKRUPP STAINLESS (2008): NIROSTA® 4565 S. – Produktdatenblatt.
- TRANSPARENCY MARKET RESEARCH (2011): Fiber Optics Components Market - Global Industry Size, Share, Trends, Analysis and Forecasts, 2011–2017. – URL: <http://www.transparencymarketresearch.com/fiber-optics-components-market.html> [Stand 07.12.2015].
- TRANSPARENCY MARKET RESEARCH (2011): Global Direct Drive wind turbines Market (2011–2016). – URL: <http://www.transparencymarketresearch.com/direct-drive-wind-turbines-market.html> [Stand 19.01.2015].
- TRANSPARENCY MARKET RESEARCH (2015): Sensible Heat Storage Technology to Dominate Thermal Energy Storage Market. – URL: <http://www.transparencymarketresearch.com/article/thermal-energy-storage-market.htm> [Stand 11.11.2015].
- TRANSPARENCY MARKET RESEARCH (2015a): Consumer Electronics (Television, Handheld Devices, Personal Computers, Cameras and Camcorders, Audio/Video Devices, Personal Care Products, Gaming Consoles) Market – Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast 2014–2022. – URL: <http://www.transparencymarketresearch.com/consumer-electronics-market.html> [Stand 11.12.2015].
- TRANSPARENCY MARKET RESEARCH (2015b): Solder Paste Market - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast 2015 - 2023. – URL: <http://www.transparencymarketresearch.com/solder-paste-market.html> [Stand 11.12.2015].
- TRI D PRINTING (2016): Bill of Materials (BOM) for Kossel Mini 3D Printer. – URL: <http://www.tridprinting.com/BOM/Kossel-Mini/> [Stand 16.03.2016].

TÜV SÜD (2006): Orthopädische Implantate. Bestimmende Faktoren der mechanischen Charakteristik und der Biokompatibilität. – Informationsblatt.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (2014): 2013 Wind Technologies Market Report. – URL: <http://energy.gov/2013-wind-report> [Stand 13.04.2016].

UEBERSCHAAR, M., ECKSTEIN, K. & SCHLUMMER, M. (2016): Zielmetall Indium. – Poster bei der Abschlussveranstaltung zum Projekt UPgrade: Indium, Gallium, Tantal & Co, Recycling von Elektrogeräten – Quo vadis?

ULLMANN, F. (2009): Carbon Fiber Reinforced Composites. Wiley-VCH Verlag; Weinheim.

ULLMANN, F. (Hrsg.) (2011): Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 7th. Edition. – Wiley-VCH; Weinheim.

UMICORE (2013): Persönliche Mitteilung vom 2.12.2015.

UMICORE (o. J.): Indium Tin Oxide (ITO) for deposition of transparent conductive oxide layers. – URL: http://www.thinfilmpproducts.umicore.com/Products/TechnicalData/show_datenblatt_ito.pdf [Stand 28.11.2014].

UMSCHLAG, T. (2012): interviewt durch Max Marwede, 25.09.2012, Frankfurt am Main; Thin-film Solar Solutions.

UN POPULATION DIVISION (2014): World Urbanization Prospects. The 2014 revision. – URL: <http://esa.un.org/unpd/wup/> [Stand 13.04.2016].

UNIVERSITÄT PADERBORN (2013): Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing – Innovation Roadmapping of Required Advancements. – URL: http://dmrc.uni-paderborn.de/fileadmin/dmrc/06_Downloads/01_Studies/DMRC_Study_Part_3.pdf [Stand 27.04.2015]

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2006): Mineral Commodity Summaries: Gallium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gallium/gallimcs06.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2007a): Mineral Commodity Summaries: Gallium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gallium/gallimcs07.pdf> [Stand 31.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2007b): Mineral Commodity Summaries: Indium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/indium/indiumcs07.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2007c): Mineral Commodity Summaries: Copper. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/coppemcs07.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2007d): Mineral Commodity Summaries: Lithium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/lithimcs07.pdf> [Stand 02.02.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2007e): Mineral Commodity Summaries: Platinum-Group Metals. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/platinum/platimcs07.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2007f): Mineral Commodity Summaries: Rhenium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rhenium/rhenimcs07.pdf> [Stand 30.10.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2007g): Mineral Commodity Summaries: Silver. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/silver/silvemcs07.pdf> [Stand 30.10.2015].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2007h): Mineral Commodity Summaries: Tantal. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/niobium/tantamcs07.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2007i): Mineral Commodity Summaries: Titanium and Titanium Dioxide. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/titanium/tidiomcs07.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2007j): Mineral Commodity Summaries: Tin. – URL: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tin/tin__mcs07.pdf [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2008a): Mineral Commodity Summaries: Germanium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/germanium/mcs-2008-germa.pdf> [Stand 30.01.2008].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2008b): Mineral Commodity Summaries: Scandium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/scandium/mcs-2008-scand.pdf> [Stand 12.02.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2008c): Mineral Commodity Summaries: Rare Earths. – URL: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2008-raree.pdf [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2011a): Mineral Commodity Summaries: Scandium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/scandium/mcs-2011-scand.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2011b): Mineral Commodity Summaries: Gallium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gallium/mcs-2011-galli.pdf> [Stand 31.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2011c): Mineral Commodity Summaries: Indium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/indium/mcs-2011-indiu.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2011d): Mineral Commodity Summaries: Copper. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/mcs-2011-coppe.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2011e): Mineral Commodity Summaries: Lithium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/myb1-2011-lithi.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2011f): Mineral Commodity Summaries: Platinum-Group Metals. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/platinum/myb1-2011-plati.pdf> [Stand 02.02.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2011g): Mineral Commodity Summaries: Rare Earths. – URL: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2011-raree.pdf [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2011h): Mineral Commodity Summaries: Silver. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/silver/mcs-2011-silve.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2011i): Mineral Commodity Summaries: Tantalum. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/niobium/mcs-2011-tanta.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2011j): Mineral Commodity Summaries: Titanium and Titanium Dioxide. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/titanium/mcs-2011-titan.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2011k): Mineral Commodity Summaries: Tin. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tin/mcs-2011-tin.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2012a): Mineral Commodity Summaries: Germanium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/germanium/mcs-2012-germa.pdf> [Stand 10.12.2015].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2012b): Mineral Commodity Summaries: Gallium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gallium/mcs-2012-galli.pdf> [Stand 31.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2012c): Mineral Commodity Summaries: Rhenium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rhenium/mcs-2012-rheni.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2013a): Mineral Commodity Summaries: Germanium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/germanium/mcs-2013-germa.pdf> [Stand 10.12.2015].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2013b): Mineral Commodity Summaries: Titanium Mineral Concentrates. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/titanium/mcs-2013-timin.pdf> [Stand 13.02.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2013c): Mineral Commodity Summaries: Titanium and Titanium Dioxide. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/titanium/mcs-2013-titan.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2014a): Mineral Commodity Summaries: Scandium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/scandium/mcs-2014-scand.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2014b): Mineral Commodity Summaries: Gallium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gallium/mcs-2014-galli.pdf> [Stand 31.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2014c): Mineral Commodity Summaries: Germanium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/germanium/mcs-2014-germa.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2014d): Mineral Commodity Summaries: Indium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/indium/mcs-2014-indiu.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2014e): Mineral Commodity Summaries: Copper. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/mcs-2014-coppe.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2014f): Mineral Commodity Summaries: Lithium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/mcs-2014-lithi.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2014g): Mineral Commodity Summaries: Platinum-Group Metals. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/platinum/mcs-2014-plati.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2014h): Mineral Commodity Summaries: Rhenium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rhenium/mcs-2014-rheni.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2014i): Mineral Commodity Summaries: Silver. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/silver/mcs-2014-silve.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2014j): Mineral Commodity Summaries: Tantalum. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/niobium/mcs-2014-tanta.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2014k): Mineral Commodity Summaries: Titanium and Titanium Dioxide. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/titanium/mcs-2014-titan.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2014l): Mineral Commodity Summaries: Titanium Mineral Concentrates. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/titanium/mcs-2014-timin.pdf> [Stand 13.02.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2014m): Mineral Commodity Summaries: Tin. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tin/mcs-2014-tin.pdf> [Stand 30.01.2014].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2015a): Mineral Commodity Summaries: Gallium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/gallium/mcs-2015-galli.pdf> [Stand 30.01.2016].

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2015b): Mineral Commodity Summaries: Barite. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/barite/mcs-2015-barit.pdf> [Stand 30.01.2016].

- USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2015c): Mineral Commodity Summaries: Manganese. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/manganese/mcs-2015-manga.pdf> [Stand 30.01.2016].
- USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2015d): Mineral Commodity Summaries: Chromium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/chromium/mcs-2015-chrom.pdf> [Stand 15.04.2016].
- USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2015e): Mineral Commodity Summaries: Rhenium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rhenium/mcs-2015-rheni.pdf> [Stand 30.01.2016].
- USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2015f): Mineral Commodity Summaries: Zirconium and Hafnium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/zirconium/mcs-2015-zirco.pdf> [Stand 30.01.2016].
- USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2015g): Mineral Commodity Summaries: Strontium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/strontium/mcs-2015-stron.pdf> [Stand 30.01.2016].
- USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2015h): Mineral Commodity Summaries: Scandium. – URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/scandium/mcs-2015-scand.pdf> [Stand 30.01.2016].
- USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (Hrsg.) (2015i): Mineral Commodity Summaries: Rare Earths. – URL: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/mcs-2015-raree.pdf [Stand 30.01.2016].
- VALENTINI, R. (2005): LSO Szintillationskristalle für PAC Applikationen. Diplomarbeit. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät. – URL: <http://tdpac.hiskp.uni-bonn.de/diplomarbeiten/Diplomarbeit-Riccardo-Valentini-2005.pdf> [Stand 15.10.2015].
- VALPY, B. (o. J.): Offshore Wind – Making a Material Difference. – BVG Associates. – URL: <http://www.bvgassociates.co.uk/Publications/BVGAssociatespublications.aspx> [Stand 17.02.2015]
- VATOPOULOS, K. & TZIMAS, E. (2012): Assessment of CO₂ capture technologies in cement manufacturing process. – *Journal of Cleaner Production* 32: 251–261. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.03.013.
- VDI 3404 E (2014): VDI-Richtlinie 3404: Additive Fertigung – Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen. – Entwurf, Mai 2014. – Beuth Verlag; Berlin.
- VDI-TZ – VDI TECHNOLOGIEZENTRUM GMBH & FRAUNHOFER ISI (2014): Gesellschaftliche Herausforderungen 2030. – Zwischenergebnis 2 des BMBF Foresight Zyklus II, Suchphase 2012-2014. – BMBF (Hrsg.).
- VDI ZRE – KOMPETENZENTRUM RESSOURCENEFFIZIENZ (2014): Ressourceneffizienz von Windenergieanlagen. – VDI ZRE Publikationen, Kurzanalyse Nr. 9.
- VDI – VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2014): Fahrerassistenzsysteme. Umfrage bei VDI Mitgliedern im Rahmen des VDI Themenradar Automobil. URL: <https://www.vdi.de/artikel/vdi-themenradar-automobil-fahrerassistenzsysteme-1/> [Stand 15.04.2015]
- VDI – VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2013): Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau. – VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 3: 66 S.. – VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH; Berlin.
- VDI – VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2014): Statusreport Additive Fertigungsverfahren. – URL: http://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/gpl_dateien/VDI_Statusreport_AM_2014_WEB.pdf [Stand 21.07.2015]
- VDMA – VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU (2013): World of Laser Technology. Core of Photonics. 11. Aufl.
- VELODYNE (o. J.): HDL-64E User's Manual. Produktinformation.
- VELODYNE (2010): High Definition Lidar HDL-64E S2.

- VELODYNE (2015): Velodyne LiDAR Puck, VLP-16, Product Description. – URL: <http://velodynelidar.com/lidar/hdlproducts/vlp16.aspx> [Stand 18.03.2015].
- VERGETIS LUNDIN, B. (2012): Thermal energy storage capacity to triple by 2020. – Fierce Energy (Hrsg.). – URL: <http://www.smartgridnews.com/story/thermal-energy-storage-capacity-triple-2020/2012-09-12> [Stand 13.04.2016].
- VGB (2011): Pre-Engineering Study „NRW Power Plant 700 °C“. – URL: https://www.vgb.org/en/research_project297.html [Stand 12.11.2015].
- VIDAL, O., GOFFÉ, B. & ARNDT, N. (2013): Metals for a low-carbon society. – Nature Geoscience, 6(11): 894–896. – DOI: 10.1038/ngeo1993.
- VIEBAHN, P., ARNOLD, K., FRIEGE, J., KRÜGER, C., NEBEL, A., RITTHOFF, M. ET AL. (2014): KRESSE - Kritische mineralische Ressourcen und Stoffströme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems. Studie des Wuppertal Instituts für das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. – URL: <http://wupperinst.org/de/projekte/details/wi/p/s/pd/38/> [Stand 13.04.2016].
- VINCENZ (2001): Beschichtungsstoffe: Begriffe aus DIN-Normen. 1. Auflage; Hannover.
- VOGEL, W. & KALB, H. (2010): Large-Scale Solar Thermal Power. Technologies, Costs and Development. – Wiley-VCH; Weinheim.
- VOLDER, M.F.L. DE, TAWFICK, S.H., BAUGHMAN, R.H. & HART, A.J. (2013): Carbon nanotubes: present and future commercial applications. – Science 339(6119): 535–539. – DOI: 10.1126/science.1222453.
- VOLLMERS, F. (2008): Maßgeschneiderter Stahl. Tailored Blanks senken Autogewicht um 20 Prozent. – Wirtschaftswoche 23.3.2008: 1.
- VOLPE - JOHN A. VOLPE NATIONAL TRANSPORTATION SYSTEMS CENTER (2013): Unmanned Aircraft System (UAS) Service Demand 2015-2035: Literature Review and Projections of Future Usage. – URL: <https://fas.org/irp/program/collect/service.pdf> [Stand: 27.04.2015].
- WAGNER, H. (2013): Herstellung von hochbelasteten Bauteilen im Resin-Transfer-Moulding Verfahren. – wbk-Herbsttagung, Karlsruhe, 24.09.2013. – Proc. Conf. Hybrider Leichtbau – Metall trifft Faserverbund, S. 53–68.
- WALLENBERGER, F.T., WATSON, J.C. & LI, H. (2001): Glass Fibers. – ASM Handbook, Vol. 21: Composites (#06781G).
- WALTER, P. (2011): Rhodia recovers rare earths. – URL: <http://www.soci.org/chemistry-and-industry/cni-data/2011/3/rhodia-recovers-rare-earth> [Stand 04.06.2015].
- WAMBSGANSS, P. & PARSPOUR, N. (2010): Stromversorgung aus dem HF-Feld. – URL: <http://www.elektroniknet.de/power/power-management/artikel/1644/> [Stand: 26.03.2015].
- WARWICK, G. & DICKERSON, L. (2012): Cooling Down? Export and civil unmanned aircraft demand will grow, but mainstay military markets may slow. – Aviation Week & Space Technology 31.12.2012, S. 80.
- WILLEKE G.P. & WEBER, R.R. (2012): Advances in Photovoltaics: Part 1. Semiconductors and Semimetals 87: 298 S.. Academic Press; London.
- WELLS FARGO (2014): Beyond 2014: Evolving Opportunities in Technology. – URL: https://www.wealthmanagementinsights.com/userdocs/pubs/Beyond_2014_Evolving_Opportunities_in_Technology_ADA.pdf [Stand 13.04.2016].
- WENDL, M. (2009): Lithium-Nachfrage für Zukunftstechnologien. – Diplomarbeit. – Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Karlsruher Institut für Technologie (KIT); Karlsruhe.
- WENGEL, J. & SCHIRRMESTER, E. (Hrsg.) (2000): Innovationsprozess vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzelle – Chancen und Risiken für die baden-württembergische Industrie. Studie des Fraunhofer ISI für das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg: 232 S.; Karlsruhe.
- WERNER, K. & WEISS, H. (2001): Schwarzbuch Markenfirmen. Die Machenschaften der Weltkonzerne. – Deuticke.

- WESOFF, E. (2014): GE Threatens to Enter Fuel Cell Market, Compete With Bloom. – URL: <http://www.greentechmedia.com/articles/read/ge-threatens-to-enter-fuel-cell-market-competes-with-bloom> [Stand 17.11.2015].
- WETTACH, S. (2013): Belgier entwickeln Motoren ohne Seltene Erden. Wirtschaftswoche. – URL: <http://www.wiwo.de/technologie/auto/elektromobilitaet-belgier-entwickeln-motoren-ohne-seltene-erden/7788358.html> [Stand 23.11.2015].
- WIETSCH, M., ARENS, M., DÖTSCH, C., HERKEL, S. ET AL. (2010): Energietechnologien 2050 – Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung. Technologienbericht. – ISI-Schriftenreihe Innovationspotenziale; Stuttgart. – URL: vg00.met.vgwort.de/na/463c501a9c0419fbc57262f052e7df?l=http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-1185350.pdf [Stand 22.11.2012].
- WIKIPEDIA (2008a): Infrared detector. – URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_detector [Stand 23.06.2008].
- WIKIPEDIA (2008b): Indium gallium arsenide. – URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Indium_gallium_arsenide [Stand 23.06.2008].
- WIKIPEDIA (2015a): Keramikkondensator. – URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Keramikkondensator#Keramikvielschicht-Chipkondensatoren_28MLCC.29 [Stand 18.12.2016].
- WIKIPEDIA (2015b): Phase Change Materials. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-change_material [Stand 18.03.2016].
- WIKIPEDIA (2015c): Meerwasserentsalzung. – URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Meerwasserentsalzung> [Stand 23.09.2015].
- WIKIPEDIA (2015d): Scandium. – URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Scandium> [Stand 07.12.2015].
- WILLEKE & EICHE (2012): Photovoltaic Material Resources. – Semiconductors and Semimetals: Advances in Photovoltaics, 87: 143–183.
- WILTS, H., LUCAS, R., GRIES, N. VON & ZIRNGIEBL, M. (2014): Recycling in Deutschland – Status quo, Potenziale, Hemmnisse und Lösungsansätze. – URL: <https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Studien-und-Materialien/SuM-Recycling-in-Deutschland-Wuppertal-Institut-Januar-2015.pdf> [Stand 13.08.2015].
- WINNACKER & KÜCHLER (Hrsg.) (2006): Chemische Technik – Prozesse und Produkte. – Band 6b Metalle: 670 S., Verlag Chemie; Weinheim.
- WITTBRODT, B.T., GLOVER, A.G., LAURETO, J., ANZALONE, G.C., OPPLIGER, D., IRWIN, J.L. & PEARCE, J.M. (2014): Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-D printers. – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.06.002> [Stand 25.04.2015].
- WITTMER, D., ERREN, M., LAUWIGI, C., RITTHOFF, M. & DRESSLER, C. (2011): Umweltrelevante metallische Rohstoffe. Teil 2: Untersuchungen zu ausgewählten Metallen: Gallium, Gold, Indium, Mangan, Nickel, Palladium, Silber, Titan, Zink, Zinn. – Wuppertal Institut (Hrsg.); Wuppertal.
- WITTENAUER, R., SMITH, L. & ADEN, K. (2013): Osteoarthritis. – Priority Medicines for Europe and the World (Hrsg.). – Hintergrundpapier 6.12. – URL: http://www.who.int/medicines/areas/priority_medicines/BP6_12Osteo.pdf [Stand 03.02.2016].
- WOHLER'S ASSOCIATES (2014): 3D Printing and Additive Manufacturing Industry Expected to Quadruple in Size in Four Years. – URL: <http://wohlersassociates.com/press65.html> [Stand 27.04.2015].
- WOLIDASKY, J. & JEANVRÉ, S. (2015): Flugzeuge in der Kreislaufwirtschaft. – Wasser und Abfall 4/2015: 36–40.
- WONG, B. (2011): Drake Landing Solar Community. – Vortrag auf der International District Energy Association (IDEA) Conference, 28.06.2011, Toronto. – URL: www.districtenergy.org/assets/pdfs/2011Annual_Conf/Proceedings/A24WONG-v03.pdf [Stand 27.11.2015].
- WOODHOUSE, M., GOODRICH, A., MARGOLIS, R., JAMES, T., DHERE, R., GESSERT, T., BARNES, T., EGGERT, R. & ALBIN, D. (2015): Perspectives on the pathways for cadmium telluride photovoltaic module manufacturers to address expected increases

in the price for tellurium. – *Solar Energy Materials and Solar Cells* 115 (8): 199–212.

WORLD BANK GROUP (2015): *Global Economic Prospects, January 2015: Having Fiscal Space and Using It*. – URL: <http://www.worldbank.org/en/publication/global-economic-prospects/summary-table> [Stand 02.02.2016].

WORLDMETERS (o. J.): „World Population Clock“. – URL: <http://www.worldmeters.info/world-population/> [Stand 27.11.2014].

WUPPERTAL INSTITUT (Hrsg.) (2007): *Strukturell-ökonomisch-ökologischer Vergleich regenerativer Energietechnologien (RE) mit Carbon Capture and Storage (CCS)*. – Studie des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt und Energie GmbH, Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, Instituts für Technische Thermodynamik, Zentrums für Sonnenenergie und Wasserstoffforschung und Potsdam Instituts für Klimafolgenforschung für das BMU; Wuppertal, Stuttgart, Potsdam.

XU, X., METEYER, S., PERRY, N., ZHAO, Y. F. (2014): *Energy consumption model of Binder-Jetting Additive Manufacturing Processes*. – *International Journal of Production Research* 53 (23): 7005–7015.

YOLE – YOLE DÉVELOPPEMENT (2012): *GaAs Wafer Market and Applications: 2012 Edition*. – Lyon.

YOLE – YOLE DÉVELOPPEMENT (2013a): *Infrared Detectors Technology & Market Trends*. – Lyon.

YOLE – YOLE DÉVELOPPEMENT (2013b): *Status of the LED Industry: Market Analysis, Industry Status, Players and Main Applications for LEDs*. – Lyon.

ZEDNICEK, T. (2006): *Trends in Tantalum and Niobium Capacitors*. – URL: http://www.avx.com/docs/techinfo/New_Tantalum_Technologies.pdf [Stand 13.12.2015].

ZENG, G., McDONALD, S. & NOGITA, K. (2012): *Development of high-temperature solders: Review*. – *Microelectronics Reliability*, 52(7): 1306–1322. – DOI: 10.1016/j.microrel.2012.02.018.

ZERVOS, H. (2013): *Dye Sensitized Solar Cells (DSSC/DSC) 2013-2023: Technologies, Markets, Players*. – URL: <http://www.idtechex.com/research/reports/dye-sensitized-solar-cells-dssc-dsc-2013-2023-technologies-markets-players-000345.asp> [Stand 15.12.2015].

ZERVOS, H. (2014): *Thermoelectric energy harvester market to reach almost \$1bn in 2024*. – URL: <http://www.idtechex.com/research/articles/thermoelectric-energy-harvester-market-to-reach-almost-1bn-in-2024-00006780.asp> [Stand 27.11.2015].

ZHU, X. & PEYGHAMBARIAN, N. (2010): *High-Power ZBLAN Glass Fiber Lasers: Review and Prospect*. – *Advances in OptoElectronics* 2010: 23 S. – DOI:10.1155/2010/501956.

ZIMMER BIOMET (2014): *Trabecular Metal(TM) Technology*. – URL: <http://www.zimmer.com/medical-professionals/our-science/common/trabecular-metal-technology.html> [Stand 19.11.2015].

ZIV – ZWEIRAD-INDUSTRIE-VERBAND (2014): *E-Bikes bescheren der Fahrradindustrie weiterhin gute Umsätze*. – Pressemitteilung vom 25.03.2014. – URL: ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/PDFs/PM_25.03.2014_E-Bikes.pdf [Stand 24.11.2015].

ZIV – ZWEIRAD-INDUSTRIE-VERBAND (2015): *Zahlen – Daten – Fakten zum Deutschen Fahrradmarkt 2014. Freude am Radfahren auch im Jahr 2014 ungebremst*. – Pressemitteilung vom 18.03.2015. – URL: <http://ziv-zweirad.de/news/detail/article/zahlen-daten-fakten-zum-fahrradmarkt-2014/> [Stand 24.11.2015].

ZVEI – ZENTRALVERBAND ELEKTROTECHNIK- UND ELEKTRONIKINDUSTRIE E.V. (2003): *Umbrella Specification. Passive Components: Ceramic Capacitors*. – URL: http://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Fachverbaende/Electronic_Components/Umbrella_Specs/Passive_Components/Ceramic_Capacitors/USpecs_MLCC_DR_Ver02.pdf [Stand 06.10.2008].

Untersuchte Zukunftstechnologien

In der folgenden Liste finden sich die Zukunftstechnologien, aus denen als erster Arbeitsschritt des Projektes die neu hinzukommenden zehn Technologien ausgewählt wurden.

Die Schlussfolgerungen aus den 32 aktualisierten und zehn neuen Technologiesynopsen sind in der Tabelle enthalten. Für die anderen Technologiesynopsen basiert die Charakterisierung zum Stand der Technik, dem Markt, Rohstoffbedarf und dem Recyclingpotential auf der Einschätzung der Projektbearbeiter.

Tab. A.1: Liste der Zukunftstechnologien (farblich markiert sind, basierend auf der Vorgängerstudie, aktualisierte Technologiesynopsen bzw. neue Synopsen)

| Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung | Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl) | Stand der Technik 2013 | | | | Markt 2035 | | | Rohstoffbedarf 2035 | | | Recyclingpotenzial 2035 | | | |
|---|--|------------------------|-------------|----------|----------|------------|---------|-----------|---------------------|----------|----------|-------------------------|---------------|------|------------------|
| | | Forschung | Entwicklung | Prototyp | Im Markt | Einführung | Nutzung | Sättigung | Unkritisch | Intensiv | Sensitiv | Ja | Eingeschränkt | Nein | Nein, dissipativ |
| 1 Automatisches Pilotieren von Straßenfahrzeugen Elektronische Notbrems-, Konvoi- und Spurführungshilfen für PKW und LKW. | Elektronik: Cu, Si, Sn Sensoren: Nd, Y, Al | X | | | | X | X | | | X | | X | | | |
| 2 Elektrische Traktionsmotoren für Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge Innovative Elektromotoren für Kraftfahrzeuge. | Spulen: Cu Magnete: Seltene Erden (Fe-B-Nd, SmCo) | | | | X | X | X | | | X | X | | | | |
| 3 Energiequelle für Satelliten Radionuklidbatterie bspw. für die Galileo-Satelliten. | Pm | | | | X | | X | | | | | | | X | |
| 4 HC/CI Verbrennungsmotoren Effiziente, emissionsarme Verbrennungsmotoren für Kraftfahrzeuge. | Fe, Al, Mg | | | | | | X | | | X | | | | | |
| 5 Hocheffiziente Abgasreinigungssysteme für Dieselfahrzeuge Oxidations-, Speicher- und SCR-Katalysator, Partikelfilter zur Abreinigung auf Ottomotorenstandard. | Oxydations-Katalysator: Pt, Pd SCR: W, V Cr-Stahl Keramik: Seltene Erden (Ce, La) | | | | | X | | X | | | | X | | | |
| 6 Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke Hochwarmfeste Werkstoffe für künftige Generationen von energieeffizienten und superleisen Strahltriebwerken. | Cr, Co, Ti | | X | | | | | X | | X | | | X | | |
| 7 Hybridelektrische Kraftfahrzeuge Autarke Vollhybrid- und Plug-in-Hybridfahrzeuge mit Netzrückspeisung. | Verbrennungsmotor: Stahl, Alu Elektromotor: Cu, Nd, Sm Elektronik: Cu, Si, Sn | | | X | | | | X | | | | | | | X |

| Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung | Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl) | Stand der Technik 2013 | | | | Markt 2035 | | | Rohstoffbedarf 2035 | | | Recyclingpotenzial 2035 | | | |
|---|---|------------------------|-------------|----------|----------|------------|---------|-----------|---------------------|----------|----------|-------------------------|---------------|------|------------------|
| | | Forschung | Entwicklung | Prototyp | Im Markt | Einführung | Nutzung | Sättigung | Unkritisch | Intensiv | Sensitiv | Ja | Eingeschränkt | Nein | Nein, dissipativ |
| 8 Intelligente Lenkung des Straßenverkehrs Satellitengestützter (GPS, Galileo) bidirektionaler Informationsaustausch zwischen Fahrzeugen sowie Leitzentrale und Fahrzeugen. | Elektronik: Cu, Si, Sn | | X | | | | X | | X | | | X | | | |
| 9 Katalytischer Kraftstoffzusatz Kraftstoffadditiv zur integrierten katalytischen NOx-Reduktion. | Ce | X | | | | | X | | X | | | | | X | |
| 10 Stahlleichtbau mit Tailored Blanks Gewichtsreduktion zur Kraftstoffeinsparung durch leichte und lokal hochfeste Materialien. | Stahlleichtbau (Tailored Blanks), Stahl-Alu-Hybridleichtbau, Mg-Druckgussteile, Ti, Kunststoffe | | | X | | | X | | X | | X | | | | |
| 11 Magnetschwebebahn Schnelles bodengebundenes Langstrecken-Verkehrsmittel mit Spitzengeschwindigkeiten von bis zu 500 km/h (Transrapid, MAGLEV). | Stahl, Cu, Co. Magnete: Nd, Sm Supraleiter | | | X | | | X | | X | | X | | | | |
| 12 Infrarot-Detektoren in Nachsichtgeräten Nah- und Fern-Infrarotgeräte in Gebäude- und Sicherheitstechnik. | V, Li, Nb, Pb, Ge, La, Sc, Nb, Ta | | | | X | | X | | X | | | | X | | |
| 13 Legierungen für den Airframe-Leichtbau Neuartige Legierungen zur kostengünstigen Fertigung und Treibstoffeinsparung im Flugzeugbau. | Al-Mg-Sc, Al-Li, Faserverbundwerkstoffe | | | | X | | X | | X | | X | | | | |
| 14 PEM-Brennstoffzellen für Elektrofahrzeuge Brennstoffzelle als Traktionsstromquelle in Fahrzeugen. | Pt | | X | | | | X | | X | | X | | | | |
| 15 Superkondensatoren für Kraftfahrzeuge Pufferung von Elektrizität und schnelle Entladung bei Dynamikspitzen im Fahrbetrieb. | C, Kohlenstoff-Aerogele, Ta, Al, Ti, Kunststoffe, organische Lösungsmittel | | X | | | | X | | X | | | X | | | |

| Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung | Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl) | Stand der Technik 2013 | | | | Markt 2035 | | | Rohstoffbedarf 2035 | | | Recyclingpotenzial 2035 | | | |
|--|---|------------------------|-------------|----------|----------|------------|---------|-----------|---------------------|----------|----------|-------------------------|---------------|------|------------------|
| | | Forschung | Entwicklung | Prototyp | Im Markt | Einführung | Nutzung | Sättigung | Unkritisch | Intensiv | Sensitiv | Ja | Eingeschränkt | Nein | Nein, dissipativ |
| 16 Unbemannte Luftfahrzeuge für kommerzielle Anwendungen Zum Gütertransport | Al-Mg-Sc-Zr (Hülle); Rb, Cs, K (Sensorik) | | | X | | | X | | X | | | X | | | |
| 17 Individuelle Fluggeräte | Leichtbaumaterialien, Elektronik | | | X | | X | | | X | | | | | | |
| 18 Adaptive Bauteile in Kfz, Luft- und Raumfahrt | Magnetorheologische Flüssigkeiten; Fe | | X | | | X | | | X | | | X | | | |
| 19 Minisatelliten Echtzeitfähige Lagedarstellung in Risiko- und Krisenmanagementsystemen | Elektronik | | X | | | X | | | X | | | | X | | |
| 20 Blue Ray DVD Kurzweiliger Laser für höchste Speicherdichte auf DVD. | Laser: GaN (Gallium(III)nitrid) | | | | X | | | X | | X | | | | X | |
| 21 Brennstoffzellen für mobile Geräte Brennstoffzellen für die Langzeit Stromversorgung von portablen Geräten der Informations- und Kommunikationstechnik. | Pt | | | | | | | X | | X | | | | | |
| 22 Bleifreie Lote Elektrische Kontaktierung mikroelektronischer Bauteile. | Bleifreie Lote: Sn, Ag, Cu, Bi Bumping: Au, Ni Kontakte: Re, Ag | | | | X | | | X | | X | | | X | | |
| 23 Glasfaserkabel Hochleistungs-Breitbandtelekommunikation durch Einsatz von Glasfasern. | Ge (Dotierung) | | | | X | | | X | | X | | | | X | |
| 24 Hochpräzise Satellitennavigation Bereitstellung meteregenauer ortsbezogener Informationen für Navigation und Information (Galileo Dienste) | Elektronik: Cu, Si, Sn Satelliten: Ti | | X | | | | | X | | X | | | | X | |

| Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung | Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl) | Stand der Technik 2013 | | | | Markt 2035 | | | Rohstoffbedarf 2035 | | | Recyclingpotenzial 2035 | | | |
|---|--|------------------------|-------------|----------|----------|------------|---------|-----------|---------------------|----------|----------|-------------------------|---------------|------|------------------|
| | | Forschung | Entwicklung | Prototyp | Im Markt | Einführung | Nutzung | Sättigung | Unkritisch | Intensiv | Sensitiv | Ja | Eingeschränkt | Nein | Nein, dissipativ |
| 52 Farbstoffsolarzellen Technisch einfaches, kostengünstig im Siebdruck herstellbares Solarmodul für die Stromerzeugung. | Photovoltaisch aktiver Stoff: Ru auf TiO ₂ Elektroden: SnO ₂ , ITO, Pt Glas, Ag | | X | | | | X | | X | | | X | | | |
| 53 Fusionskraftwerke Kernfusion als Energiequelle. | Li, Be, Cr, Cu, Mg, Nb, Pb, Sn, Ta, Ti, V, W | X | | | | X | | | X | | | | | | |
| 54 Gas to Liquid (GtL) Herstellung synthetischer Kraftstoffe aus Erdgas. Erdölsubstitution und Übergangstechnologie zur Wasserstoffwirtschaft. | Stahl, Co, Pt, Pd, Rh, Re | | | X | | X | | | X | | X | | | | |
| 55 GD Kraftwerke Hoch effizientes kombiniertes Gas- und Dampfurbinenkraftwerk mit elektrischen Wirkungsgraden deutlich über 60 %. | Stahl, Ti, Ni, Cr, Co, Keramiken, Re | | | X | | X | | | X | | X | | | | |
| 56 IGCC Kraftwerke Hoch effiziente Integrated Gasification Combined Cycle Kohlekraftwerke mit elektrischen Wirkungsgraden an die 60 %. | Stahl, Ti, Ni, Cr, Keramiken, Re | | X | | | | X | | X | | X | | | | |
| 57 Keramik-Metallhalogenid-Lampen Hocheffiziente Lichterzeugung großer Helligkeit. | Sc, Seltene Erden, Dy, Nb, Ti | | | | X | | | | X | | | X | | | |
| 58 Lithium-Ionen-Hochleistungs-Elektrizitätsspeicher für PKW Elektrizitätsspeicher mit höchster Leistungs- und Energiedichte für Fahrzeuge, mobile elektronische Geräte und Powerfools. | Co, Li | | | | X | | | | X | | X | | | | |
| 59 Metallhydrid Wasserstoffspeicher Energiespeicherung hoher Speicherdichte. | Ni, Co, La, Nd | | X | | | | | | | | X | | | | |

| Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung | Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl) | Stand der Technik 2013 | | | | Markt 2035 | | | Rohstoffbedarf 2035 | | | Recyclingpotenzial 2035 | | | |
|---|---|------------------------|-------------|----------|----------|------------|---------|-----------|---------------------|----------|----------|-------------------------|---------------|------|------------------|
| | | Forschung | Entwicklung | Prototyp | Im Markt | Einführung | Nutzung | Sättigung | Unkritisch | Intensiv | Sensitiv | Ja | Eingeschränkt | Nein | Nein, dissipativ |
| 81 Power to Gas Produktion von Erdgas aus (Überschuss-)Strom | Elektrolyse: Pt (Membranelektrolyse); ZrO ₂ , Y ₂ O ₃ (Feststoff-Elektrolyse) Methanisierungs-Katalysator: Ni, Ru, Rh, Co | | X | | | | X | | X | | X | | | | |
| 82 Algen zur Energiegewinnung Biotreibstoff oder Biogas aus Algen, Mikroalgensysteme zur Wasseraufbereitung | Baumaterialien, Glas, Polymere | | X | | | X | | | X | | X | | | | |
| 83 Kompakt-Anaerobanlagen zur Energiegewinnung aus Abwasser Energieautarke Abwasserbehandlung | Baumaterialien | | X | | | X | | | X | | X | | | | |
| 84 Brennstoffzellen zur Abwasserbehandlung Strom mit Mikroorganismen als Biokatalysatoren | Baumaterialien | | X | | | X | | | X | | X | | | | |
| 85 Thermische Speicher Latentwärmespeicher mit Phasenwechselmaterialien | K, Na, Li, Ca, Si | | | | X | | | | X | | X | | | | |
| 86 Keramische Konverter Keramischer Hochtemperatur-Wärmetauscher in konventionellen Kraftwerken | unklar | | | | | X | | | X | | X | | | | X |
| 87 Micro-Energy Harvesting aus der Umgebungsenergie Autarke Sensornetzwerke | Sb, Se, Sn, Cr, Ti, Cu, Nd, Dy, Co | | | | X | | | | X | | X | | | | |
| 88 Meeresenergie Gezeiten-, Strömungs-, Wellenenergie, Meereswärme | Edelstähle | | | X | | | | | X | | X | | | | |
| 89 Makroalgenzucht mit modernen Speichern Kugelspeicher und Methanisierung | Baumaterialien, Glas, Polymere, Stahl | | X | | | X | | | X | | X | | | | |
| 90 Leistungselektronik Energietechnik Steigender Bedarf in dezentralen Wandlern | Elektronikmetalle | | | | X | | | | X | | X | | | | X |
| 91 Osmosekraftwerke Umkehrelektrodialyse oder druckreduzierte Osmose | Edelstähle | | X | | | | | | X | | X | | | | X |

| Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung | Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl) | Stand der Technik 2013 | | | | Markt 2035 | | | Rohstoffbedarf 2035 | | | Recyclingpotenzial 2035 | | |
|---|---|------------------------|-------------|----------|----------|------------|---------|-----------|---------------------|----------|----------|-------------------------|---------------|------|
| | | Forschung | Entwicklung | Prototyp | Im Markt | Einführung | Nutzung | Sättigung | Unkritisch | Intensiv | Sensitiv | Ja | Eingeschränkt | Nein |
| Offshore Speichertechnologien Tiefseepumpenbohrerwerke, chemische Langzeitspeicher, Tiefseeeumkehrosiose | Rostfreier Stahl (Fe, Cr, Ni, Co) | X | | | | X | | | X | | | X | | |
| Plasmaverfahren Ionenquelle: Erzeugung geladener Teilchen zur Erhitzung von Brennstoff, ionisiertes Gas als Brennstoff in Kraftwerk | Metalle | | X | | | X | | | X | | | | | |
| Additive Fertigung („3D-Drucker“) Auftrags-Fertigungsverfahren für kleine Bauteile aus Metall, Keramik, Kunststoff und lebenden Zellstrukturen. | Cu (Elektromotoren), Polymere | | | | X | | X | | X | | | | | |
| Adaptronik Aktive Systeme zur Schwingungs- und Lärmdämpfung in Fahrzeugen, Flugzeugen, Maschinen und Geräten. | Sensoren und Aktoren: Quarz (SiO ₂), LiNbO ₃ , GaPO ₄ , BaTiO ₃ Elektronik: Cu, Si, Sn | | X | | | X | | | X | | | X | | |
| Automatische Stofftrennverfahren Mechanisierte Vereinzelung, Erkennung und Trennung von Wert- und Schadstoffen im Hausmüll. | Stahl, Cu Magnete: Nd, Sm IR-Detektoren: LiTaO ₃ , LiNbO ₃ , Pb ₃ Ge ₃ O ₁₁ , La, Sc, Nb, Ta | | X | | | | X | | X | | | | | |
| Biokunststoffe aus verholzten Rohstoffen Herstellung von Kunststoffen aus der Lignozellulose von Biomasse. | Rostfreier Stahl (Fe, Cr, Ni, Co) | | X | | | | X | | X | | | X | | |
| Bioraffinerien Biochemische und thermochemische Konversion von nachwachsenden Rohstoffen zu Werkstoffen, Energieträgern und Chemikalien in integrierten Standorten. | Rostfreier Stahl (Fe, Cr, Ni, Co) | | X | | | | | | X | | | | | X |

| Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung | Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl) | Stand der Technik 2013 | | | | Markt 2035 | | | Rohstoffbedarf 2035 | | | Recyclingpotenzial 2035 | | | |
|--|--|------------------------|-------------|----------|----------|------------|---------|-----------|---------------------|----------|----------|-------------------------|---------------|------|------------------|
| | | Forschung | Entwicklung | Prototyp | Im Markt | Einführung | Nutzung | Sättigung | Unkritisch | Intensiv | Sensitiv | Ja | Eingeschränkt | Nein | Nein, dissipativ |
| 99 Chip Labor Mikrofluidische Systeme zur schnellen Stoffanalyse und zum Stoffscreening im Scheckkartenformat. | Glas, Kunststoff, Si, Cu, Sn | X | | | | | X | | X | | | X | | | |
| 100 Dezentrale Wasseraufbereitung Kleinräumige, siedlungsbezogene autarke Wasserver- und Abwasserentsorgung. | Stahl, Cr, Cu | | | X | | | X | | X | | X | | | | |
| 101 Feinstaubabscheider für Kleinfeuerungsanlagen Kostengünstige, nachrüstbare Naturzugfiltersysteme. | Rostfreier Stahl (Fe, Cr, Ni, Co) | X | | | | | | X | X | | X | | | | |
| 102 Fermentative industrielle Ethanolgewinnung aus verholzter Biomasse Enzymatischer Aufschluss von Lignozellulose für die Herstellung von Ethanol-Kraftstoff und Chemieprodukten. | Rostfreier Stahl (Fe, Cr, Ni, Co) | | | X | | | X | | X | | X | | | | |
| 103 Festkörper-Laser für die industrielle Fertigung Laser zum Schweißen und Trennen in der Fertigungstechnik. | Nd, Y, Er, Yb (Laser) | | | | X | | X | | X | | | X | | | |
| 104 Leistungsfähige Elektroden für harsche Einsatzbedingungen Temperatur- und korrosionsbeständige Elektroden hoher Funktionalität und Dauerhaftigkeit. | Brennstoffzellen: Pt, RuO ₂ , LaNiO ₃ PV: Ag, Au, Pt, W | | | | X | | X | | X | | | X | | | |
| 105 Nanosilber Nanopartikel setzen Silberionen mit antimikrobieller Wirkung frei (u. a. Kleidung, Kühlstrank, Waschmaschine, Wundverbände, Pflaster). | Ag | | | | X | | X | | X | | | | X | | |
| 106 Piezoelektrische Sensoren und Aktoren Leistungsfähige, robuste und vielseitige Messwertaufnehmer und Stellglieder bei Kraftfahrzeugen und Maschinen. | Piezokristalle: Quarz (SiO ₂), LiNbO ₃ , GaPO ₄ , BaTiO ₃ , Nb | | | | X | | X | | X | | | X | | | |

| Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung | Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl) | Stand der Technik 2013 | | | | Markt 2035 | | | Rohstoffbedarf 2035 | | | Recyclingpotenzial 2035 | | | |
|--|---|------------------------|-------------|----------|----------|------------|---------|-----------|---------------------|----------|----------|-------------------------|---------------|------|------------------|
| | | Forschung | Entwicklung | Prototyp | Im Markt | Einführung | Nutzung | Sättigung | Unkritisch | Intensiv | Sensitiv | Ja | Eingeschränkt | Nein | Nein, dissipativ |
| 107 Service Roboter Intelligente Maschinen für Reinigungsaufgaben, für die Unterstützung behinderter Menschen oder für gefährliche Aufgaben. | Elektronik: Cu, Si, Sn Struktur: Stahl Gehäuse: Polymere | X | | | | X | | | X | | | X | | | |
| 108 Klebertechnik Kleben von Strukturbauteilen immer wichtiger | Keramiken, Gläser, Metalle | X | | | | | X | | X | | | | X | | |
| 109 Cyberphysical Manufacturing Systems Vernetzte Fertigung, Tailor-made Produkte für Bekleidung, Schuhe u. a. | Elektronik: Cu, Sn, Si Struktur: Stahl, Alu Gehäuse: Polymere | X | | | | | X | X | X | | | | | | |
| 110 Substitution von Hochtemperaturprozessen Cellulose, Hisarna-Verfahren u. a. | Prozesse: CaO, Fe Große potentielle Einsparungen | | | X | | | X | X | X | | | X | | | |
| 111 Hochtemperatur Wärmedämmung | Keramiken, Metalle | X | | | | | | | X | | | | X | | |
| 112 Industrie 4.0 Vernetzte Produktionstechnik. | Li, La, Sc, Nb, Ta, Ge, Pb (Sensoren) | X | | | | | X | X | | X | | | | | |
| 113 Hocheffiziente Ultraschallzerkleinerungstechniken | Struktur: Stahl, Alu | X | | | | | X | | X | | | | | | |
| 114 Hocheffiziente IR/Mikrowellen-Trocknungsprozesse | Struktur: Stahl, Alu Sender: Galliumarsenid (GaAs), Galliumnitrid (GaN) oder Indiumphosphid (In) | X | | | | | X | | X | | | X | | | |
| 115 Phosphorrecycling aus dem Abwasser | Baumaterialien, Stahl | | | X | | | | X | X | | | X | | | |
| 116 Innovative Wasserversorgung | Baumaterialien, Stahl, Polymere | X | | | | | | X | X | | | X | | | |
| 117 Innovative Wasseraufbereitung | Baumaterialien, Stahl, Polymere | | | X | | | | X | X | | | X | | | |
| 118 Medizinische Mikroroboter Miniaturisierte Sonden für Diagnose und Therapie. | Elektronik: Si, Cu, Sn. Gehäuse: Ti, Ta | X | | | | | | X | X | | | | X | | |
| 119 Miniaturisierte Lebenszeit-Herzschriftmacher Lebenslange Haltbarkeit. | Pt, Os, Elektronik, Batterien (Li, Co, Halbleiter), Ti, Ta | | X | | | | | X | X | | | | | X | |

| Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung | Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl) | Stand der Technik 2013 | | | | Markt 2035 | | | Rohstoffbedarf 2035 | | | Recyclingpotenzial 2035 | | | |
|--|--|------------------------|-------------|----------|----------|------------|---------|-----------|---------------------|----------|----------|-------------------------|---------------|------|------------------|
| | | Forschung | Entwicklung | Prototyp | Im Markt | Einführung | Nutzung | Sättigung | Unkritisch | Intensiv | Sensitiv | Ja | Eingeschränkt | Nein | Nein, dissipativ |
| 120 Neuronales Interface Schnittstelle zur elektronischen Aufnahme von Nervenimpulsen für die Bewegungssteuerung mechanisierter Neuroprothesen. | Elektronik: Cu, Si, Sn Kontaktierung: Au | X | | | | X | | | X | | | X | | | |
| 121 Medizinische Implantate Ersatzgelenke mit hoher Lebensdauer. | Ti, Co, Cr | | | X | X | | X | | X | | | X | | | |
| 122 Präzisions-Laser für medizinische Anwendungen Schmerzarme Kariesbehandlung und chirurgische Eingriffe mit hochpräziser Strahlführung. | Kristall: Nd, Y, Sc, Er, Tm | | | | X | | X | | | X | | X | | | |
| 123 Radioaktive Präparate zur Tumordiagnostik Spezialitäten für die nebenwirkungsarme Hochleistungsfrühdagnostik. | Szintigrafie: ⁹⁹ Tc PET: ⁶⁸ Ga, ¹⁸ F | | | | X | | X | | | X | | X | | | |
| 124 Medizinische Tomographie Schnelle, strahlungsarme und -freie Diagnoseverfahren in der Medizin (MRT, OCT, PET, SPECT, Kombination Sonographie und Tomographie). | Struktur: Stahl Elektrik: Cu Magnet: Seltene Erden, HTS Abschirmung: Pb Sensoren, Kontrastmittel: Gd | | | | X | | X | | X | | | X | | | |
| 125 Kryonik Einfrieren von Lebewesen | Stahl, Elektronik | | | X | | X | | | X | | | X | | | |
| 126 Quantify yourself z. B. Fitnessarmbänder, Apps, smart watches etc. zur Lactat-, Blutdruck-, Allergenbestimmung | Elektronikmetalle | | | | X | | X | | X | | | X | | | |
| 127 Telemedizin u. a. für alternde Gesellschaft | Elektronikmetalle | | | X | | | X | | X | | | X | | | |
| 128 Exoskelette Hilfsmittel für schwere Arbeiten | Leichtbau: Ti Sensoren | X | | | | X | | | X | | | X | | | |

| Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung | Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl) | Stand der Technik 2013 | | | | Markt 2035 | | | Rohstoffbedarf 2035 | | | Recyclingpotenzial 2035 | | |
|--|--|------------------------|-------------|----------|----------|------------|---------|-----------|---------------------|----------|----------|-------------------------|---------------|------|
| | | Forschung | Entwicklung | Prototyp | Im Markt | Einführung | Nutzung | Sättigung | Unkritisch | Intensiv | Sensitiv | Ja | Eingeschränkt | Nein |
| 129 Intelligente Haustechnik Vernetzung, Überwachung und Fernsteuerung der Haustechnik, Informationstechnik, Kommunikationstechnik und Sicherheitstechnik. | Elektronik: Si, Cu, Sn Kabel: Cu | | X | | | | X | | X | | X | | | |
| 130 Landfills Mining Leistungsfähige, kostengünstige Bergbautechniken zur Rückgewinnung von Wertstoffen wie beispielsweise Kupfer aus Deponien. | Stahl, Cr, Ni | X | | | | | X | | X | | X | | | |
| 131 Precision Farming Hochpräzise satellitengesteuerte Bestellung landwirtschaftlicher Flächen zur bedarfsgerechten Ausbringung von Nährstoffen und Pflanzenschutzmitteln. | Elektronik: Si, Cu, Sn Fahrzeuge: Stahl, Al Sensoren und Aktoren | | | | X | | X | | X | | X | | | |
| 132 Submarine Rohstoffgewinnung Untenwasserbergbau erfordert spezielle korrosionsfeste Werkstoffe und Berücksichtigung der Druck- und Sauerstoffverhältnisse (Gashydrat, Manganknollen). | Rostfreie Stähle (Fe, Cr, Ni, Co), Ti | | X | | | X | | | X | | | X | | |
| 133 Robuste Infrastrukturen | Sensoren | | X | | | X | | | X | | X | | | |
| 134 Smart Metering für Wasser- oder Stromverbrauch | Sensoren | | | X | | | X | | X | | | X | | |
| 135 Selbstreinigende Fenster und Fassaden Im Markt, Verbesserung möglich | TiO ₂ , Glas nanobehandelt | | | | X | | | X | | | X | | | |
| 136 Selbstheilender Beton mit verlängerter Lebensdauer | Polymere, Ca-Salze | X | | | | X | | X | | | | X | | |
| 137 Textilbeton (z. B. Nanofasern) | Carbonfasern, Glasfasern | | X | | | X | | X | | | | X | | |
| 138 3D-Weben | Für CFK, GFK u. a. | | | X | | | | X | | | | | X | |
| 139 Through-the-Wall-Radar | Cu, Si, Ge, Sn | X | | | | X | | X | | | | X | | |
| 140 Nullenergiehaus | Bau-, Elektronikmaterialien | | X | | | | X | | | | X | | | |

| Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung | Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl) | Stand der Technik 2013 | | | | Markt 2035 | | | Rohstoffbedarf 2035 | | | Recyclingpotenzial 2035 | | | |
|--|---|------------------------|-------------|----------|----------|------------|---------|-----------|---------------------|----------|----------|-------------------------|---------------|------|------------------|
| | | Forschung | Entwicklung | Prototyp | Im Markt | Einführung | Nutzung | Sättigung | Unkritisch | Intensiv | Sensitiv | Ja | Eingeschränkt | Nein | Nein, dissipativ |
| 141 Lunare Bergbautechnologien | Stahl | X | | | | X | | | X | | | X | | | |
| 142 Aeroele („Gefrorener Rauch“) Hocheffektiver Wärmedämmstoff. | SiO ₂ , C, Al ₂ O ₃ , Chrom- und Zinnoxide | | X | | | | X | | X | | | | | | |
| 143 Carbon Nanotubes (CNT) für hochfeste Drähte Drähte aus Kohlenstoffnanoröhren weisen theoretisch die 20-fache Zugfestigkeit von hochfestem Stahl auf. | C | X | | | | X | | | X | | | X | | | |
| 144 Formgedächtnis-Legierungen (Smart Materials) Metalllegierungen, die bei Erwärmung ihre ursprüngliche Form wieder einnehmen. Nutzbar für Stellbewegungen und mechanische Antriebe. | Ni55Ti (Nitinol), Cu-Al-Ni, Cu-Zn-Al-Ni | | | | X | | X | | X | | | X | | | |
| 145 Meerwasserentsalzung Meerwasserentsalzung mit hoch effizienten Umkehrosmose-Membranen für den wirtschaftlichen Betrieb mit regenerativen Energiequellen (Wind, Solar). | Al, Cr, Fe, Mn, Mo, Ni, Pd, Ti, V (rostfreier Stahl) | | | | X | | X | | X | | | X | | | |
| 146 Hochtemperatursupraleiter Mit flüssigem Stickstoff kühlabare Supraleiter der zweiten Generation mit hoher Zugfestigkeit für Generatoren, Transformatoren, Elektromotoren und Stromkabel. | Y, Bi, Ti, Hg, Sr, Ba, Ca, Cu | | | X | | | X | | X | | | X | | | |
| 147 Hochkorrosionsfeste Superlegierungen Superlegierungen für den wirtschaftlichen Einsatz, bspw. in submarinen Techniken. | Cr, Ti, Ni, Mn, Pd, Zn-(o)-Phosphat | | | | X | | X | | X | | | X | | | |
| 148 Hochleistungs-Permanentmagnete Starkes Magnetmaterial für miniaturisierte IKT, Elektromotoren und andere Anwendungen. | Nd, Dy, Tb, Pr | | | | X | | X | | X | | | X | | | |
| 149 Superlegierungen Steigerung der Arbeitstemperaturen von Triebwerken, Turbinen und Motoren auf über 1500 °C. | Ni, Co, Cr, Mo, W, Re, Ta, Nb, Hf | | | | X | | X | | X | | | X | | | |

| | Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung | Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl) | Stand der Technik 2013 | | | | Markt 2035 | | | Rohstoffbedarf 2035 | | | Recyclingpotenzial 2035 | | | |
|-----|---|---------------------------------------|------------------------|-------------|----------|----------|------------|---------|-----------|---------------------|----------|----------|-------------------------|---------------|------|------------------|
| | | | Forschung | Entwicklung | Prototyp | Im Markt | Einführung | Nutzung | Sättigung | Unkritisch | Intensiv | Sensitiv | Ja | Eingeschränkt | Nein | Nein, dissipativ |
| 161 | Stähle mit reduziertem Mn-Gehalt 4–7% gegenüber TRIP oder TWIP-Stahl (Mn-Gehalt 17–25%) | Stahl, Mn | X | | | | X | | | X | | | X | | | |
| 162 | Additive Fertigung Speziallegierungen gefordert, z. Zt. diverse Ti-/Al-Legierungen | Ti, Al | X | | | | X | | | X | | | X | | | |
| 163 | Neue Entwicklungen in der marinen Aquakultur | unklar | X | | | | X | | | X | | | X | | | |
| 164 | Tiefseebergbau Abbau von Kobaltkrusten, Manganknollen, Merthanhydrat | Rostfreier Stahl (Fe, Cr, Ni, Co) | | | X | | | | | X | | | X | | | |
| 165 | Artificial Upwelling Geoengineering: nährstoffreiches Tiefenwasser wird nach oben gepumpt, das Algenwachstum und damit den CO ₂ -Verbrauch anzuregen | Rostfreier Stahl (Fe, Cr, Ni, Co) | X | | | | X | | | X | | | X | | | |
| 166 | Blue Carbon Düngung Geoengineering-Technologie | Eisensalze | X | | | | X | | | X | | | X | | | |
| 167 | Umklappbare Spiegel zur Erhöhung des Albedo Effektes Geoengineering-Technologie | Ag | X | | | | X | | | X | | | X | | | |
| 168 | Impfen von Wolken für Klimaschutz, Schönwetter und Regen | AgI | | | | X | | | | X | | | X | | | |

**Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)**

Wilhelmstraße 25–30
13593 Berlin
Tel.: +49 30 36993 226
dera@bgr.de
www.deutsche-rohstoffagentur.de

ISBN: 978-3-943566-72-7 (Druckversion)
ISBN: 978-3-943566-71-0 (PDF)
ISSN: 2193-5319