

Schlussbericht

15. Mai 2009

Rohstoffe für Zukunftstechnologien

Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage

Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie
Referat III A 5 - Mineralische Rohstoffe
I D 4 - 02 08 15 - 28/07



Bearbeitung

Fraunhofer Institut für
System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe

Institut für Zukunftsstudien
und Technologiebewertung IZT gGmbH
Schopenhauerstraße 26
14129 Berlin

Dr. Gerhard Angerer
Dr. Frank Marscheider-Weidemann
Arne Lüllmann

Lorenz Erdmann
Dr. Michael Scharp
Volker Handke
Max Marwede

Projektassistenz und Lektorat

Claudia Hertweck-Maurer, Imke Gries, Monika Silbereis, Sabine Wurst
Fraunhofer ISI

Translation

Christine Mahler-Johnstone, Gillian Bowman-Köhler
Fraunhofer ISI

Das Vorhaben wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi gefördert und vom Referat III A 5, Mineralische Rohstoffe und Geowissenschaften - geologische CO₂-Speicherung - Fachaufsicht BGR, fachlich betreut. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Der Bericht ist 2009 im © Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, als Buch erschienen.
2. Auflage ISBN 978-3-8396-0014-6.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Glossar	III
Zusammenfassung	XI
Executive Summary	XV
1 Problemstellung und Zielsetzung	1
2 Methodik und Vorgehensweise	5
3 Rohstoffabhängige Zukunftstechnologien	9
4 Technologiesynopsen	27
<i>Fahrzeugbau, Luft- und Raumfahrt, Verkehrstechnik</i>	27
4.1 Stahlleichtbau mit Tailored Blanks	27
4.2 Elektrische Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge	33
4.3 Brennstoffzellen Elektrofahrzeuge	47
4.4 Superkondensatoren für Kraftfahrzeuge	53
4.5 Scandium-Legierungen für den Airframe Leichtbau	57
<i>Informations- und Kommunikationstechnik, optische Technologien,</i>	
<i>Mikrotechniken</i>	61
4.6 Bleifreie Lote.....	61
4.7 RFID – Radio Frequency Identification	67
4.8 Indium-Zinn-Oxid (ITO) in der Displaytechnik	76
4.9 Infrarot-Detektoren in Nachtsichtgeräten	87
4.10 Weiße LED	94
4.11 Glasfaserkabel.....	98
4.12 Mikroelektronische Kondensatoren	103
4.13 Hochleistungs-Mikrochips.....	111
<i>Energie-, Elektro- und Antriebstechnik</i>	117
4.14 Ultraeffiziente industrielle Elektromotoren	117
4.15 Thermoelektrische Generatoren.....	123
4.16 Farbstoffsolarzellen	130
4.17 Dünnschicht-Photovoltaik	136
4.18 Solarthermische Kraftwerke	152
4.19 Stationäre Brennstoffzellen – SOFC	157
4.20 CCS – Carbon Capture and Storage.....	163
4.21 Lithium-Ionen-Hochleistungs-Elektrizitätsspeicher.....	168
4.22 Redox-Flow Elektrizitätsspeicher	174
4.23 Vakuumisolation	177

Chemie-, Prozess-, Fertigungs- und Umwelttechnik, Maschinenbau	185
4.24 Synthetische Kraftstoffe.....	185
4.25 Meerwasserentsalzung.....	192
4.26 Festkörper-Laser für die industrielle Fertigung.....	201
4.27 Nanosilber.....	206
Medizintechnik	210
4.28 Orthopädische Implantate.....	210
4.29 Medizinische Tomographie.....	215
Werkstofftechnik	221
4.30 Superlegierungen.....	221
4.31 Hochtemperatursupraleiter in der Elektrizitätswirtschaft.....	228
4.32 Hochleistungs-Permanentmagnete.....	237
5 Rohstoffsynopsen	243
5.1 Kupfer.....	243
5.2 Chrom.....	251
5.3 Kobalt.....	258
5.4 Titan.....	262
5.5 Zinn.....	269
5.6 Antimon.....	275
5.7 Niob.....	280
5.8 Tantal.....	284
5.9 Platinmetalle – Pt, Pd, Ru, Rh, Os, Ir.....	288
5.10 Silber.....	297
5.11 Seltene Erden – Sc, Y, Nd.....	303
5.12 Selen.....	316
5.13 Indium.....	323
5.14 Germanium.....	330
5.15 Gallium.....	341
6 Schlussfolgerungen	349
Quellen	356

Abkürzungen und Glossar

4C Geräte Sammelbegriff für Computer, Cellular Phones, CamCorder, Cordless Tools

A

Å Längeneinheit Angström ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$)
 ABS Anti-Blockiersystem für Kraftfahrzeuge
 ACP Adhesive Conductive Paste
 Ag Silber
 Ah Amperestunden
 AIM Association for Automatic Identification and Mobility
 Al Aluminium
 As Arsen
 a-Si amorphes Silizium
 ATO Antimony-Tin-Oxide
 Au Gold

B

B Bor
 Ba Barium
 Barrel Volumeneinheit (1 Barrel = 159 l)
 BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
 Bi Wismut
 BiCMOS Kombination von Feldeffekttransistoren mit Bipolartransistoren
 BIP Bruttoinlandsprodukt
 BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
 bpd barrels per day
 BSCCO Bismut-Strontium-Calcium-Kupfer-Oxide
 BST Barium Strontium Titanit
 BtL Biomass to liquid

C

C Kohlenstoff
 C₂H₅OH Ethanol
 Ca Calcium
 CA Kanada
 CCS Carbon capture and growth
 CSS Close Space Sublimation
 Cd Cadmium
 CDA Copper Development Association
 CdTe Cadmiumtellurid
 Ce Cer
 CEPI Confederation of European Paper Industries
 CIGS Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid
 CIS Kupfer-Indium-Diselenid
 Cl Chor
 CMOS Complementary Metal Oxide Semiconductor

CNT	Carbon Nano Tubes
Co	Cobalt
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	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)
DeNOx	Reduktion von Stickstoffoxiden zu Stickstoff in Abgasen ("Entstickung")
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin
DKI	Deutsches Kupferinstitut
DLR	Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DNA	Desoxyribonukleinsäure
DP	Dualphasen(Stahl)
DR Kongo	Demokratische Republik Kongo
DSK	Doppelschicht-Kondensator
Dy	Dysprosium
E	
EDLC	Electrochemical Double Layer Capacitor
EE	Elektrische und elektronische (Produkte)
EG	Electronic Grade (Silizium)
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Schweiz
EnEV	Energie Einsparverordnung
EOR	Enhanced Oil Recovery
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)
Fe	Eisen
FED	Field Emitter Display
FHG-IZM	Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration

FIR	Ferninfrarot
FLOG	Fachgebiet Logistik der Universität Dortmund
FSZ	Farbstoffsolarzelle
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
G	
g	Gramm
Ga	Gallium
GE	General Electric Company
Ge	Germanium
Gd	Gadolinium
GfK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GHz	Gighertz
GIPV	gebäudeintegrierte Photovoltaik
Gol	Germanium on Insulator
GPS	Global Positioning System
GtL	Gas to liquid
GuD	Gas- und Dampf- (Kombikraftwerk)
GUS	Gemeinschaft unabhängiger Staaten (Nachfolgestaaten der Sowjetunion)
GWp	Gigawatt peak power (Leistungsangabe bei Solarzellen)
H	
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser(dampf)
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition
Hg	Quecksilber
Ho	Holmium
HPDL	dioden-gepumpte Hochleistungs-Laser
HSS	High Speed Steel (Schnellarbeitsstahl)
HTS	Hochtemperatur-Supraleiter
Hz	Hertz
I	
IC	Integrierter Schaltkreis (Integrated Circuit)
IEA	Internationale Energieagentur (International Energy Agency)
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission
IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
In	Indium
IP	Internet Protocol
IPTV	Internet Protocol Television
IR	Infrarot
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
ITO	Indium-Zinn-Oxid (Indium Tin Oxide)
IZT	Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung

K

K	Kelvin
k. A.	keine Angaben
KfZ	Kraftfahrzeug
kt	Kilotonnen (1000 t)
ksi	kilo-pound per square inch (1000 psi)

L

La	Lanthan
LAN	Local Area Network
Laser	Light Amplification by Stimulated Emissions
lb	pound. Gewichtseinheit. 1 lb = 0,454 kg
LCD	Liquid-Crystal-Display
LED	Leuchtdiode (Light Emitting Diode)
Li	Lithium
Li-Ionen	Lithium-Ionen (wiederaufladbares Batteriesystem)
Lkw	Lastkraftwagen
LME	London Metal Exchange
LTS	Niedrigtemperatur-Supraleiter

M

MAGLEV	Magnetic levitation (Magnetschwebbahn)
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
MBCCO	Quecksilber- Barium-Calcium-Kupfer-Oxide
MED	Multi-Effekt-Destillation
Mg	Magnesium
Mio.	Millionen
MLCC	Multi Layer Ceramic Capacitor
MMIC	Monolithic Microwave Integrated Circuit
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
MOCVD	Metal Organic Chemical Vapor Deposition
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
NEM	Nichteisenmetall-Industrie (Kupfer, Aluminium, Blei, Zink etc.)
NGCC	Natural gas combined cycle
Ni	Nickel
Ni-Cd	Nickel-Kadmium (wiederaufladbares Batteriesystem)
Ni-MH	Nickel-Metallhydrid (wiederaufladbares Batteriesystem)
NIR	Nahinfrarot
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
OLED	Organic Light-Emitting Diode
Os	Osmium

P

P	Phosphor
Pb	Blei
PBB	Polybromierte Biphenyle
PBDE	Polybromierte Dyphenylether
PCB	Polychlorierte Byphenyle
Pd	Palladium
PDP	Plasma Display Panel
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
PEM	Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle
PET	Polyethylenterephthalat
PET	Positronen-Emissions-Tomographie
pin	positive intrinsic negative diode
PJ	Petajoule (10^{15} Joule)
Pkw	Personkraftwagen
plc	public limited company
Pm	Promethium (radioaktiv)
PS	Polystyrol
psi	pounds per square inch ($1 \text{ psi} = 6.894,76 \text{ N/mm}^2$)
Pt	Platin
PTFE	Polytetrafluorethylen
PV	Photovoltaik
PUR	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid

PVD	Physical Vapour Deposition (Beschichtungsverfahren)
R	
Re	Rhenium
REM	Seltene Erden Metalle
REO	Seltene Erden Oxide
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
R-Sätze	Risikosätze. Kennzeichnung der Stoffgefährlichkeit
Ru	Ruthenium
RU	Russische Föderation
RWI	Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung
S	
S	Schwefel
Sb	Antimon
Sc	Scandium
SCR	Selective Catalytic Reduction (Reduktion von Stickstoffoxiden)
ScSZ	Scandiumdotiertes Zirkoniumdioxid
Se	Selen
SED	Surface Conduction Electron Emitter Display
Si	Silizium
Sm	Samarium
SMD	Surface Mounted Device (elektronische Aufsteckbauteile)
Sn	Zinn
SOFC	Festoxidbrennstoffzelle (Solid Oxid Fuel Cell)
SPECT	Single Photon Emission Computed Tomography
Sr	Strontium
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/a	Tonnen pro Jahr
Ta	Tantal
tag	Smart Label, Smart Ticket, Smart Card (RFID Transponder)
Tb	Terbium
TBCCO	Thallium-Barium-Calzium-Kupfer-Oxide
⁹⁹ Tc	(radioaktives)Technetium der Massenzahl 99
TCO	Transparent Conducting Oxide
Te	Telur
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
UHMWPE	Ultra High Molecular Weight PolyEthylene (ultrahochmolekulares Polyethylen)
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
US	United States of America (Länderkürzel)
USGS	United States Geological Survey
UV	Ultraviolet
V	
V	Vanadium
VAE	Vereinigte Arabische Emirate
VC	Dampfkompresseion
VdA	Verband der Automobilindustrie
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
WLAN	Wireless Local Area Network
WLED	weiße Leuchtdioden (White Light Emitting Diode)
X	
XtL	Sammelbegriff für GtL, CtL, Und BtL Verfahren
Y	
Y	Yttrium
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat
Yb	Ytterbium
YBCO	Yttrium-Barium-Kupfer-Oxide
YGO	Yttrium-Gadolinium-Oxid
YSZ	Yttriumdotiertes Zirkoniumdioxid

Z

Zn

Zink

Zr

Zirkonium

ZVEI

Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V.

Zusammenfassung

Die vorliegenden Analysen von Zukunftstechnologien und Rohstoffen lassen profunde Rückschlüsse auf das Wechselspiel zwischen technischem Wandel und Rohstoffbedarf zu. Die seit Beginn dieses Jahrzehnts zu beobachtenden Turbulenzen auf den Rohstoffmärkten haben ihre Ursache nicht, wie oft irrtümlich angenommen wird, in der Erschöpfung von Rohstoffvorkommen. Die Markturbulenzen entstanden aus einem Ungleichgewicht von Angebot und Nachfrage. Neue Marktteilnehmer aus den Schwellenländern, allen voran China, haben für die Marktteilnehmer unerwartet starke Impulse auf die Rohstoffnachfrage ausgelöst. Die Nachfrageeffekte technischer Innovationen wurden nicht rechtzeitig erkannt und führten zu Fehleinschätzungen auf den Rohstoffmärkten. Dies ließ die Preise sprunghaft steigen und trifft die Industrie in der Produktion in ihrem mit Abstand größten Kostenblock, den Materialkosten. Aber es sind nicht nur die Kosten, welche durch die Rohstoffe getrieben werden, der Rohstoffabbau, ihre Verhüttung und Weiterverarbeitung zu Werkstoffen und Vorprodukten ist auch mit erheblichen Umweltlasten verbunden.

Vor diesem Hintergrund ist die effiziente Nutzung von Rohstoffen und Werkstoffen und die Schließung von Stoffkreisläufen durch das Recycling eine Herausforderung der Zukunft, deren Bedeutung dem Klimaschutz entspricht. Materialeffizientes Wirtschaften ist auf Informationen über die Verwendungen der Rohstoffe und Werkstoffe in den Wirtschaftssektoren, den dort eingesetzten Technologien und ihren hervorgebrachten Produkten angewiesen. Das vorliegende Projekt will zum Aufbau dieses Informationspools beitragen. Seine Fragestellung ist, welche Impulse von der späteren Nutzung der heute oft noch im Entwicklungsstadium befindlichen Zukunftstechnologien auf die Rohstoffnachfrage ausgehen und auf welche Rohstoffe diese Innovationen besonders angewiesen sind. Zukunftstechnologien sind industriell verwertbare technische Fähigkeiten, die revolutionäre Innovationsschübe weit über die Grenzen einzelner Wirtschaftssektoren auslösen. Zukunftstechnologien lassen sich nicht auf 5, 10 oder 20 Innovationen eingrenzen. Vielmehr ist in allen Sektoren eine grundlegende Erneuerung der Volkswirtschaft im Gange, die von dem Ziel der industrialisierten Hochlohnländer getrieben wird, im globalen Wettbewerb durch technologische Exzellenz zu bestehen.

Eine Recherche nach Zukunftstechnologien hat knapp einhundert Innovationen erbracht, bei denen Hinweise vorliegen, dass sie Impulse auf die Rohstoffnachfrage entfalten. Davon wurden für 32 Technologien Vorausschauen ihrer industriellen Nutzung bis zum Jahr 2030 und dem davon ausgehenden Rohstoffbedarf erarbeitet. Als Foresightmethode wurde ein Bottom-up Ansatz gewählt. Das heißt, aus einer technisch-wirtschaftlichen Innovationsanalyse sind die spezifischen Eigenschaften der Technologie und ihr Nutzungs- und Marktpotenzial erschlossen worden.

Die Analyse der von der Nutzung neuer Technologien ausgehenden Impulse auf die Rohstoffnachfrage lässt deutlich die gestaltende Kraft des technischen Wandels erkennen. Als Indikator für die Intensität der Nachfrageimpulse des technischen Wandels wird rohstoffspezifisch das Verhältnis des Rohstoffbedarfs für die analysierten Zukunftstechnologien zur heutigen gesamten Weltproduktion des jeweiligen Rohstoffs verwendet. Der Indikator gibt an, welcher Anteil der heutigen Weltproduktion des jeweiligen Rohstoffs für diese Technologien 2030 benötigt wird. Er ist ein Maß für den Ausbaubedarf der Minenproduktion. Der Indikator erreicht bei Gallium den Wert 6 und bei Neodym 3,8. Das heißt, der von absehbaren technischen Innovationen ausgehende Bedarf an diesen beiden Rohstoffen wird 2030 6- bzw. 3,8-mal so hoch sein, wie deren gesamte heutige Weltproduktionsmenge. Für Indium beträgt der Wert 3,3, für Germanium 2,4, für Scandium 2,3, für Platin 1,6 und für Tantal 1. Für Silber und Zinn erreicht der Indikator immerhin noch jeweils 0,8, für Kobalt 0,4, für Palladium und Titan jeweils 0,3 und für Kupfer gut 0,2 (siehe Tabelle auf Seite XIII). Aufgrund der hier erkennbaren Dominanz des technischen Wandels auf die Rohstoffnachfrage sind dies zugleich Rohstoffe, die für die künftige Technologieentwicklung und ihre Nutzung besonders wichtig sind.

Der zweite Treiber des Rohstoffbedarfs ist die Weltwirtschaft. Sie ist in den zurückliegenden 20 Jahren im Mittel um jährlich 3,8 % gewachsen. Wenn dieses Wachstum anhält, das angesichts des Nachholbedarfs der unterentwickelten Regionen der Welt auch dringend nötig ist, erreicht die Weltwirtschaftsleistung im Jahre 2030 das 2,4-fache von 2006. Von diesem Wachstum werden starke Impulse auf den zukünftigen Rohstoffbedarf ausgehen. Welches der dominierende Treiber der Nachfrage ist, lässt sich nicht generell beantworten. Massenrohstoffe mit breitem Verwendungsspektrum wie Eisen, Stahl, Kupfer und Chrom, werden eher vom Weltwirtschaftswachstum getrieben. Bei Spezialitäten, wie Gallium, Neodym, Indium, Germanium und Scandium ist eher die technologische Entwicklung bedarfsbestimmend. Auf Platinmetalle, Tantal, Silber, Titan und Kobalt wirken beide Treiber dominant.

Die Rohstoffversorgung muss als vulnerables System verstanden werden. Sie ist global hoch vernetzt und dadurch vielfältigen Einflüssen ausgesetzt. Die Empfindlichkeit der Rohstoffe verbrauchenden Wirtschaftssektoren ist dort besonderes groß, wo die Möglichkeit fehlt, knappe und teure Rohstoffe zu substituieren. Nicht substituierbar ist beispielsweise Chrom in rostfreien Stählen, Kobalt in verschleißfesten Legierungen, Scandium in schlagfesten Aluminium-Scandium Legierungen, Silber in gedruckten RFID Labels, Indium in transparenten Indium-Zinn-Oxid Elektroden für Displays, Neodym in starken Permanentmagneten und Germanium in Linsen der Infraroptik.

Niemand kann die künftige Entwicklung der Rohstoffmärkte prognostizieren. Die Analyse ihrer Treiber und die Herausarbeitung der fundamentalen Marktdaten erlauben es jedoch, mögliche Zukünfte einzugrenzen und sich vorsorglich auf sie einzustellen. Die in der vorliegenden Untersuchung erarbeiteten fundamentalen Marktdaten zeigen deutlich in die Richtung einer insgesamt steigenden Rohstoffnachfrage. Der im Zuge der globalen Finanzkrise eingetretene Preisrückgang bei den Rohstoffen sollte die Anstrengungen, die Rohstoffabhängigkeit zu reduzieren, nicht in Frage stellen.

Globaler Rohstoffbedarf für die analysierten Zukunftstechnologien im Jahr 2006 und 2030 im Verhältnis zur gesamten heutigen Weltproduktionsmenge des jeweiligen Rohstoffs

Rohstoff	2006	2030	Zukunftstechnologien (Auswahl)
Gallium	0,28	6,09	Dünnschicht-Photovoltaik, IC, WLED
Neodym	0,55	3,82	Permanentmagnete, Lasertechnik
Indium	0,40	3,29	Displays, Dünnschicht-Photovoltaik
Germanium	0,31	2,44	Glasfaserkabel, IR optische Technologien
Scandium	gering	2,28	SOFC Brennstoffzellen, Al-Legierungselement
Platin	gering	1,56	Brennstoffzellen, Katalyse
Tantal	0,39	1,01	Mikrokondensatoren, Medizintechnik
Silber	0,26	0,78	RFID, Bleifreie Weichlote
Zinn	0,62	0,77	Bleifreie Weichlote, transparente Elektroden
Kobalt	0,19	0,40	Lithium-Ionen-Akku, Xtl
Palladium	0,10	0,34	Katalyse, Meerwasserentsalzung
Titan	0,08	0,29	Meerwasserentsalzung, Implantate
Kupfer	0,09	0,24	Effiziente Elektromotoren, RFID
Selen	gering	0,11	Dünnschicht-Photovoltaik, Legierungselement
Niob	0,01	0,03	Mikrokondensatoren, Ferrolegierung
Ruthenium	0	0,03	Farbstoffsolarzellen, Ti-Legierungselement
Yttrium	gering	0,01	Hochtemperatursupraleitung, Lasertechnik
Antimon	gering	gering	ATO, Mikrokondensatoren
Chrom	gering	gering	Meerwasserentsalzung, marine Techniken

Executive Summary

The analyses of emerging technologies and raw materials allow profound insights into the interdependence between the technological change and the need for raw materials. The turbulences in the raw material markets since the beginning of this decade are not at all caused by the exhaustion of natural resources, as is often erroneously assumed. The market turbulences arose from an imbalance between supply and demand. New actors from the emerging countries, above all China, have imposed strong impulses on the raw materials demand, unexpected by many market players. In addition, demand effects of technical innovations were not recognized in time and led to false market assessments. The consequences, sharp price increases, hit manufacturing industries in their dominant cost factor, the cost of materials. But it is not only the costs which have to be considered, the extraction of raw materials, their smelting, processing and refinement are also accompanied by environmental burdens.

Against this background, the efficient use of materials and the closing of material cycles by recycling is a challenge for the future, which complies with climate protection. The management of material efficiency relies on information about the applications of materials in the industrial sectors, the technologies utilized there and the products produced. This project will contribute to the assembling of this information pool. The question here is which impulses for the raw materials demand will originate from the future utilization of emerging technologies, and on which raw materials these innovations will depend in particular. Emerging technologies are industrially exploitable technical capabilities which cause revolutionary pushes of innovation far beyond the borders of individual industrial sectors. Emerging technologies cannot be restricted to 5, 10 or 20 innovations. Rather, a fundamental renewal of the economy is under way in all sectors, which is driven by the goal of the industrialized high-wage countries to improve their position in the global competition due to technological excellence.

A search for emerging technologies resulted in almost one hundred innovations which may have impacts on the future raw materials demand. Of these, 32 technologies were selected to anticipate their industrial utilization until the year 2030 and to assess the resulting demand for raw materials in detail. A bottom-up approach was applied as foresight method. This means the specific characteristics of the technology and its utilization and market potential were deduced from a technical and economic innovation analysis.

This analysis clearly displays the shaping power of the on-going technological change. An indicator was introduced by dividing the raw material demand of emerging technologies by today's total world production of the specific raw material. This indicator

states which share of today's world production of the raw material in question will be required for emerging technologies in 2030. It is at the same time an indicator for the expansion needs of the mining capacity. For gallium the indicator reaches the value 6 and for neodymium 3.8. This means that in 2030 the technology-induced demand for these two raw materials will be 6 respectively 3.8 times higher than their total present worldwide production. For indium the indicator amounts to 3.3, for germanium 2.4, for scandium 2.3, for platinum 1.6 and for tantalum 1. For silver and tin it still gives values of 0.8 each, for cobalt 0.4, for palladium and titanium 0.3 each and for copper more than 0.2 (see table on page XVII). Due to the dominance of the technical drivers on the demand, these are at the same time raw materials which are of paramount importance for future technology development and its utilization.

The second driver of demand is the world economy. In the past 20 years, it has grown on average by 3.8 % annually. If this growth rate continues, which is urgently necessary in view of the need of the developing countries to catch up, then in the year 2030 the world's economic output will reach almost two and a half times that of 2006. Strong impulses will emanate from this growth for the future raw materials demand. Which will be the dominating driver of demand cannot be answered generally. Commodities with a broad spectrum of uses such as iron, steel, copper and chrome are rather driven by world economic growth. In the case of specialities, like gallium, neodymium, indium, germanium and scandium the technological development will primarily determine the demand. Both drivers are dominant for platinum metals, tantalum, silver, titanium and cobalt.

The supply of raw materials must be understood as a vulnerable system. It is globally interconnected to a high degree and therefore exposed to many influences. The vulnerability of the industrial manufacturing sectors is particularly high where there is no possibility to substitute scarce and expensive raw materials. For instance, there is no substitute for chrome in stainless steel, cobalt in wear-resistant alloys, scandium in shock-resistant aluminium-scandium alloys, silver in printed RFID tags, indium in transparent indium-tin-oxide electrodes for displays, neodymium in strong permanent magnets and germanium in lenses in infrared optics.

Nobody is able to forecast the future developments in the raw materials markets. The analysis of the drivers therein and the elaboration of the fundamental market data, however, permit us to draw possible images of the future and to prepare for them. The basic market data compiled in the study in hand clearly point in the direction of a rising overall demand for raw materials. The drop of raw material prices as a result of the global finance system crisis should not weaken the efforts to reduce the raw materials dependence.

Global demand of raw materials for the analysed emerging technologies in 2006 and 2030 in relation to today's world production of each individual raw material

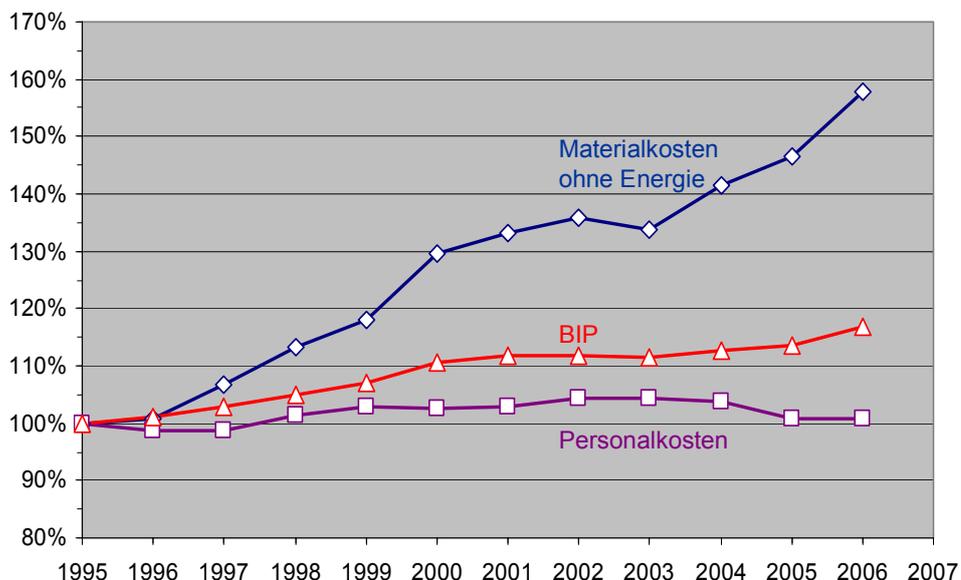
Raw material	2006	2030	Emerging technologies (selected)
Gallium	0.28	6.09	Thin layer photovoltaics, IC, WLED
Neodymium	0.55	3.82	Permanent magnets, laser technology
Indium	0.40	3.29	Displays, thin layer photovoltaics
Germanium	0.31	2.44	Fibre optic cable, IR optical technologies
Scandium	low	2.28	SOFC, aluminium alloying element
Platinum	low	1.56	Fuel cells, catalysts
Tantalum	0.39	1.01	Micro capacitors, medical technology
Silver	0.26	0.78	RFID, lead-free soft solder
Tin	0.62	0.77	Lead-free soft solder, transparent electrodes
Cobalt	0.19	0.40	Lithium-ion batteries, synthetic fuels
Palladium	0.10	0.34	Catalysts, seawater desalination
Titanium	0.08	0.29	Seawater desalination, implants
Copper	0.09	0.24	Efficient electric motors, RFID
Selenium	low	0.11	Thin layer photovoltaics, alloying element
Niobium	0.01	0.03	Micro capacitors, ferroalloys
Ruthenium	0	0.03	Dye-sensitized solar cells, Ti-alloying element
Yttrium	low	0.01	Super conduction, laser technology
Antimony	low	low	ATO, micro capacitors
Chromium	low	low	Seawater desalination, marine technologies

1 Problemstellung und Zielsetzung

Die Industriestaaten gewinnen als Hochlohnländer im globalen Markt durch technische Innovationen Wettbewerbsvorteile. Der durch diese Tatsache ausgelöste Forschungs- und Entwicklungswettlauf erhöht die Innovationsgeschwindigkeit laufend und nachhaltig. Zugleich ist die deutsche Wirtschaft nicht nur bei Energierohstoffen sondern auch bei Metallen beinahe vollkommen von Importen abhängig. Der Erfolg Deutschlands im Export seiner Produkte der Hoch- und Spitzentechnologie, und damit der Wohlstand der Gesellschaft, sind deshalb auf eine störungsfreie Versorgung mit Rohstoffen zu angemessenen Preisen angewiesen.

Die Lage auf den Rohstoffmärkten war in den zurückliegenden Jahren hoch turbulent. Neue Marktteilnehmer aus den Schwellenländern, allen voran China, haben für die Marktteilnehmer unerwartet starke Impulse auf die Rohstoffnachfrage ausgelöst. Die Nachfrageeffekte technischer Innovationen wurden nicht rechtzeitig erkannt und führten zu Fehleinschätzungen auf den Rohstoffmärkten. Dies ließ die Preise sprunghaft steigen. Als Folge sind die Materialkosten im deutschen Verarbeitenden Gewerbe stark gestiegen, wie Abbildung 1-1 zeigt. Ein Ende der Turbulenzen scheint nicht in Sicht. Mit der globalen Krise des Bankensystems sind die Rohstoffpreise stark gefallen und haben kurzfristig zu einer Entspannung auf der Preisfront geführt.

Abbildung 1-1: Preisbereinigte Kostenentwicklung im Verarbeitenden Gewerbe Deutschlands



Veränderungen der Rohstoffpreise treffen mit den Materialkosten den mit Abstand größten Kostenblock in der Produktion. Tabelle 1-1 gibt die vom Statistischen Bundes-

amt ermittelten Anteile am Bruttoproduktionswert des Verarbeitenden Gewerbes für das Jahr 2006 wieder.

Tabelle 1-1: Kostenstruktur im Verarbeitenden Gewerbe Deutschlands 2006

Kostenart	Anteil in %
Materialkosten	43,0
Energiekosten	1,8
Personalkosten, Lohnarbeiten und handwerkliche Dienstleistungen	22,7
Übrige Kosten (Einsatz von Handelsware, Steuern, Abschreibungen etc.)	32,5
Bruttoproduktionswert ohne Umsatzsteuer	100,0

Aber es sind nicht nur die Produktionskosten und Produktpreise, welche durch die Rohstoffe getrieben werden, der Rohstoffabbau, ihre Verhüttung und Weiterverarbeitung zu Werkstoffen und Vorprodukten ist auch mit Umweltlasten verbunden. Der Abbau seltener Rohstoffe, wie beispielsweise Indium, lässt ihre Ressourcen merklich schwinden und konfliktiert mit dem Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung.

Vor diesem Hintergrund ist der sparsame Umgang mit Ressourcen sowohl unter Nachhaltigkeits- als auch unter Kosten- und Wettbewerbsgesichtspunkten eine Zukunftsaufgabe, deren Bedeutung dem Klimaschutz entspricht. Dieser Einsicht ist es zu verdanken, dass seit einigen Jahren ressourcen- und materialeffizientes Wirtschaften mehr und mehr Aufmerksamkeit in Politik, Wirtschaft und Wissenschaft gewinnen. Angespornt durch die Energieforschung und -entwicklung, die sich seit der ersten Ölkrise 1973 ohne Unterbrechung um die Verbesserung der Energieeffizienz bemüht, und dabei nicht für möglich gehaltene Erfolge erzielt haben, werden auch bei der Materialeffizienz epochale Fortschritte erwartet.

Materialeffizientes Wirtschaften ist auf Informationen über die außerordentlich vielfältigen Verwendungen der Rohstoffe und Werkstoffe in den Wirtschaftssektoren, den dort eingesetzten Technologien und ihren hervorgebrachten Produkten angewiesen. Das vorliegende Projekt will zum Aufbau dieses Informationspools beitragen. Seine Fragestellung ist, welche Impulse von der späteren Nutzung der heute oft noch im Entwicklungs- oder Pilotstadium befindlichen Zukunftstechnologien auf die Rohstoffnachfrage ausgehen und auf welche Rohstoffe diese Innovationen möglicherweise besonderes angewiesen sind.

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. Innovationsschübe können Einzeltechniken betreffen, wie bei-

spielsweise Brennstoffzellen, organische Leuchtdioden oder RFID-Labels. Es können aber auch systemische Innovationsschübe sein, die bekannte Einzeltechniken zu neuen Anwendungen verbinden. Beispiele sind das Hybridauto oder die thermochemische Produktion von synthetischen Kraftstoffen aus Biomasse. Es ist unschwer erkennbar und wurde schon eingangs erwähnt, dass der Beherrschung und Vermarktung von Zukunftstechnologien für die Wirtschaft und deren Wettbewerbsstellung in der Welt besondere Bedeutung zukommt.

Zukunftstechnologien lassen sich nicht auf 5, 10 oder 20 Innovationen eingrenzen. Vielmehr ist in allen Sektoren eine grundlegende Erneuerung der Volkswirtschaft im Gange, die von dem Ziel der industrialisierten Hochlohnländer getrieben wird, im globalen Wettbewerb durch technologische Exzellenz zu bestehen. Es war deshalb nötig, die Zahl der analysierten Technologien und der einbezogenen Rohstoffe auf ein bearbeitbares Maß zu beschränken. Die Auswahl der Rohstoffe orientiert sich an der Einschätzung ihrer Bedeutung für die Technologieentwicklung. Weil Energierohstoffe seit der ersten Ölkrise 1973 Gegenstand von Analysen sind, beschränkt sich das vorliegende Projekt auf nicht energetisch genutzte mineralische Rohstoffe. Weil Deutschland bei den Metallen fast vollständig von Importen abhängig ist, wurden ausschließlich metallische und halbmimetallische Rohstoffe einbezogen.

Die Technologieauswahl bevorzugt Innovationen, von denen merkliche Impulse auf die Rohstoffnachfrage vermutet wurden. Durch die Begrenzung des Rohstoff und Technologieportfolios im Projekt liefern die Ergebnisse ein exemplarisches Bild der Gesamtsituation. Insofern versteht sich das Projekt als Einstieg in die spannende und relevante Fragestellung nach der Entwicklung des zukünftigen Rohstoffbedarfs.

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. Die Projektergebnisse stellen solche Informationen zur Verfügung.

2 Methodik und Vorgehensweise

Potenzielle Versorgungsrisiken gehen von *vulnerablen* Rohstoffen aus. Vulnerabel sind Rohstoffe, wenn sie hohe Bedeutung für die Volkswirtschaft haben, ihre Vorkommen auf wenige Länder konzentriert sind und diese in einer politisch instabilen Region liegen (RWI/ISI/BGR 2007). 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. Es wurde im vorhergehenden Kapitel schon erläutert, dass sich die Rohstoffauswahl auf anorganische, also nicht energetisch nutzbare, mineralische Rohstoffe beschränkt.

Das Rohstoffportfolio des Projekts umfasst die Rohstoffe Kupfer, Chrom, Kobalt, Titanmetall, Zinn, Antimon, Niob, Tantal, die Platinmetalle Platin, Palladium, Ruthenium, Rhodium, Osmium und Iridium, ferner Silber, die industriell genutzten Seltenen Erdmetalle Neodym, Scandium und Yttrium sowie Selen, Indium, Germanium und Gallium.

Aus einem Portfolio von knapp hundert als rohstoffrelevant eingeschätzten Zukunftstechnologien wurden 32 für eine vertiefende Analyse ausgewählt. Bei der Auswahl wurde auf eine ausreichende Berücksichtigung aller Hoch- und Spitzentechnologiesektoren der Wirtschaft geachtet. Auch die Verfügbarkeit von Informationen über die Technologien und ihr benötigtes Rohstoffinventar hat die Auswahl beeinflusst.

Als Foresightmethode wurde ein Bottom-up Ansatz gewählt. Das heißt, aus einer technisch-wirtschaftlichen Innovationsanalyse wurden die spezifischen Eigenschaften der Technologie, ihr Fortschritt gegenüber dem Stand der Technik, die spezifischen Funktionen, welche die verwendeten Roh- und Werkstoffe zur Verfügung stellen, das mögliche Anwendungsspektrum und die potenziellen Märkte erschlossen. Aus dem gewonnenen Verständnis von Technologie und Markt wurden unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen, darunter die Weltwirtschaftsentwicklung, Projektionen der künftigen Technologienutzung und des daraus resultierenden Rohstoffbedarfs hergeleitet. Zeithorizont des Foresights ist das Jahr 2030, Basisjahr ist 2006.

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 (bspw. Selen aus der Analyse von Dünnschicht-Photovoltaik).

Nicht alle so identifizierten Rohstoffe konnten aus Kapazitätsgründen in das Rohstoffportfolio aufgenommen werden, darunter Tellur aus der Analyse von Dünnschicht-Photovoltaik, Thallium aus der Analyse von Hochtemperatursupraleitern und Rhenium als Legierungselement von Stahl und Promotor in Katalysatoren. Das iterative Vorgehen mit wechselseitiger Befruchtung von Rohstoff- und Technologieanalyse hat sich als zweckmäßig erwiesen.

Die Bearbeiter sind der Ansicht, dass mit der gewählten Bottom-up Methode valide Ergebnisse erzielt werden. Das Konkurrenzverfahren, das sich nicht um ein technisch-wirtschaftliches Verständnis bemüht, sondern Zukunftsbilder ökonometrisch mit statistischen Methoden herleitet, deren Daten beispielsweise aus schriftlichen Expertenbefragungen stammen, ist für die vorliegende Fragestellung weniger geeignet. Dies hat mehrere Gründe. Zum einen ist es kaum machbar, hoch komplexe technische Zusammenhänge in überschaubare Fragen zu gießen. Zum anderen stehen für die hoch spezialisierten Technologien oft zu wenig Expertenantworten zur Verfügung, um daraus statistisch zuverlässige Einschätzungen herzuleiten.

Die Bearbeiter stießen insbesondere bei der Gewinnung technologiespezifischer Rohstoffinformationen auf erhebliche Schwierigkeiten. Dies deshalb, weil die Fragestellung des Rohstoffbedarfs von technischen Innovationen als Analysegegenstand bisher keine Beachtung gefunden hat. Auch hat die Vernetzung des Know-hows der Bergbau-sektoren mit dem des Verarbeitenden Gewerbes keine Tradition. So sind die benötigten Informationen auf die Angebots- und Nachfrageseite breit gestreut. Trotz dieser Schwierigkeiten ist es gelungen, für die meisten analysierten Technologien quantitative Aussagen über ihren künftigen Rohstoffbedarf zu erarbeiten.

Die Schätzmethode für den künftigen Rohstoffbedarf wurde in (RWI/ISI/BGR 2007:63 – 65) beschrieben. Es handelt sich um einen Faktoransatz, der die Einflüsse des technischen Wandels und der Wirtschaftsentwicklung separiert und es dadurch ermöglicht, die Wirkungen der beiden Treiber analytisch getrennt zu schätzen.

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

B Rohstoffbedarf einer bestimmten Anwendung in t/a

b spezifischer Rohstoffbedarf der Anwendung (t/Einheit)

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

Mit der Einführung des spezifischen Rohstoffbedarfs wird der Rohstoffbedarf in eine dem Produktionsniveau der Anwendung proportionale Bedarfskomponente und einen zweiten Faktor zerlegt, der vom technologischen und strukturellen Wandel bestimmt wird. Letzterer bildet also alle Veränderungen des Bedarfs ab, die sich bei gleich bleibendem Produktionsniveau einstellen würden.

Die Veränderung der Aktivitätsrate (Produktion) wird durch die mittlere jährliche Wachstumsrate beschrieben:

$$(2) \quad A_{2030} = (1 + r)^{24} \cdot A_{2006}$$

r mittlere jährliche Wachstumsrate der Aktivität (Produktion) zwischen dem Basisjahr 2006 und dem Zeithorizont 2030 in 0,01·%/a

Daraus ergibt sich die relative Veränderung des Rohstoffbedarfs in den 24 Jahren zwischen 2006 und 2030 zu

$$(3) \quad \frac{B_{2030}}{B_{2006}} = \frac{b_{2030}}{b_{2006}} \cdot (1 + r)^{24},$$

wobei der Faktor $\frac{b_{2030}}{b_{2006}}$ die ermittelte relative Rohstoffbedarfsänderung durch den technischen Wandel und der Faktor $(1 + r)^{24}$ den Einfluss der veränderten Wirtschaftsleistung zwischen dem Basisjahr 2006 und dem Zieljahr der Projektion 2030 beschreibt.

Zukunftsprojektionen zeigen *mögliche* Entwicklungen in die Zukunft auf. Sie stützen sich auf bestimmte und explizit zu nennende Annahmen und treten ein, wenn die tatsächliche Entwicklung diesen Annahmen folgt. Die Szenariotechnik gestattet es, von unterschiedlichen Annahmen der Zukunftsentwicklung auszugehen, um so die tatsächlich eintretende Entwicklung in einen Fächer von Projektionen einzufangen. Zukunftsprojektionen dürfen nicht als Vorhersagen der tatsächlichen künftigen Entwicklung verstanden werden. Niemand kann die Zukunft im Jahr 2030 prognostizieren. Soweit die Szenariotechnik bei der Abschätzung des künftigen Rohstoffbedarfs eine Wertespanne liefert, wurde bei der Aggregation für die schlussfolgernden Aussagen mit dem aus heutiger Sicht wahrscheinlichsten Wert gerechnet.

Worin liegt der Wert von Projektionen? Sie lassen erkennen welche Einflüsse die künftige Entwicklung treiben und zeigen den Marktteilnehmern, welche Treiber sie beobachten müssen. Marktteilnehmer sind zum einen die Rohstoffkonzerne, welche Informationen über die Nachfragemärkte für ihre strategische Kapazitätsplanung benötigen. Zum anderen die Rohstoffe verarbeitenden Industrien, die frühzeitig auf Nachfragekonkurrenzen zu anderen Sektoren, potenzielle Rohstoffknappheiten und sich abzeichnende Substitutionserfordernisse hingewiesen werden.

Für die Beschaffung von Informationen wurde die gesamte Palette von Möglichkeiten genutzt. Dies schließt ein, Recherchen in Fachdatenbanken und die Auswertung von Fachliteratur, Internetrecherchen, die aufgrund ihrer hohen Aktualität und schnellen Zugänglichkeit zunehmend an Bedeutung gewinnen, Auswertung von Zukunftsmagazi-

nen, wie Technology Review, Pictures of the Future und Fraunhofer-Magazin, die Auswertung von Marktstudien renommierter Analysten wie Frost & Sullivan und Roskill, die Auswertung von Zukunftsstudien sowie Interviews und Anfragen, mit dem spezifischen Know-how von Fachleuten in Industrie und Wissenschaft eingebunden wurde.

3 Rohstoffabhängige Zukunftstechnologien

In Tabelle 3-1 ist das Ergebnis der Recherche nach Zukunftstechnologien zusammengestellt, für die Hinweise vorliegen, dass sie Impulse auf die Rohstoffnachfrage entfalten. Nicht rohstoffrelevante Innovationen, beispielsweise Tissue Engineering zur Züchtung von Hautlappen, Herzklappen, Nieren und anderen Organersatzteilen, sind Mangels Bedarf an mineralischen Rohstoffen nicht enthalten, obwohl es sich dabei ohne Zweifel um eine Zukunftstechnologie handelt. Das gleiche gilt für innovative Browser-technologien des Wissensmanagements.

Von den enthaltenen rund hundert Technologien wurden 32 für die vertiefende Analyse ausgewählt. Die Ergebnisse dieser Analysen sind im Kapitel 4 enthalten. Die Charakterisierung des Rohstoffbedarfs der nicht vertieft analysierten Technologien in Tabelle 3-1 ist intuitiv und mit Unsicherheiten behaftet. Es wurde schon darauf hingewiesen, dass Informationen über den Rohstoffbedarf von Technologien nicht verfügbar sind, sondern aus breit gestreuten Quellen recherchiert werden müssen.

Für die Charakterisierung des Rohstoffbedarfs wurden drei Ausprägungen gewählt: Unkritisch, intensiv und sensibel. Als rohstoffintensiv werden Technologien charakterisiert, von denen vermutet wird, dass sie bei mindestens einem Massenrohstoff 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, Selen, Gallium, Germanium, Yttrium, Scandium, Neodym, Tantal und die Platinmetalle. Massenrohstoffe dagegen, im Englischen auch als Commodities bezeichnet, werden in größeren und größten Mengen hergestellt. Dazu zählen Eisen und Stahl, Kupfer, Chrom, Kobalt, Zinn, Antimon, Titan, Niob, Silber und andere. Technologien können nach dieser Definition zugleich rohstoffintensiv und rohstoffsensibel sein.

Bei der Einschätzung der Technologienutzung im Merkmal "Markt 2030" ist bei einem erwarteten Marktvolumen von bis zu 25 % des Marktpotenzials die Ausprägung "Einführung", bei einem Marktvolumen von 25 bis 75 % "Nutzung" und bei über 75 % "Sättigung" eingetragen.

Im Merkmal "Recyclingpotenzial 2030" wird unterschieden zwischen nicht recycelt und nicht recycelbar. Die Einschätzung, dass die eingesetzten Rohstoffe auch bis 2030 aus technischen Gründen nicht zu konkurrenzfähigen Kosten recycelt werden können, führt zu einem Eintrag in der Spalte "Nein". Für enthaltene Stoffe, die grundsätzlich nicht recycelbar sind, weil sie bei der Nutzung der Technologie verbraucht werden, wie etwa der

Kupferabrieb von Fahrleitungsdrähten für Schienenfahrzeuge, wird "Nein, dissipativ" eingetragen. "Eingeschränkt" heißt, nur ein Teil der Rohstoffe ist rückgewinnbar oder einzelne Rohstoffe lassen sich nicht vollständig zurückgewinnen.

Die Technologien wurden nach Technikfeldern und innerhalb der Technikfelder alphabetisch geordnet.

Tabelle 3-1: Rohstoffabhängige Zukunftstechnologien

Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)										Recycling- potenzial 2030			Hinweise		
	Stand der Technik 2006		Markt 2030		Rohstoff- bedarf 2030		Eingeschränkt Ja		Eingeschränkt Nein		Recycling- potenzial 2030		Hinweise			
	Forschung	Entwicklung	Prototyp	Im Markt	Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Ja	Nein	Nein, dissipativ			
Fahrzeugbau, Luft- und Raumfahrt, Verkehrstechnik																
1 Assistenzsysteme für Kraftfahrzeuge Elektronische Notbrems-, Konvoi- und Spurführungshilfen für Pkw und Lkw.	X					X			X			X				(Pictures of the Future 2005:46)
2 Elektrische Traktionsmotoren für Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge Innovative Elektromotoren für Kraftfahrzeuge.			X			X			X			X				Synopse Elektrische Traktionsmotoren
3 Energiequelle für Satelliten Radionuklidbatterie bspw. für die Galileo-Satelliten.			X				X		X				X			
4 HCCI Verbrennungsmotoren Effiziente, emissionsarme Verbrennungsmotoren für Kraftfahrzeuge.		X				X		X		X						(UBA 2007a)
5 Hocheffiziente Abgasreinigungssysteme für Dieselfahrzeuge Oxidations-, Speicher- und SCR-Katalysator, Partikelfilter zur Abreinigung auf Ottomotorenstandard.			X				X		X			X				
6 Hocheffiziente Flugzeugtriebwerke Hochwarmfeste Werkstoffe für künftige Generationen von energieeffizienten und superleisen Strahltriebwerken.		X				X		X						X		Synopse Superlegierungen

Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Stand der Technik 2006			Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030			Recyclingpotenzial 2030			Hinweise	
		Forschung	Entwicklung	Prototyp	Im Markt	Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Ja	Eingeschränkt		Nein
7 Hybridelektrische Kraftfahrzeuge Autarke Vollhybrid- und Plug-in-Hybridfahrzeuge mit Netzzurückspeisung.	Verbrennungsmotor: Stahl, Alu Elektromotor: Cu, Nd, Sm Elektronik: Cu, Si, Sn	X				X	X		X	X		X			Synopse Elektrische Traktormotoren
8 Intelligente Lenkung des Straßenverkehrs Satellitengestützter (GPS, Galileo) bidirektionaler Informationsaustausch zwischen Fahrzeugen sowie Leitzentrale und Fahrzeugen.	Elektronik: Cu, Si, Sn	X				X	X		X			X			(Pictures of the Future 2005:56)
9 Katalytischer Kraftstoffzusatz Kraftstoffadditiv zur integrierten katalytischen NOx-Reduktion.	Ce	X				X			X					X	
10 Leichtbau im Kraftfahrzeugbau Gewichtsreduktion zur Kraftstoffeinsparung durch leichte und lokal hochfeste Materialien.	Stahlleichtbau (Tailored Blanks), Stahl-Alu-Hybridleichtbau, Mg-Druckgussteile, Ti, Kunststoffe		X				X				X				Synopse Stahlleichtbau mit Tailored Blanks
11 Magnetschwebebahn Schnelles bodengebundenes Langstreckenverkehrsmittel mit Spitzengeschwindigkeiten von bis zu 500 km/h (Transrapid, MAGLEV).	Stahl, Cu, Co. Magnete: Nd, Sm Supraleiter			X					X		X				(Pictures of the Future 2006:63)
12 Nachtsichtgeräte für Fahrzeuge Nah- und Fern-Infrarotgeräte zur Fahrerassistenz bei Nachtfahrten.	Halbleiter: Ge, Ga-As, Si IR-sensitive Schicht: V				X								X		Synopse Infrarot Detektoren

Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Stand der Technik 2006			Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030			Recyclingpotenzial 2030				
		Forschung	Entwicklung	Prototyp	Im Markt	Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein, dissipativ
13 Neue Leichtbauwerkstoffe im Flugzeugbau Neuartige Legierungen zur kostengünstigen Fertigung und Treibstoffeinsparung.	Al-Mg-Sc, Al-Li, Faserverbundwerkstoffe		X			X				X		X			Synopse Airframe Leichtbau
14 PEM-Brennstoffzellen für Elektrofahrzeuge Brennstoffzelle als Traktionsstromquelle in Fahrzeugen.	Pt		X			X				X		X			Synopse Brennstoffzellen Elektrofahrzeuge
15 Superkondensatoren zur Traktionsunterstützung für Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellenfahrzeuge Pufferung von Elektrizität und schnelle Entladung bei Dynamikspitzen im Fahrbetrieb.	C, Kohlenstoff-Aerogele, Ta, Al, Ti, Kunststoffe, organische Lösungsmittel		X			X				X		X			Synopse Superkondensatoren
Informations- und Kommunikationstechnik, optische Technologien, Mikrotechniken															
16 Blue Ray DVD Kurzweiliger Laser für höchste Speicherdichte auf DVD.	Laser: GaN (Gallium(III)nitrid)				X					X				X	
17 Brennstoffzellen für mobile Geräte Brennstoffzellen für die Langzeit Stromversorgung von portablen Geräten der Informations- und Kommunikationstechnik.	Pt									X					Synopse (Hagelüken 2005:148)
18 Elektrische Kontaktierung mikroelektronischer Bauteile Robuste Kontaktierung von Bauteilen der IKT.	Bleifreie Lote: Sn, Ag, Cu, Bi Bumping: Au, Ni Kontakte: Re, Ag													X	Synopse Bleifreie Lote

Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Stand der Technik 2006			Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030			Recyclingpotenzial 2030				
		Forschung	Entwicklung	Prototyp	Im Markt	Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein, dissipativ
Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)														Hinweise
19 Glasfaserkabel für „die letzte Meile“ Hochleistungs-Breitbandtelekommunikation durch Einsatz von Glasfasern im Hausanschluss.	Optischer Gleichrichter: Ge Erbium			X	X	X	X			X		X			Synopse Glasfaserkabel
20 Hochpräzise Satellitennavigation Bereitstellung metergenauer ortsbezogener Informationen für Navigation und Information (Galileo Dienste).	Elektronik: Cu, Si, Sn Satelliten: Ti	X				X						X			(Pictures of the Future 2006:86)
21 IR-Sensoren Breites Anwendungsfeld in der Gebäude- und Sicherheitstechnik.	LiTaO ₃ , LiNbO ₃ , Pb ₃ Ge ₃ O ₁₁ , La, Sc, Nb, Ta				X	X							X		Synopse Infrarot Detektoren
22 LED für Hintergrundbeleuchtung in Liquid Crystal Displays (LCD) Quecksilberfreie und energiesparende Displaytechnik.	LED: AlGaAs, InGaN, ZnSe Elektrode: W			X		X							X		
23 Mikroelektronische Kondensatoren Hochleistungsdielektrika für Kondensatoren in der IKT.	Kondensatoren: Ta, Nb MLCC: Ag, Pd, Ni, Ti, Ba			X		X						X			Synopse Mikroelektronische Kondensatoren
24 Neue Chipgeneration Leistungsfähige, robuste und schnelle Halbleiter.	GaAs, Ge, CdTe					X								X	Synopse Hochleistungsmikrochips
25 Organische Elektronik (Polymerelektronik) Kostengünstige dünne und flexible polymerelektronische Schaltung.	Kunststoffe, Au	X				X							X		

	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Stand der Technik 2006			Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030			Recyclingpotenzial 2030		Hinweise		
		Forschung	Entwicklung	Prototyp	Im Markt	Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Ja		Eingeschränkt	Nein
<p>Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung</p> <p>Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)</p>															
26	<p>Organische Leuchtdioden OLED Polytronische energieeffiziente organische Leuchtdioden für Beleuchtung und Displays.</p>	Kunststoffe, ITO, Ba, Ru, Mg, Ag, Glas			X		X	X				X			(Pictures of the Future 2003:45; Fraunhofer Magazin 2005:18)
27	<p>RFID Tags Kostengünstige intelligente Funkketten für Massenprodukte.</p>	Antenne: Ag, Cu, Al Chip: Si, Kunststoffe Substrat: PET		X			X		X			X			Synopse RFID
28	<p>Transparentes Elektrodenmaterial Transparente und leitfähige Elektrode für Displays, optische Technologien und Solarzellen.</p>	In (ITO), Sn (SnO ₂), Sb (ATO)			X		X					X			Synopse ITO in der Displaytechnik
29	<p>Virtuelle Präzisionsimulation Computergestützte Planung, Optimierung und Prüfung von Produkten, Fabriken und chirurgischen Eingriffen.</p>	Elektronik: Cu, Si, Sn Großdisplays: In										X			(Pictures of the Future 2006:73)
30	<p>Weißer LED Herstellung von weißem Licht durch gelbe und blaue Dioden.</p>	Dioden: GaAs, GaInN, AlInGaP, GaN					X						X		Synopse Weiße LED
<p>Energie-, Elektro- und Antriebstechnik</p>															
31	<p>Biokatalyse in der Bionik Enzymatisch gesteuerte Prozesse zur CO₂-Fixierung und photosynthetischen Wasserstoffherzeugung.</p>	Behälter: Stahl, Cr, Cu	X			X							X		

Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Stand der Technik 2006			Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030			Recyclingpotenzial 2030			Hinweise	
		Forschung	Entwicklung	Prototyp	Im Markt	Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Ja	Eingeschränkt		Nein
32 Biomass to Liquid (BtL) Herstellung von Kraftstoffen aus Holz, Stroh und anderer Biomasse. Erdölsubstitution und Übergangstechnologie zur Wasserstoffwirtschaft.	Stahl, Co, Pt, Pd, Rh, Re	X				X	X		X	X	X				Synopse Synthetische Kraftstoffe
33 Carbon Capture and Storage Abscheidung von CO ₂ bei Verbrennungsprozessen und Lagerung in langzeitstabilen Reservoirs außerhalb der Erdatmosphäre.	Hochwärmefeste Stähle: Cr, Ni, Co, Mo Prozesschemikalien: Amine Katalysatoren	X				X	X		X		X				Synopse CCS
34 Carbon Nanotube (CNT) Wasserstoffspeicher Wasserstoffspeicher aus Kohlenstoff-Nanoröhren mit dem theoretisch über 5-fachen Energieinhalt herkömmlicher Kraftstofftanks.	C	X				X			X			X			
35 Carbon Nanotubes (CNT) für Stromleitungen Verlustarme Elektrizitätsübertragung über Kabel aus Kohlenstoffnanoröhren. CNT Drähte weisen theoretisch die 1000-fache Leitfähigkeit von Kupfer auf.	C	X				X			X			X			(South Centre 2005:37)
36 Coal to Liquid (CtL) Herstellung synthetischer Kraftstoffe aus Kohle. Erdölsubstitution und Übergangstechnologie zur Wasserstoffwirtschaft.	Stahl, Co, Pt, Pd, Rh, Re				X				X	X	X				Synopse Synthetische Kraftstoffe
37 Dünnschicht-Solarzellen Energie- und materialeffiziente Photovoltaik.	Halbleiter: Cu, In, Se, Ga, As, Cd, Ge, Si				X							X			Synopse Dünnschicht-Photovoltaik

Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Stand der Technik 2006			Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030			Recyclingpotenzial 2030			Hinweise	
		Forschung	Entwicklung	Prototyp	Im Markt	Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Ja	Eingeschränkt		Nein
38 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		Synopse Farbstoffsolarzellen
39 Fusionskraftwerke Kernfusion als Energiequelle.	Li, Be, Cr, Cu, Mg, Nb, Pb, Sn, Ta, Ti, V, W	X													Nicht marktreif bis 2030 (BGR 1989)
40 Gas to Liquid (GtL) Herstellung synthetischer Kraftstoffe aus Erdgas. Erdölsubstitution und Übergangstechnologie zur Wasserstoffwirtschaft.	Stahl, Co, Pt, Pd, Rh, Re				X				X						Synopse Synthetische Kraftstoffe
41 GUD Kraftwerke Hoch effizientes kombiniertes Gas- und Dampfturbinenkraftwerk mit elektrischen Wirkungsgraden deutlich über 60 %.	Stahl, Ti, Ni, Cr, Co, Keramiken, Re									X		X			(BWK 2008:32; Pictures of the Future 2007:50)
42 IGCC Kraftwerke Hoch effiziente Integrated Gasification Combined Cycle Kohlekraftwerke mit elektrischen Wirkungsgraden an die 60 %.	Stahl, Ti, Ni, Cr, Keramiken, Re		X								X				(Pictures of the Future 2008:32)
43 Keramik-Metallhalogenid-Lampen Hocheffiziente Lichterzeugung großer Helligkeit.	Sc, Seltene Erden, Dy, Nb, Ti				X										

Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Stand der Technik 2006			Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030			Recyclingpotenzial 2030			Hinweise
		Forschung	Entwicklung	Prototyp	Im Markt	Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Ja	Eingeschränkt	
44 Lithium-Ionen-Elektrizitätsspeicher Elektrizitätsspeicher mit höchster Leistungs- und Energiedichte für Fahrzeuge, mobile elektronische Geräte und Powerfools.	Co, Li		X		X		X		X		X			Synopse Lithium-Ionen Hochleistungsstromspeicher
45 Metallhydrid Wasserstoffspeicher Energiespeicherung hoher Speicherdichte.	Ni, Co, La, Nd		X				X		X		X			(Berger 2007:113)
46 Offshore Windkraftanlagen Regenerative Stromerzeugung.	Rotorblätter: GfK Korrosionsfeste Bauteile: Stahl, Cr, Ni, Mg			X			X		X			X		
47 Organische Solarzellen Kostengünstige dünne, flexible polymerelektronische Solarzelle.	Kunststoffe, ZnO ₂ , ITO						X		X			X		(Fraunhofer Magazin 2006:8)
48 Piezo-Antriebsmotoren Längenänderung von Piezokeramiken in einer Wechsellspannung wird in eine mechanische Drehbewegung umgesetzt. Neue Generation elektrische Motoren.	Zr, Pb, Ti						X		X			X		(Pictures of the Future 2006:64)
49 Redox-Flow-Elektrizitätsspeicher Stromspeicher höchster Kapazität für stationäre und mobile Anwendungen.	Struktur: Chromstahl Elektrolyt: V			X			X		X			X		Synopse Redox-Flow Elektrizitätsspeicher

Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Stand der Technik 2006			Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030			Recyclingpotenzial 2030			Hinweise	
		Forschung	Entwicklung	Prototyp	Im Markt	Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Ja	Eingeschränkt		Nein
Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)														
50 SOFc-Brennstoffzellen für stationäre Anlagen Erzeugung von Strom und Wärme für Gebäude und Blockheizkraftwerke.	Feststoffelektrolyt: Y, Zr, Sc, Ga, Ce, Sm, Gd, Ba Elektrode: La, Sr, Mn, Co, Cr, Ru, La, Ni, Pt	X		X		X			X			X			Synopse SOFC Brennstoffzellen
51 Solarthermisches Kraftwerke Konzentration der Sonnenenergie mit Parabolrinnen auf ein Wärmeträgerfluid.	Spiegel: Al, Ag	X		X		X			X			X			Synopse Solarthermische Kraftwerke
52 Superisolation Vakuumisolierende Materialien und Bauteile für die Wärmedämmung von Gebäuden und Geräten.	Kermaterial: SiO ₂ , SiC, PUR, PS, Glasfaser Hülle: Kunststoffe, Al	X				X			X			X			Synopse Vakuumisolation
53 Thermoelektrische Energiewandlung Stromgewinnung aus Wärme mit thermoelektrischen Generatoren.	Halbleiter: Te, Sb, Ge, Ag, Bi Drähte: Cu Keramikabdeckplatten	X		X		X			X			X			Synopse Thermoelektrische Generatoren
54 Trichromatische Fluoreszenzlampen Verbesserung der Farbwiedergabe durch RGB-Leuchtstoffmischung.	La, Ce, Tb, Ba, Gd				X					X			X		
55 Ultraeffiziente Elektromotoren für industrielle Anwendungen Neue Generation Strom sparender Motoren.	Spulen, Rotor: Cu Magnete: Nd, Sm				X						X				Synopse Ultraeffiziente industrielle Elektromotoren
56 Varistoren Elektrisches Bauteil zur verzögerungsfreien Ableitung von Überspannungen.	ZnO, dotiert mit Bi-, Cr- Mn-Oxiden. Elektroden: Ag				X									X	

Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Stand der Technik 2006			Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030			Recyclingpotenzial 2030			Hinweise	
		Forschung	Entwicklung	Prototyp	Im Markt	Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Ja	Eingeschränkt		Nein
Chemie-, Prozess- und Fertigungstechnik, Umwelttechnik, Maschinenbau															
57 3-D Drucker Auftrags-Fertigungsverfahren für kleine Bauteile aus Metall, Keramik, Kunststoff und lebenden Zellstrukturen.	Elektronik: Cu, Sn, Si Struktur: Stahl, Alu Gehäuse: Polymere	X				X			X			X			(Fraunhofer Magazin 2006b:54)
58 Adapttronik 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			(Fraunhofer Magazin 2006a:43)
59 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			X			(UBA 2007b; Berger 2007:79)
60 Biokunststoffe aus verholzten Rohstoffen Herstellung von Kunststoffen aus der Lignozellulose von Biomasse.	Rostfreier Stahl (Fe, Cr, Ni, Co)		X				X		X			X			(UBA 2007c; Berger 2007:155)
61 Bioaffinerien Biochemische und thermochemische Konversion von nachwachsenden Rohstoffen zu Werkstoffen, Energieträgern und Chemikalien in integrierten Standorten.	Rostfreier Stahl (Fe, Cr, Ni, Co)		X				X		X			X			
62 Chip Labor Mikrofluidische Systeme zur schnellen Stoffanalyse und zum Stoffscreening im Scheckkartenformat.	Glas, Kunststoff, Si, Cu, Sn		X				X		X			X			(MPG 2005)

Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Stand der Technik 2006			Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030			Recyclingpotenzial 2030			Hinweise	
		Forschung	Entwicklung	Prototyp	Im Markt	Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Ja	Eingeschränkt		Nein
63 Dezentrale Wasseraufbereitung Kleinräumige, siedlungsbezogene autarke Wasserver- und Abwasserentsorgung.	Stahl, Cr, Cu		X			X	X		X		X				(UBA 2007d)
64 Feinstaubabscheider für Kleinfeuerungsanlagen Kostengünstige, nachrüstbare Naturzugfiltersysteme.	Rostfreier Stahl (Fe, Cr, Ni, Co)		X			X	X		X		X				
65 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		X				(Fialka 2006)
66 Hochleistungslaser für industrielle Anwendungen Laser zum Schweißen und Trennen in der Fertigungstechnik.	Laserkristall: Nd, Y (Yttrium-Aluminium-Granat)				X	X				X		X			Synopse Festkörper-Laser für die industrielle Fertigung
67 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			
68 Nanosilber für biozide Anwendungen Nanopartikel setzen Silberionen mit antimikrobieller Wirkung frei (u. a. Kleidung, Kühlschränke, Waschmaschinen, Wundverbände, Pflaster).	Ag				X	X								X	Synopse Nanosilber

	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Stand der Technik 2006			Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030			Recyclingpotenzial 2030			Hinweise	
		Forschung	Entwicklung	Prototyp	Im Markt	Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Ja	Eingeschränkt		Nein
Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung															
Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)															
69	Piezelektrische Sensoren und Aktoren Leistungsfähige, robuste und vielseitige Messwertnehmer und Stellglieder bei Kraftfahrzeugen und Maschinen.	Piezokristalle: Quarz (SiO ₂), LiNbO ₃ , GaPO ₄ , BaTiO ₃ , Nb		X		X	X	X	X			X			
70	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									
Medizintechnik															
71	Medizinische Mikroroboter Miniaturisierte Sonden für Diagnose und Therapie.	Elektronik: Si, Cu, Sn. Gehäuse: Ti, Ta	X			X			X			X			
72	Miniaturisierte Lebenszeit-Herzschriftmacher Lebenslange Haltbarkeit.	Pt, Os, Elektronik, Batterien (Li, Co, Halbleiter), Ti, Ta	X			X			X					X	
73	Neuronales Interface Schnittstelle zur elektronischen Aufnahme von Nervenimpulsen für die Bewegungssteuerung mechanisierter Neuroprothesen.	Elektronik: Cu, Si, Sn Kontaktierung: Au	X			X			X			X			(Fraunhofer Magazin 2008 und 2005)
74	Orthopädische Implantate Ersatzgelenke mit hoher Lebensdauer.	Ti, Co, Cr		X		X			X			X			Synopse Orthopädische Implantate
75	Präzisions-Laser für medizinische Anwendungen Schmerzarme Kariesbehandlung und chirurgische Eingriffe mit hochpräziser Strahlführung.	Kristall: Nd, Y, Sc, Er, Tm		X		X						X			

Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Stand der Technik 2006			Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030			Recyclingpotenzial 2030				
		Forschung	Entwicklung	Prototyp	Im Markt	Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Ja	Eingeschränkt	Nein	Nein, dissipativ
Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)														Hinweise
76	Radioaktive Präparate zur Tumordiagnostik Spezialitäten für die nebenwirkungsarme Hochleistungsfrühdagnostik.	Szintigrafie: ⁹⁹ Tc PET: ⁶⁸ Ga, ¹⁸ F			X	X	X			X		X			
77	Schnelle hochauflösende bildgebende Diagnosegeräte 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		X			Synopse Medizinische Tomographie
Bau- und Gebäudetechnik, Bergbau-, Land- und Forsttechnik															
78	Intelligente Haustechnik Vernetzung, Überwachung und Fernsteuerung der Haustechnik, Informationstechnik, Kommunikationstechnik und Sicherheitstechnik.	Elektronik: Si, Cu, Sn Kabel: Cu		X		X	X			X		X			
79	Landfills Mining Leistungsfähige, kostengünstige Bergbautechniken zur Rückgewinnung von Wertstoffen wie beispielsweise Kupfer aus Deponien.	Stahl, Cr, Ni										X			
80	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		X			

Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Stand der Technik 2006			Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030			Recyclingpotenzial 2030			Hinweise	
		Forschung	Entwicklung	Prototyp	Im Markt	Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	Ja	Eingeschränkt		Nein
81 Submarine Rohstoffgewinnung Unterwasserbergbau erfordert spezielle korrosionsfeste Werkstoffe und Berücksichtigung der Druck- und Sauerstoffverhältnisse (Gashydrat, Manganknollen).	Rostfreie Stähle (Fe, Cr, Ni, Co), Ti	X	X		X	X		X	X			X			
Werkstofftechnik															
82 Aerocele ("Gefrorener Rauch") Hocheffektiver Wärmedämmstoff.	SiO ₂ , C, Al ₂ O ₃ , Chrom- und Zinnoxide	X				X		X	X			X			
83 Carbon Nanotubes (CNT) für hochfeste Drähte Drähte aus Kohlenstoffnanoröhren weisen theoretisch die 20-fache Zugfestigkeit von hochfestem Stahl auf.	C	X			X	X		X	X			X			(Technology Review 2008:12)
84 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			X			(Pictures of the Future 2006:65)
85 Hoch permeable Umkehrosmose-Membran Meerwasserentsalzung mit hoch effizienten Umkehrosmose-Membranen für den wirtschaftlichen Betrieb mit regenerativen Energiequellen (Wind, Solar).	Kunststoffe Keramiken Nanocomposite			X		X		X	X			X			Synopse Meerwasserentsalzung (Hoek 2006)
86 Hochfeste Hochtemperatur-Supraleiter Mit flüssigem Stickstoff kühlabare Supraleiter der zweiten Generation mit hoher Zugfestigkeit für Generatoren, Transformatoren, Elektromotoren und Stromkabel.	Y-Ca-Cu-O Bi-Sr-Ca-Cuprat Ti-Ba-Ca-Cuprat Hg-Ba-Ca-Cuprat		X			X		X	X			X			Synopse Hochtemperatur Supraleiter

Zukunftstechnologie Kurzbeschreibung	Rohstoffe und Werkstoffe (Auswahl)	Stand der Technik 2006			Markt 2030			Rohstoffbedarf 2030			Recyclingpotenzial 2030			Hinweise	
		Forschung	Entwicklung	Prototyp	Im Markt	Einführung	Nutzung	Sättigung	Unkritisch	Intensiv	Sensitiv	ja	Eingeschränkt		Nein
87 Hochkorrosionsfeste Superlegierungen Kurzbeschreibung Superlegierungen für den wirtschaftlichen Einsatz, bspw. in Meerwasserentsalzungsanlagen und submarinen Techniken.	Cr, Ti, Ni, Mn, Pd, Zn(o)-Phosphat			X	X	X	X	X	X	X	X				Synopse Meerwasserentsalzung
88 Hochleistungs-Permanentmagnete Starkes Magnetmaterial für miniaturisierte IKT, Elektromotoren und andere Anwendungen.	Magnetmaterial: Fe-B-Nd, Dy, Sm			X	X	X	X	X	X	X	X				Synopse Hochleistungs-Permanentmagnete
89 Hochwärmefeste Superlegierungen Steigerung der Arbeitstemperaturen von Triebwerken, Turbinen und Motoren auf über 1500 °C.	Ni, Co, Ti, Cr, Keramiken			X	X	X	X	X	X	X	X				Synopse Hochwärmefeste Superlegierungen
90 Nanocomposite Maßgeschneiderte organisch-anorganische Hybridpolymere mit anwendungsspezifischen Funktionsgruppen (hydrophob, hydrophil, antimikrobiell etc.).	Si, C			X	X	X	X	X	X	X	X				Bsp. ORMOCER®
91 Schwermetallfreier Korrosionsschutz für Metalle Substitut für die schwermetallhaltige Eisen- und Zinkphosphatierung zur Herstellung von Konversions-schichten vor der Lackierung.	Zr, Ti, F			X	X	X	X	X	X	X	X				(UMBW 2008)
92 Sensitive schaltbare Gläser Semitransparente und schaltbare IR-Durchlässigkeit für Verschattung und Wärmeschutz bei Fassaden- und Fensterglas.	Wärmereflexion: AgCl Wärmeschutz: In ₂ O ₃ Elektrode: ITO, WO ₃		X												

4 Technologiesynopsen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der vertiefend analysierten Zukunftstechnologien aus der Liste rohstoffabhängiger Zukunftstechnologien in Tabelle 3-1 dokumentiert. Bei den meisten Technologien ist es gelungen, quantitative Bedarfsprojektionen des induzierten Rohstoffbedarfs im Jahr 2030 für wichtige Rohstoffe zu erarbeiten. Bei einigen bleiben aufgrund der hoch 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. Sie hat in letzter Zeit durch die exorbitant gestiegenen Kraftstoffpreise und die Anstrengungen im Klimaschutz noch an Bedeutung gewonnen. 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 (Jochem 2004:145). Die Angaben in der Literatur schwanken, weil der Mehrverbrauch vom Fahrzeuggewicht, von der Energieeffizienz des Motors (Diesel, Otto), der Verkehrssituation (Stadtverkehr, Autobahn), der Fahrweise und anderen Einflüssen abhängig ist.

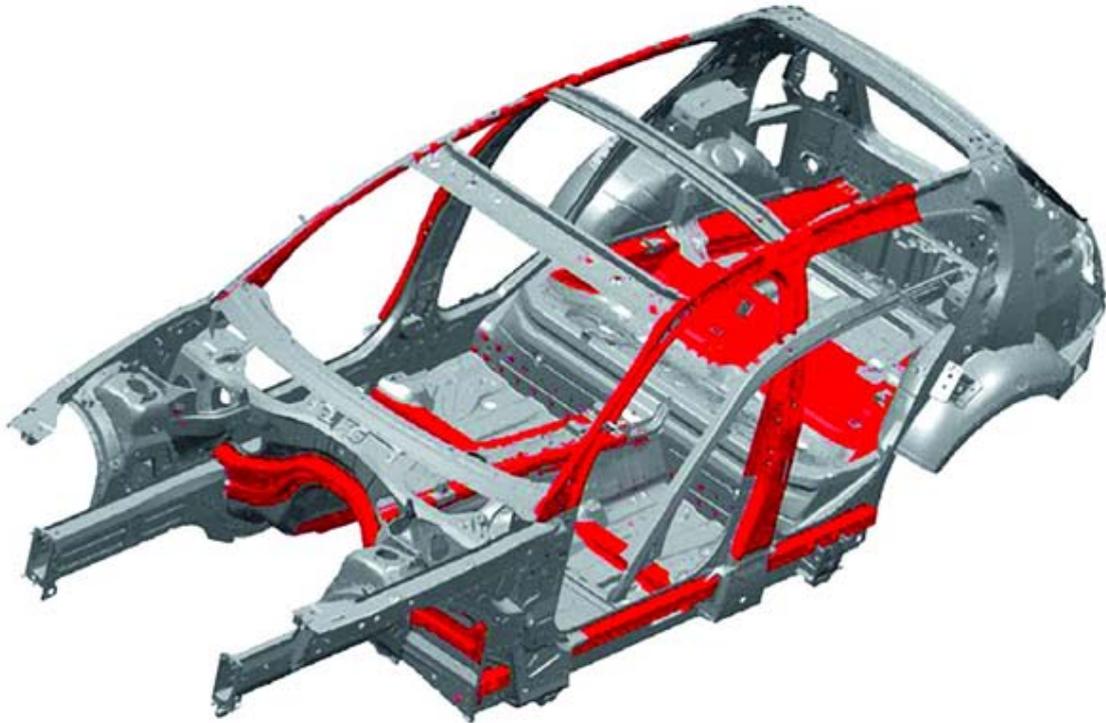
Von Seiten der Automobilindustrie und ihren Zulieferern wurden und werden erhebliche Anstrengungen zur Gewichtsreduktion unternommen. Allgemein bekannt sind die Ansätze der Audi AG, im Fahrzeugbau Stahl durch Aluminium zu ersetzen. Das Karosseriekonzept einer Rahmenstruktur aus Aluminium wird als Audi Space Frame (ASF[®]) vermarktet. Es bringt nach Angaben des Werks beim Modell A8 eine Gewichtsreduktion gegenüber konventioneller Stahlbauweise von 140 kg (Audi 2008).

Aluminium weist nur $\frac{1}{3}$ 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 (Jochem 2004:148). 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 ungleich günstiger 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.

Ein anderer Leichtbauansatz wurde mit den so genannten 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 ist heute globaler Technologieführer und Weltmarktführer bei Tailored Blanks. Es 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 2003:169).

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 Abbildung 4-1 entnommen ist. Sie zeigt die Rohbaukarosserie eines Pkw und hebt die besonders beanspruchten Komponenten hervor.

Abbildung 4-1: Rohbaukarosserie eines Personenkraftwagens



Quelle Salzgitter AG

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

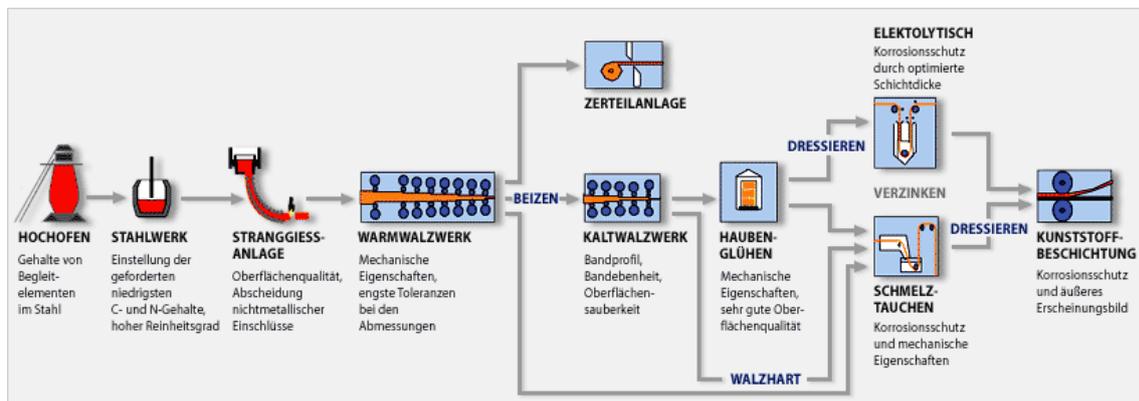
Die Technologieentwicklung ist noch im Fluss. In der Zwischenzeit können auch nicht gerade verlaufende Blechfugen verschweißt werden. Der Laserstrahl folgt dabei dem Kurvenverlauf beliebiger Fugenkonturen. Auch mit der Verbindung von Stahl- und Aluminiumblechen zu hybriden Tailored Blanks wird experimentiert. Als Anwendung dafür bietet sich unter anderem das Pkw Dach an, indem die tragenden Seitenteile an den beidseitigen Regenrinnen in Stahl, das eigentliche Dach dazwischen in Aluminium ausgeführt werden. Angaben, welche Gewichtsreduktionen durch diese Leichtbautechnik möglich werden, sind noch nicht verfügbar.

4.1.2 Rohstoffinhalt

Schweißbaren hochfesten Baustählen 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 hoch-

festen 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 1983:288), 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 das Korn verfeinernder Legierungselemente, darunter Aluminium, Niob und Vanadium mit Anteilen unterhalb von 0,1 Gewichtsprozenten. Zum anderen wird das Gefüge durch Wärmebehandlung und Walzen beeinflusst. Für die Ausbildung von Gefüge und Eigenschaften bei Karosserieblechen spielt die Haubenglühstufe nach dem Kaltwalzen eine große Rolle (Abbildung 4-2).

Abbildung 4-2: Herstellung von Blechen

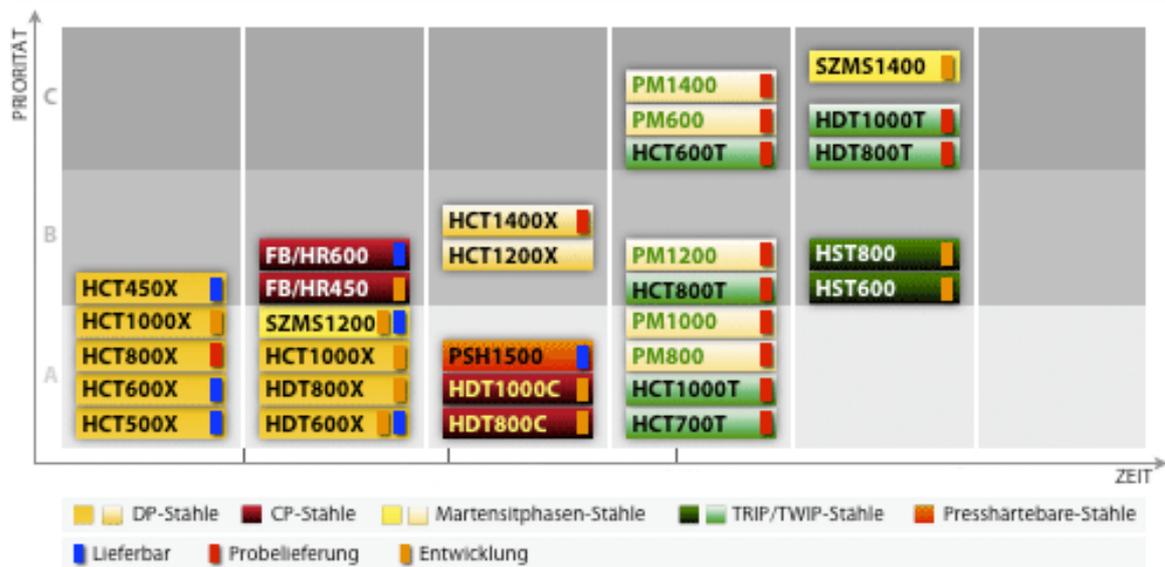


Quelle Salzgitter AG

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 2008:1). Die Richtung der Werkstoffforschung und -entwicklung für Karosseriebleche, die zwischen VdEh, Stahlherstellern und Automobilindustrie abgestimmt wurde, zeigt Abbildung 4-3.

Abbildung 4-3: Priorisierung der Stahlsorten in der Werkstoffentwicklung



Quelle Salzgitter AG

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. In der Zwischenzeit bestehen die Rohkarossen moderner Autos zu 25 % aus Tailored Blanks (Industrie Forum 2008:1). Die Beherrschung des Laserstrahlschweißens beliebiger Nahtformen erschließt der Technologie weitere Anwendungen und zusätzliche Potenziale zur Gewichtsreduktion. Es ist davon auszugehen, dass bis 2030, 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

Geht man mit der Shell AG davon aus, dass der Fahrzeugbestand von heute 630 Millionen Fahrzeugen bis 2030 weltweit auf über 1 Milliarde Autos steigt (Shell 2007:5),

dann nimmt die Fahrzeugproduktion von heute 63 Millionen Fahrzeugen auf etwa 100 Millionen im Jahr 2030 zu. Bei einem mittleren Ausgangsgewicht der Fahrzeugkarosserie von 360 kg, einem Gewichtsreduktionspotenzial von 25 %, dem zuvor genannten heutigen Einsatz von Tailored Blanks (25 %) und einer konsequenten und vollständigen Nutzung der Tailored Blanks Technologie in 2030 wird der Bedarf an Karosserieblechen für Fahrzeuge von 21,4 Mio. t in 2006 auf 27 Mio. t in 2030 steigen.

Tabelle 4-1: Globaler Stahlbedarf für Karosseriebleche von Fahrzeugen in t

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030
Eisen und Stahl	1.170.000.000	21.400.000	27.000.000

Die Leichtbautechnologie der Tailored Blanks besitzt also das Potenzial, trotz einer Zunahme der Fahrzeugproduktion von 58 % den Stahlbedarf für Karosseriebleche nur moderat um 26 % steigen zu lassen. Dies ist ein Beispiel für das Potenzial, mit Leichtbaustrategien die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Rohstoffbedarf herbeizuführen.

4.2 Elektrische Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge

4.2.1 Technologiebeschreibung

Angesichts schwindender Ölvorräte werden seit ungefähr 20 Jahren neue Antriebstechnologien für Kraftfahrzeuge diskutiert und entwickelt. Die wesentlichen Fahrzeugtypen sind der Hybrid-Antrieb (Elektro- und Kraftstoffantrieb), das Elektrofahrzeug (Antrieb durch Elektroenergie) sowie gasbetriebene Fahrzeuge¹. In dieser Technologie-Synopse soll das Hybrid-Fahrzeug näher untersucht werden.

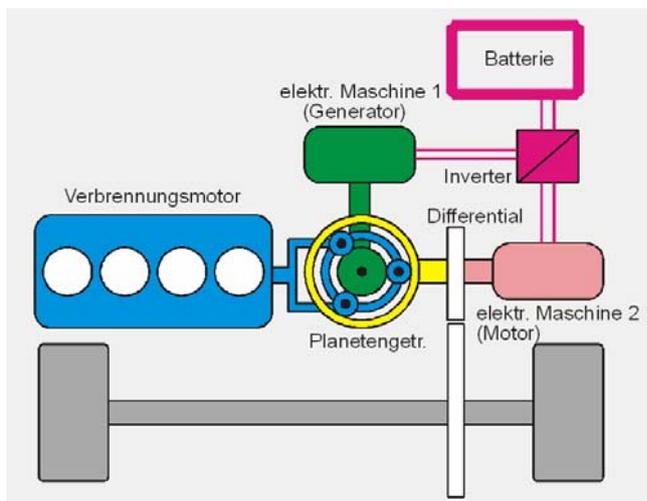
Beim Hybridantrieb erfolgt der Antrieb des Pkw² sowohl durch einen Elektromotor als auch durch einen konventionellen Verbrennungsmotor mit geringerer Leistung. Hybrid-Fahrzeuge sind somit nur Vorstufen der Elektrofahrzeuge, die ausschließlich durch Elektroenergie angetrieben werden. Je nach Leistungsbedarf entscheidet eine Steuerungselektronik bei Voll-Hybrid-Fahrzeugen, wie und unter welchen Bedingungen die Motoren zu schalten sind. Auf diese Weise wird ein geringerer Kraftstoffverbrauch erzielt. Neben dem Elektromotor benötigt ein Hybridfahrzeug – wie auch die Elektrofahrzeuge – noch einen weiteren Energiespeicher neben dem Kraftstofftank – um den Elektromotor anzutreiben. Dieser Energiespeicher – üblicherweise eine Batterie – wird entweder durch den Verbrennungsmotor über die Lichtmaschine oder einem zweiten Elektromotor aufgeladen. Es ist aber auch möglich, die Bremsenergie wieder in elektrische Energie umzuwandeln und der Batterie zuzuführen (Rekuperation).

Der wesentliche Vorteil eines Hybridmotors ist, dass der Verbrennungsmotor häufiger und länger im optimalen Wirkungsgradbereich arbeiten kann, da bei Beschleunigung zusätzliche Antriebskraft vom Elektromotor bezogen werden kann. Beim Bremsen und auch bei der Motorbremsung z. B. beim Ausrollen kann die Batterie des Elektromotors aufgeladen werden. Nur bei höheren Geschwindigkeiten auf der Autobahn hat der Hybridmotor kaum Vorteile, weshalb sich die Kraftstoffeinsparung vor allem im Stadtverkehr zeigt³.

-
- ¹ Im Prinzip sind alle Kombinationen von erneuerbaren und nichterneuerbaren Kraftstoffen mit unterschiedlichen Antriebsarten möglich. Hybrid-Fahrzeuge können sowohl mit Benzin als auch mit Erdgas oder Biogas angetrieben werden. Im Prinzip sind auch Biodiesel-Hybrid-Fahrzeuge möglich. Ebenso kann bei Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen Strom aus erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Quellen genutzt werden. Gleiches gilt auch für Plug-In-Elektrofahrzeuge, die aber auch durch Brennstoffzellen angetrieben werden könnten.
 - ² Hybrid-Antriebe werden seit einiger Zeit nicht nur für Pkw, sondern auch für Transporter oder Busse genutzt.
 - ³ Üblicherweise treiben bei höchsten Geschwindigkeiten beide Motoren das Fahrzeug an, während beim energiesparenden Fahren in niedrigen Geschwindigkeiten ein rein elektrischer Antrieb möglich ist.

Hybridfahrzeuge gibt es inzwischen nach verschiedenen Konstruktionsprinzipien. Beim seriellen Hybridmotor lädt der Verbrennungsmotor nur die Batterien und ist demzufolge sehr leistungsarm ausgelegt (Chevrolet Volt). Beim parallelen Hybridmotor treiben beide Motoren das Fahrzeug an (Honda Civic Hybrid). Mischhybride kombinieren den seriellen (Batterieladung und Antrieb durch Elektromotor) und den parallelen Antrieb (direkter Antrieb des Fahrzeugs durch beide Motoren). Beim parallelen Antrieb sind jedoch noch je nach Getriebe unterschiedliche Antriebskonzepte möglich. Beim Toyota Prius mit Leistungsverzweigung wird das Fahrzeug zum Teil über den Verbrennungsmotor und zum Teil über den Elektromotor angetrieben. Bei Fahrzeugen von General Motors, Daimler und BMW wird je nach Belastung der elektrische oder der Verbrennungsantrieb genutzt (Two-Mode-Getriebe mit Allison Transmission). Ein weiterer Unterschied ist häufig, ob die Fahrzeuge mit einem (v. a. paralleler Antrieb) oder mit zwei Elektromotoren (v. a. serieller Antrieb) ausgestattet sind, wobei einer der beiden zu meist als Generator zum Starten und zum Laden der Batterie dient, der zweite zum Antrieb des Fahrzeuges.

Abbildung 4-4: Baukonstruktion eines Toyota Prius mit Leistungsverzweigung



Quelle: Thein o.J.

Aus einer materiellen Perspektive gesehen unterscheidet sich das Hybrid-Fahrzeug durch einen (oder zwei) zusätzliche(n) Elektromotor(en) und eine Hochvoltbatterie anstelle der üblichen Bleibatterie.⁴ Der Verbrennungsmotor kann im Unterschied zu konventionellen Pkw leistungsärmer ausgelegt werden. Der Generator (Lichtmaschine

⁴ Parallel hierzu muss beachtet werden, dass als Energiequelle auch noch prinzipiell die Brennstoffzelle in Frage kommt. Weiterhin wird an der Entwicklung so genannter "Supercaps" gearbeitet, d. h. Kondensatoren, die z. B. zum elektrischen Anfahren sehr schnell hohe Energien bereitstellen.

bzw. Elektromotor) hingegen muss leistungsstärker ausgelegt werden. Der Anlasser entfällt allerdings bei den meisten Hybrid-Fahrzeugen, da der Verbrennungsmotor vom Elektromotor gestartet wird.

Neben den oben genannten Konstruktionsprinzipien sind unterschiedliche Modifikationen des Hybridantriebs möglich. Beim Micro-Hybrid wird der Anlasser in einer stärkeren Variante oder durch einen Riemenstarter-Generator ausgetauscht. Hierbei wird nur eine geringe Kraftstoffeinsparung erzielt (Beispiele BMW 1er, Citroën C3)⁵. Der Mild-Hybrid hat eine mittlere Leistung des Elektromotors und höhere Kraftstoffeinsparung als der Micro-Hybrid. Beispiele sind der Honda Civic, Citroën C-Metisse oder Peugeot 307. Beim Voll-Hybrid wird der Elektromotor zum "normalen" Antrieb genutzt und hat eine Leistung von 30 – 50 kW. Demzufolge braucht das Fahrzeug eine Hochleistungsbatterie. Beispiele sind der BMW X3, Lexus LS400 oder LS600, Nissan Altima, Opel Astra, Toyota Prius. Beim Power-Vollhybrid ist der Elektromotor noch leistungsstärker. Zudem gibt es noch Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge, die am normalen Stromnetz aufgeladen werden können.

Die meisten Elektroantriebe der Hybrid-Fahrzeuge sind so genannte Permanent-Synchronmaschinen, die es in unterschiedlichen Ausführungen gibt. In diesen Elektromotoren sind die zusätzlichen Kupferbedarfe sowie die Seltenen Erden-Magnete – zumeist mit hohem Anteil an Neodym oder Samarium – untergebracht⁶.

4.2.2 Rohstoffinhalt

Hinsichtlich des Rohstoffbedarfs fallen beim Hybridantrieb die Hochleistungsbatterie sowie der Elektromotor ins Gewicht. Die Hochleistungsbatterie wird in einer separaten Technologiesynopse behandelt⁷. Bei Voll-Hybrid-Fahrzeugen wird auf einen Anlasser zumeist aus Kostengründen verzichtet, anstelle dessen wird mit einem zweiten Elektromotor als Starter und Ladegerät gearbeitet (vgl. Hybrid-Autos.Info o. J. LE Voll-Hybrid). Aufgrund der Energiespeicherung in der Hochleistungsbatterie ist auch noch ein Pulswechselrichter notwendig sowie ein 12 V DC/DC-Wandler. Die beiden letzten Bauteile haben nur einen geringen Kupferanteil. In der einfachsten Version funktioniert

⁵ Alle Beispiele jeweils in der Hybridvariante. Vgl. Hybrid-Autos.Info o.J.

⁶ Neodym-Magnete wurden bis vor einiger Zeit noch bei niedrigeren Temperaturen bis 100 Grad Celsius und Samarium-Magnete bei Temperaturen oberhalb von 100 Grad Celsius verwendet. Neuere Entwicklungen ermöglichen jedoch die Nutzung von Neodym-Magneten auch bis 220 Grad Celsius (vgl. Lindegger et al. o.J.:25).

⁷ Beim Toyota Prius wird eine modulare Nickel-Metallhydrid-Batterie verwendet mit 28 Modulen zu je sechs Zellen. Die Spannung beträgt in der Summe 202 Volt bei 21 kW Leistung. Das Gewicht beträgt 22 kg (vgl. Hybrid-Autos.Info o.J., Toyota Prius).

der Hybrid-Antrieb in Form einer Start-Stop-Automatik, bei Voll-Hybrid-Fahrzeugen kann das Fahrzeug nur mit dem Elektromotor gefahren werden.

Studien über die mengenmäßige Verwendung von Kupfer und Permanentmagneten mit Seltenen Erden als Bestandteil in Hybrid-Fahrzeugen liegen nicht vor, insbesondere weil sich auch die Hybrid-Technologie schnell weiterentwickelt. Beispielsweise war eines der ersten Fahrzeuge mit Hybrid-Antrieb – der Audi 100, Baujahr 1989 – noch mit einem 60 kg schweren 9,3 kW Gleichstrom-Elektromotor ausgestattet (vgl. Hybrid-Autos.Info o.J.). Beim Honda Civic IMA – Baujahr 2006 – wurde das Gewicht des Elektromotors auf ca. 30 kg reduziert (vgl. Hybrid-Autos.Info o.J., Honda Civic). Parallel zur Entwicklung der Batterietechnik wurde auch bei den Elektromotoren durch neue Konzepte das Gewicht reduziert. Beispielsweise wurde von der Firma Continental Automotive ein Kurbelwellen-Startergenerator entwickelt, der auf der Kurbelwelle sitzt und sowohl als Starter als auch als Lichtmaschine (Generator) fungiert (vgl. Continental Automotive 2002). In der folgenden Aufzählung sind die im Rahmen der Recherche erfassten Aussagen zu den Kupferbedarfen von Hybrid-Fahrzeugen zusammengefasst:

- ▶ In Hybridfahrzeugen wird deutlich mehr Kupfer verwendet als in herkömmlichen Autos, die durchschnittlich 25 kg Kupfer enthalten (European Copper Institute 2000).
- ▶ Hybrid cars use big electric motors or drive-trains that can contain copper coils of up to 12 kg each (European Copper Institute 2004)⁸.
- ▶ Der Kupferanteil in Elektromotoren beträgt 50 – 60 % (European Copper Institute 2007)
- ▶ Ein 3 kW-Permanentmagnet Motor enthält ca. 1,7 kg Kupfer (Lindegger 2008:29)

Exkurs: Zukünftige Kupferbedarfe durch mehr Autoelektronik

Bei der Abschätzung des Rohstoffbedarfes für Kupfer ist noch zu berücksichtigen, dass Kraftfahrzeuge für die gesamte Elektrik und Elektronik auf Kupferleitungen angewiesen sind und Kupfer auch Bestandteil der zahlreichen Elektromotoren und Messingleitungen (z. B. Bremsleitungen) ist. In der Studie des IZT wird von einem mittleren Kupfergehalt von 25 kg pro Pkw, 67 kg pro Nutzfahrzeug und 7 kg pro Kraftrad ausgegangen (Erdmann et al. 2004). Nach Auswertung verschiedener Studien schätzen Lucas et al. (2007:18ff), dass in einem durchschnittlichen Pkw ca. 20 bis 22 kg Kupfer genutzt werden.

Auf Basis der weltweiten Produktion von 45 Mio. Pkw in 2006 ergibt sich bei einer Kupfermasse von 20 kg (s.o.) für einen Pkw ein Bedarf von 900.000 t⁹. Die Produktion von Nutzfahrzeugen lag in 2006 bei ca. 16 Mio. Unter der Annahme eines Kupferbedarfes von 40 kg – gemäß der Schätzung von Lucas et al. – ergibt sich ein weiterer Bedarf von 600.000 t Kupfer für Lkw. Somit würde der Bedarf allein für Pkw und Lkw in 2006 bei 1,5 Mio. t Kupfer liegen, was einem Anteil von ca. 10 % der weltweiten Minenproduktion von Kupfer entspricht.

Aufgrund einer zunehmenden höherwertigen Ausstattung wird dieser Anteil nach RWI/ISI/BGR (2007) auf 40 kg in den nächsten 20 Jahren steigen. Im Pkw-Bereich sind die Treiber vor allem ein höherer Komfort aber auch höhere Sicherheit durch Automatisierung des Fahrzeuges. Gegenläufig zum Trend der höheren Ausstattung des Leitungsnetzes sind Materialeffizienzstrategien der Fahrzeughersteller sowie möglicherweise die Einführung eines 42 V-Bordnetzes, das geringere Kabelquerschnitte ermöglicht.

Ein zweites Bauelement der Elektromotoren sind neben Kupferspulen auch noch Permanentmagneten. Die höchsten Leistungsdichten von Elektromotoren lassen sich mit Magneten aus Seltenen Erden erreichen. Elektromotoren mit Nd-Fe-B-Magneten können aufgrund ihrer Leistung auch als Antrieb von Kraftfahrzeugen verwendet werden. Bei höheren Temperaturen werden üblicherweise SmCo-Magnete verwendet¹⁰.

Allerdings gibt es kaum Hinweise zur mengenmäßigen Verwendung von Magneten in Hybridfahrzeugen. Nach Fokus Money (o.J.) sollen typische Hybridfahrzeuge zwischen zehn und zwölf Kilogramm Seltene Erden enthalten. Diese verteilen sich nicht nur auf spezifische Hybrid-Bauteile wie die Elektromotoren, sondern u. a. auch auf die Batterien und Glasbeschichtungen sowie die zahlreichen Stellmotoren in den Fahrzeugen. Der Neodym-Anteil in den Magneten beträgt rund 26,7 % (s. Technologiesynopse Hochleistungs-Permanentmagnete). Der Anteil der Seltenen Erden in einem Hybrid-

8 Sinngemäß auch European Copper Institute 2003: 10.

9 Annahmen: bis zu 1.500 Leitungen à durchschnittlich 2 m; ca. 800 m in der Kompaktklasse (hierunter werden Mittelklassefahrzeuge verstanden), ca. 3.000 m in der Premiumklasse.

10 Neue Entwicklungen der Antriebstechnologie von Continental integrieren Kupplung und Elektroantrieb in einem Bauteil. Hierbei sitzt das Bauteil unmittelbar am Motor. Es ist deshalb zu vermuten, dass hierbei auch Samarium-Magnete zum Einsatz kommen könnten.

Fahrzeug wird auf insgesamt etwa 20 kg geschätzt (Müllenmeister 2007)¹¹. Bei der Herstellung eines effizienten Permanent-Magnet Motors wurde von Lindegger auch eine Massenanalyse durchgeführt (Lindegger et al. 2008:29). Der 3 kW-Motor enthält ca. 0,3 kg Nd-Fe-B-Magnetwerkstoffe.

Aufgrund fehlender Angaben können die höheren Anteile an Kupfer und Neodym für Hybrid-Fahrzeuge nur in weiten Grenzen geschätzt werden. In der folgenden Tabelle sind die Abschätzungen mit oberen (zwei Elektromotoren) und unteren Grenzen (ein Elektromotor) aufgeführt. Weiterhin ist ein gegenläufiger Trend der Materialeffizienz sehr wahrscheinlich, d. h. dass mit zunehmenden Rohstoffpreisen auch eine höhere Effizienz des Rohstoffeinsatzes wahrscheinlich ist. Allerdings ist bei der konventionellen Ausstattung der Fahrzeuge nach BGR ein gegenläufiger Trend zu erwarten, da aufgrund einer höheren Nutzung von Elektronik und von Motoren in Fahrzeugen mehr Kupfer verbaut wird.

Tabelle 4-2: Kupfer und Neodym in Hybrid-Fahrzeugen

	Standard-Pkw	Hybrid-Pkw (zusätzlicher Kupfer- und Neodymanteil)		Hybrid-Pkw (gesamter Kupferanteil)	
Kupfer in Pkw	Kupfer [kg]	untere Grenze Cu ##	obere Grenze Cu ###	untere Grenze Cu	obere Grenze Cu
Pkw 2006	20*	20**	30**	40**	50**
Pkw "2026"#	40*	15***	25***	55**	65**
Neodym in Pkw		untere Grenze Nd ##	obere Grenze Nd ###		
		0,5+	1,0++		

Quellen und Anmerkungen: * Lucas 2007:18ff, ** eigene Schätzungen für Voll-Hybrid-Fahrzeuge, *** eigene Schätzungen unter der Annahme einer verbesserten Materialeffizienz für Voll-Hybrid-Fahrzeuge, # unsicheres Referenzdatum nach RWI/ISI/BGR 2007, ## ein Elektromotor, ### zwei Elektromotoren, von denen einer eine geringe Masse hat; + Annahme 1,5 kg Magnet mit 30 % Neodym, ++ Annahme 4,5 kg Magnet mit 30 % Neodym. Hierbei wurden die Angaben von Lindegger (2008) für den 3 kW-Motor mit einem Faktor 5 (ein starker Motor) bzw. einem Faktor 10 (ein sehr starker Motor und ein kleiner Motor) multipliziert.

¹¹ Relevant ist zudem die Herstellung der Magnete, die zumeist aus den reinen Metallen erfolgt. Hierbei werden die Legierungen "erschmolzen", die kalte Legierung gebrochen, zu einem feinen Pulver gemahlen, im Magnetfeld gepresst und gesintert. Nach der Formgebung durch Schneiden erfolgt die Magnetisierung bei hohen Feldstärken. Neodym-Magnete müssen noch galvanisiert werden. (vgl. IBS Magnet o.J.). Alternativ hierzu sind auch kunststoffgebundene Magnete möglich (vgl. Lindegger et al. o.J.: 24 und 34ff.).

4.2.3 Foresight industrielle Nutzung

Um abschätzen zu können, welchen Ressourcenbedarf die Hybridtechnologie verursachen könnte, ist es notwendig, die Produktion von Kraftfahrzeugen und den Hybrid-Anteil abzuschätzen. Die Entwicklung des Pkw-Marktes und des Einsatzes von Hybrid-Fahrzeugen ist von vielfältigen Faktoren abhängig wie der konjunkturellen Entwicklung, der Entwicklung der Einkommen in Abnehmerländern, den Rohstoffpreisen, dem Benzinpreis oder auch Maßnahmen zur Minderung des motorisierten Individualverkehrs (MIV) zum besseren Klimaschutz (politische Maßnahmen wie z. B. Umweltzonen oder Besteuerung nach CO₂-Ausstoß).

Während im letzten Jahrhundert die Steigerung der Kfz-Produktion vor allem durch die Wohlstandsnachfrage aus den Ländern der westlichen Welt erfolgte, treibt heutzutage vor allem der wirtschaftliche Aufschwung in China, Russland und Indien sowie in anderen Schwellenländern den Markt an. Die wesentlichen Treiber für die kontinuierliche Steigerung der Produktion liegen im zunehmenden Wohlstand der Schwellenländer in Asien und Südamerika, der sich in der Anschaffung von Kraftfahrzeugen manifestiert. Parallel dazu vollführen diese Länder auch die gleichen Entwicklungen wie in den industrialisierten Ländern, in denen Kraftfahrzeuge einer "verbesserten" Mobilität und der Förderung der wirtschaftlichen Entwicklung dienen.

Die International Organization of Motor Vehicle Manufacturers gibt die Produktion von Fahrzeugen in 2007 mit 53 Mio. weltweit an. Der VdA gibt andere Daten an (VdA 2008). Der Unterschied ergibt sich vermutlich aus der unterschiedlichen Erfassung der Pkw, da OICA Nutzfahrzeuge in einer separaten Statistik geführt werden. Nach dem VdA wurden im Jahre 2007 weltweit 72 Mio. Fahrzeuge produziert, davon entfielen rund 60 Mio. Einheiten auf die Pkw-Herstellung (einschließlich der Light Trucks in Amerika) und gut 11 Mio. Einheiten auf die Fertigung von Nutzfahrzeugen. In einer Studie über die weltweite Entwicklung der Automobilproduktion schätzt das Essener Marktforschungs- und Beratungsunternehmen R. L. Polk die Pkw-Neuzulassungen in 2008 auf 70 Mio. Pkw (vgl. Otterbach 2008). Bis 2020 soll sich der Markt für Pkw inklusive leichte Nutzfahrzeuge bis 3,5 t auf 90 Mio. Stück entwickeln. Dieses Wachstum wird vor allem durch Neuzulassungen in Asien – und hierbei besonders in China – hervorgerufen. An zweiter Stelle werden Russland und Indien als treibende Kräfte stehen. In Europa sollen in 2020 26 Mio. Fahrzeuge neu zugelassen werden.

Die Vereinten Nationen gehen davon aus, dass es in 2007 ca. 750 Mio. Fahrzeuge gibt und diese Zahl sich bis 2030 verdoppeln wird. Unter der Annahme einer Produktion von 53 Mio. Pkw in 2007 (OICA o.J.), einer Lebensdauer von 15 Jahren sowie eines Anteils von 75 % an den Fahrzeugen kann die notwendige Neuproduktion berechnet

werden. Im Ergebnis müssten ca. 100 Millionen Kraftfahrzeuge in 2030 produziert werden, wenn in 2030 der Bestand an Kraftfahrzeugen 1,125 Milliarden betragen soll.

Tabelle 4-3: Pkw-Produktion weltweit (Mio. Stück)

Quelle/Jahr	1980	1990	2000	2004	2005	2006	2007	2008	2020	2030
OICA	23	36	41	44	47	50	53			
VdA							60			
Otterbach								70	90	
Vereinte Nationen*							53		78,5	100,6

Quellen und Anmerkungen: OICA o.J., VdA 2008, Otterbach 2008 sowie Vereinte Nationen zitiert nach Kaiser et al. 2008:11. * = eigene Berechnung mit Annahme der Lebensdauer von 15 Jahren pro Fahrzeug, einer Abgangsrate von ca. 7 % und einem Pkw-Anteil von 75 %.

Der Kauf von Hybrid-Fahrzeugen wird von Verbraucherseite vor allem durch die steigenden Benzinpreise beeinflusst. Auf Seiten der Verkäufer (Hersteller) liegen die treibenden Faktoren vor allem im Angebot von preisgünstigen und zuverlässigen Fahrzeugen, die einen deutlichen Kostenvorteil in der Nutzung des Fahrzeugs für den Käufer mit sich bringen. Weiterhin kann der Kauf von Hybrid-Fahrzeugen noch vom Staat beeinflusst werden z. B. durch geringere Kraftfahrzeugsteuern. Der entscheidende Treiber wird jedoch unter Berücksichtigung des Kraftstoffpreises der Neupreis der Fahrzeuge sein. Derzeit liegen die Kosten der Hybrid-Fahrzeuge noch deutlich über denen der Fahrzeuge mit Otto-Motoren.

Die folgende Tabelle zeigt einen Kostenvergleich zwischen einem Toyota Prius (Hybrid-Motor) und einem Toyota Corolla (Verbrennungsmotor):

Tabelle 4-4: Anschaffungs- und Kraftstoffkosten für Toyota Prius und Corolla

	Prius	Corolla Verso
Normverbrauch	4,3 l / 100 km	7,5 l / 100 km
Verbrauch auf 100.000 km	4.300 l	7.500 l
Bezinkkosten (1,60 €/l, 100.000 km)	6.880 €	12.000 €
Pkw-Kosten	25.000 €	21.000 €
Kosten (Anschaffung + Kraftstoff)	ca. 32.000 €	ca. 33.000 €

Quelle: www.toyota.de

Nahezu alle großen Hersteller beabsichtigen, Hybrid-Fahrzeuge in den nächsten Jahren verstärkt an den Markt zu bringen. Hierdurch wird die Quasi-Monopolstellung von Toyota und Honda aufgeweicht werden und es ist damit zu rechnen, dass Hybrid-Fahrzeuge kostengünstiger werden. Hybrid-Fahrzeuge erfreuen sich auch einer zu-

nehmenden Akzeptanz bei Autokäufern. Nach einer Marktstudie von Continental würden 4,1 % mit Sicherheit ein Hybrid-Fahrzeug als nächstes Auto anschaffen (Continental 2008). 36 % der Befragten wären bereit, ein Elektrofahrzeug zu erwerben. Hierbei werden vor allem die steigenden Kraftstoffkosten als auch Umweltaspekte genannt.

Nach Leoni (2005) wurden in 2004 weltweit ca. 90.000 Hybrid-Fahrzeuge verkauft. In Bezug auf die weltweite Kfz-Produktion gemäß OICA entspricht dies einem Marktanteil von 0,2 %. Hiervon hatte Toyota mit dem Prius ca. 62 % und Honda mit dem Civic ca. 30 % Marktanteil (Leoni 2005). Nach Leoni (2005) werden in 2008 ca. 780.000 und in 2013 ca. 4,5 Mio. Hybrid-Fahrzeuge verkauft werden. Nach Fokus Money (o.J.) wurden in 2006 weltweit rund 600.000 Hybridfahrzeuge verkauft. Bis 2010 sollte sich diese Zahl auf 1,5 Millionen mehr als verdoppeln. Nach Marklines (2008) lag der Absatz an Hybrid-Fahrzeugen aller Art (inklusive Nutzfahrzeuge) in 2004 bei ca. 167.000 Fahrzeugen und in 2007 bei ca. 509.000 Fahrzeugen. Wesentlich optimistischer schätzt das Center Automotive Research an der FH Gelsenkirchen (CAR) die Entwicklung des Hybrid-Marktes ein (manager-magazin 2008). Nach CAR werden Elektroautos zu einem Massenphänomen, deren Verkauf sich von 80.000 Stück in 2008 auf 16,2 Mio. in 2025 steigern wird. Dann würden in Europa nur noch Hybrid-Fahrzeuge zugelassen werden.

Nimmt man als Basis für die Pkw-Produktion die Daten von OICA sowie Berechnungen auf Basis der Annahmen zur Entwicklung des Pkw-Marktes durch die Vereinten Nationen (s.o.), so ergeben sich folgende Anteile an Hybridfahrzeugen entsprechend der obigen Verkaufszahlen und Schätzungen:

Tabelle 4-5: Verkaufszahlen und Prognose des Absatzes von Hybridfahrzeugen.

Jahr	Gesamtproduktion Pkw	Hybrid-Fahrzeuge	Anteil	Quellen
2004	44.000.000	90.000	0,20 %	OICA/Leoni
2005	47.000.000	192.000	0,41 %	OICA/Marklines
2006	50.000.000	600.000	1,20 %	OICA/Focus
2008	55.000.000	509.000	0,93 %	eigen.Berechn./Marklines
2008	55.000.000	779.000	1,42 %	eigen.Berechn./Leoni
2010	58.032.000	1.500.000	2,58 %	eigen.Berechn./Focus
2013	63.543.000	4.500.000	7,08 %	eigen.Berechn./Leoni
2025	91.338.000	16.200.000	17,74 %	eigen. Berechn./Berger 2007
2030	106.246.000	8.600.000	8,09 %	eigen. Berechn./IEA 2007

Quellen und Anmerkungen: eigene Berechnung auf Basis der Daten von OICA, Leoni, Marklines, Fokus und VDI.

Als zweites müssen verschiedene Annahmen über die Entwicklung des Anteils von Hybrid-Fahrzeugen an der Neuproduktion getroffen werden. Wie in Tabelle 4-5 dargestellt, liegen die Anteile der Hybridfahrzeuge innerhalb einer Spanne von 0,9 und 1,4 % bei unterschiedlichen Quellen für die Jahre 2004 bis 2008. Zukünftige Prognosen weisen Spannen von 2,6 bis 17,7 % auf. Zur Abschätzung der Entwicklung des Verkaufs von Hybridfahrzeugen wurde für 2008 ein Marktanteil von 1,2 % angenommen. Hierauf aufbauend wurden drei Steigerungsraten angenommen: 10 %, 15 % und 26 % pro Jahr. Letztere bedeutet, dass in 2030 nur noch Hybrid-Fahrzeuge produziert werden¹².

In der folgenden Tabelle sind die geschätzten Werte für die Pkw-Neuproduktion sowie die verschiedenen Anteile der Hybridfahrzeuge bei unterschiedlichen Steigerungsraten aufgeführt:

Tabelle 4-6: Geschätzte globale Pkw-Produktion und Absatzprognose für Hybridfahrzeuge

Jahr	Pkw Neuproduktion	Hybrid-Fahrzeuge (10% Steigerung p.a.)	Hybrid-Fahrzeuge (15% Steigerung p.a.)	Hybrid-Fahrzeuge (26% Steigerung p.a.)
2006	50.000.000	600.000		
2007	53.000.000	636.000		
2008	54.627.077	655.525	655.525	655.525
2009	56.304.106	721.077	753.854	826.097
2010	58.032.618	793.185	866.932	1.041.054
2020	78.522.322	2.057.318	3.507.222	10.517.044
2030	106.246.370	5.336.153	14.188.670	106.246.370

Quelle und Anmerkung: eigene Berechnungen. Die Steigerung von 26 % wurde angenommen, um die Pkw-Produktion dem Szenario der Vereinten Nationen anzupassen, das von einem Bestand von 1,5 Mrd. Fahrzeugen in 2030 ausgeht.

Es ist nicht leicht ersichtlich, inwieweit die deutschen Fahrzeughersteller unmittelbar oder mittelbar von der Versorgung mit den Rohstoffen Kupfer und Seltene Erden betroffen sind. Aufgrund der globalen Vernetzung findet die Wertschöpfung nicht nur in Deutschland statt. Derzeit sind in Deutschland sowohl große Pkw-Produzenten angesiedelt als auch Bauteilhersteller wie Continental und ZF-Getriebe, die die wesentlichen

¹² Auch Brennstoffzellenfahrzeuge werden mit Elektromotoren betrieben, weshalb diese Annahme plausibel ist. Allerdings werden vermutlich bei rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen stärkere Elektromotoren mit höherem Kupferanteil notwendig sein. Diese Annahme wird aber durch einen oberen Wert des Kupferanteils in der Abschätzung des Ressourcenbedarfes abgedeckt.

Hybridbauteile liefern. Auch werden in Deutschland im großen Umfange Hochleistungsmagnete hergestellt.

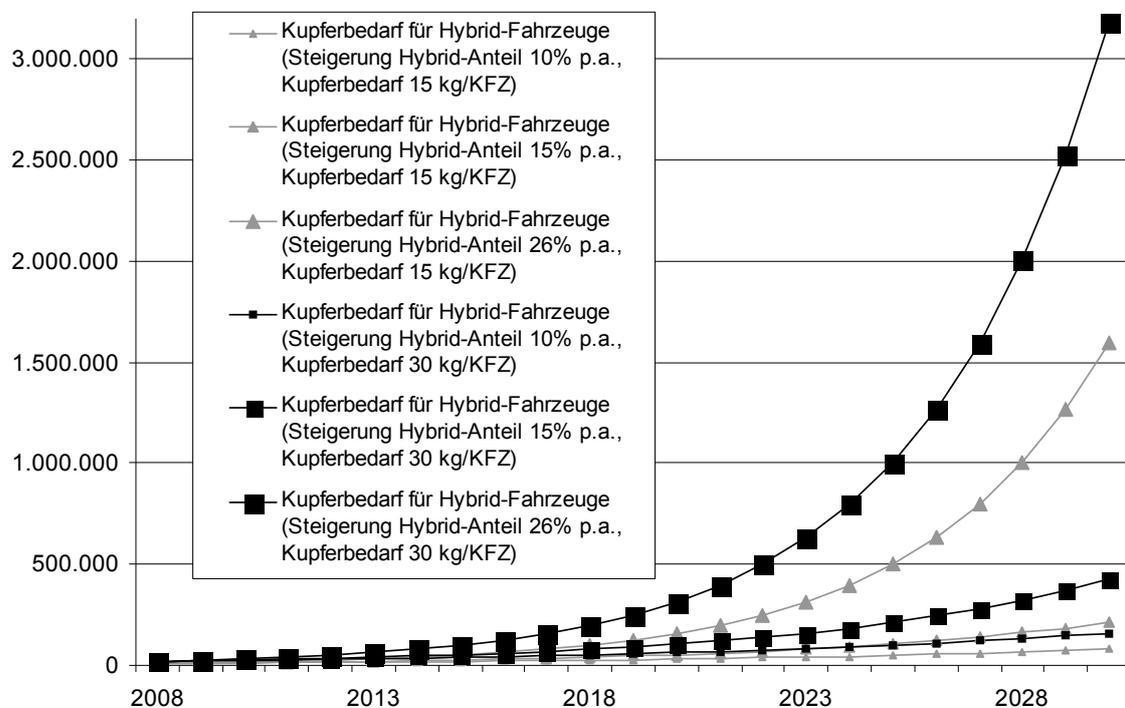
4.2.4 Foresight Rohstoffbedarf

Eine Prognose der Anwendung der Hybrid-Technologie wird vor allem dadurch erschwert, dass es sehr unterschiedliche Konzepte mit starken Auswirkungen auf den Kupferbedarf gibt. Letztendlich sind auch die Pkw-Produktion bis 2030 sowie der Anteil von Hybrid-Fahrzeugen unsicher. Um dennoch eine erste Einschätzung vor allem für den Kupferbedarf zu treffen, werden die folgenden Annahmen gesetzt:

- ▶ Die Prognose des Absatzes von Hybrid-Fahrzeugen wird entsprechend obiger Annahmen getroffen (vgl. Tabelle 4-6).
- ▶ Der erhöhte Kupferbedarf für Hybridfahrzeuge wird in zwei Varianten auf 15 kg (ein Elektromotor unter Berücksichtigung der effizienteren Kupfernutzung) und 30 kg (zwei Elektromotoren oder stärkerer Elektromotor bei Brennstoffzellenantrieb, vgl. a. Tabelle 4-2) geschätzt.

Unter diesen Annahmen ergibt sich die folgende Entwicklung des Kupferbedarfs:

Abbildung 4-5: Entwicklung des Kupferbedarfs für Hybrid-Fahrzeuge in t unter variablen Annahmen



Quelle: eigene Berechnungen

Sofern es nur eine geringe Steigerung des Verkaufsanteils an Hybrid-Fahrzeugen gibt, würde sich der Kupferbedarf bei einer zusätzlichen Kupfermenge von 15 kg auf ca. 80.000 t in 2030, bei einer zusätzlichen Kupfermenge von 30 kg auf ca. 160.000 t belaufen. Angesichts einer Produktionsmenge von 15,6 Mio. t in 2007 wären dies nur ca. 0,5 bzw. 1 % der Weltjahres-Kupferproduktion.

Es ist zu vermuten, dass mit zunehmender Verbreitung des Gedankens der Notwendigkeit des Klimaschutzes, der Kosteneffizienz der Hybrid-Fahrzeugproduktion, der Ausweitung des Angebotes an Hybrid-Fahrzeugen und eines sicher bis 2030 noch steigenden Benzinpreises höhere Steigerungsraten vorliegen werden. In der mittleren Steigerung von 15 % würde sich der zusätzliche Kupferbedarf auf ca. 212.000 bzw. 425.000 t Kupfer belaufen. Dies wären ca. 1,4 bzw. 2,7 % der Weltjahresproduktion an Kupfer in 2007. Unter der Annahme der 15-prozentigen Steigerung würden dann im Jahre 2030 immerhin 25 % aller Neufahrzeuge Hybrid-Fahrzeuge sein.

Als dritte Variante wurde eine Steigerung von 26 % angenommen. Dies bedeutet, dass in 2030 nur noch Hybridfahrzeuge ausgeliefert werden. Allerdings könnte dies bei einer Annahme von 30 kg Kupfer pro Fahrzeug auch bedeuten, dass nur Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb und einem sehr starken Elektromotor verwendet werden würden. Bei der Berechnung mit 15 kg Kupfer pro Fahrzeug würden in 2030 ca. 1,59 Mio. t Kupfer für ca. 100 Mio. neue Hybrid-Fahrzeuge verbraucht. Dies würde ca. 10 % der Weltjahresproduktion von 2007 an Kupfer entsprechen. Bei der Annahme von 30 kg Kupfer nur für den Hybrid-Antrieb würden ca. 3,19 Mio. t Kupfer bzw. 20 % der Weltjahresproduktion von Kupfer in 2007 genutzt¹³.

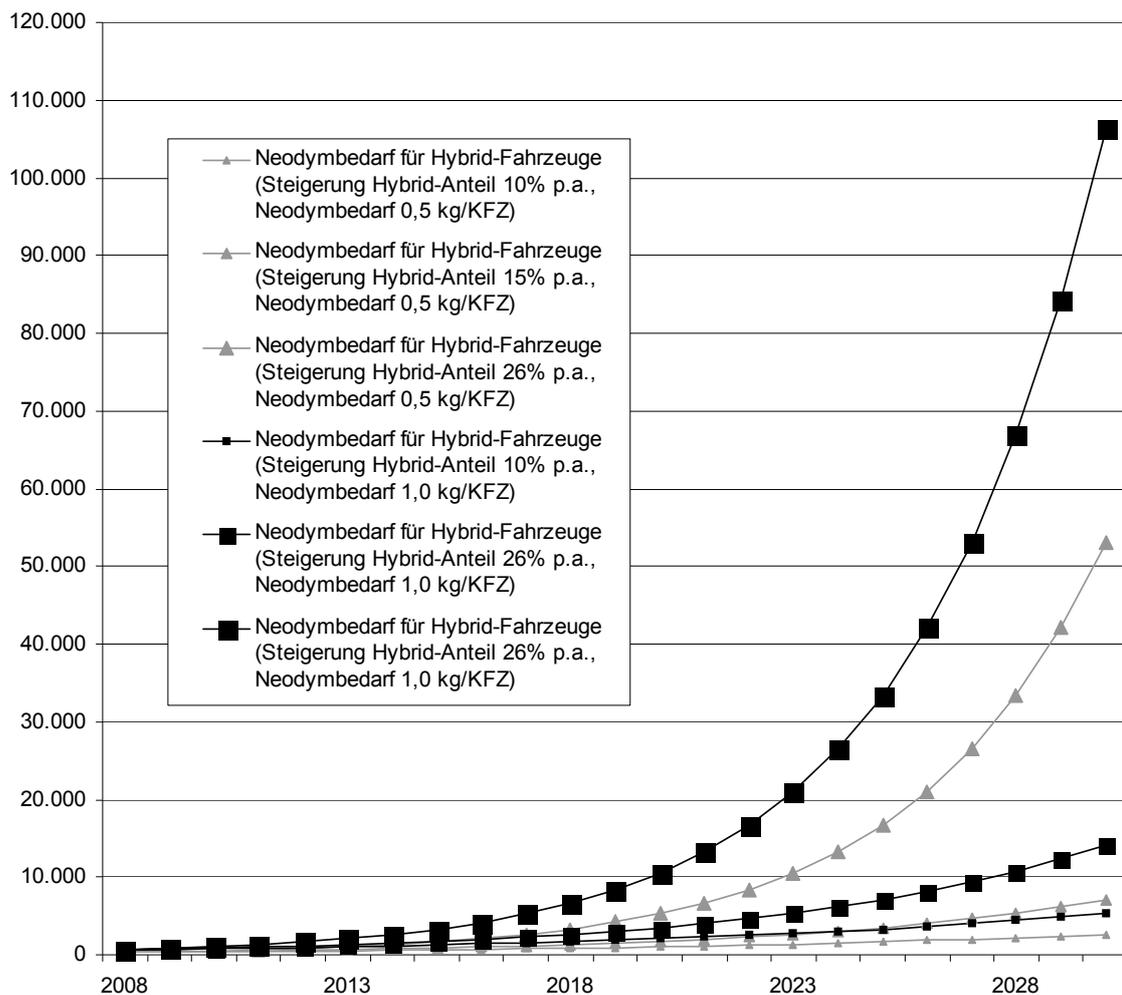
Wesentlich relevanter könnte der Bedarf an Permanentmagneten mit Neodym oder Samarium sein (vgl. Kapitel 4.32). Allerdings liegen keine Informationen vor, in welchem Umfange diese in Hybrid-Fahrzeugen eingesetzt werden. Eine Annahme von 0,5 kg für die Magnete als untere Grenze bzw. 1,0 kg als obere Grenze erscheint jedoch plausibel. Legt man analog der Steigerung der Kfz-Produktion und der Entwicklung des Hybrid-Anteils diese Werte zugrunde, so würde sich der Bedarf für Neodym¹⁴ entsprechend Tabelle 4-2 entwickeln. In 2030 könnte der Bedarf an Neodym bei ca. 2.700 t liegen (0,5 kg pro Fahrzeug bei 10 % Steigerung des Produktionsanteils für Hybrid-

¹³ Unter Berücksichtigung des übrigen Kupferbedarfs in Fahrzeugen für alle anderen elektrischen Anwendungen wirkt sich dies sehr deutlich auf die Kupfernachfrage aus. Würden in einem durchschnittlichen Pkw nur insgesamt 50 kg Kupfer verwendet für Hybrid-Antrieb sowie die weitere Elektrik und Elektronik, so wären dies bei 100 Mio. Fahrzeugen ca. 5 Mio. t Kupfer. Anders gesagt: ca. 30 % der Weltjahresproduktion von Kupfer würden in die Kfz-Neuproduktion fließen.

¹⁴ Bzw. ggf. analog Samarium.

Fahrzeuge). Würden in 2030 nur noch Hybrid-Fahrzeuge produziert werden (26 % jährliche Steigerung), so wäre der Bedarf bei 53.000 t an Neodym. Wesentlich höhere Zahlen ergeben sich, wenn der Neodym-Anteil in den Elektromotoren höher liegen würde. Hierbei ist zu bedenken, dass die Neodym-Produktion des Reinmetalls derzeit bei 7.300 t/a liegt.

Abbildung 4-6: Entwicklung des Neodymbedarfs für Hybrid-Fahrzeuge in t unter variablen Annahmen.



Quelle: eigene Berechnungen

Vergleicht man die Bedarfe für Kupfer und Neodym, so sind eindeutig höhere Sensibilitäten beim Neodym festzustellen. Selbst bei geringeren Neodym-Anteilen in den Magneten und geringeren Wachstumsraten für Hybridfahrzeuge müssten die Produktionskapazitäten für Neodym mindestens verdoppelt werden. Bei Bedarfen von 1 kg Neodym und/oder bei höheren Steigerungsraten müssten die Produktionskapazitäten vervielfacht werden.

Die nachfolgende Tabelle fasst die wahrscheinlichsten Kupfer- und Neodymbedarfe durch Hybridmotoren zusammen.

Tabelle 4-7: Globaler Rohstoffbedarf für Hybridfahrzeuge in t

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030
Kupfer	15.100.000	9.000	213.000
Neodym	7.300	300	7.100

Die Abschätzungen zeigen trotz der Unsicherheiten auf, dass sich mit zunehmendem Absatz von Hybrid-Fahrzeugen wesentliche Auswirkungen auf die Stoffströme von Kupfer und Neodym ergeben werden.

Auf Elektrische Traktionsmotoren entfällt in der Basisprojektion rund $\frac{1}{4}$ des gesamten Neodymbedarfs für Hochleistungs-Permanentmagnete im Jahr 2030. Eine Abschätzung des gesamten Neodym-Bedarfs für Hochleistungs-Permanentmagnete wird in Kapitel 4.32 vorgenommen.

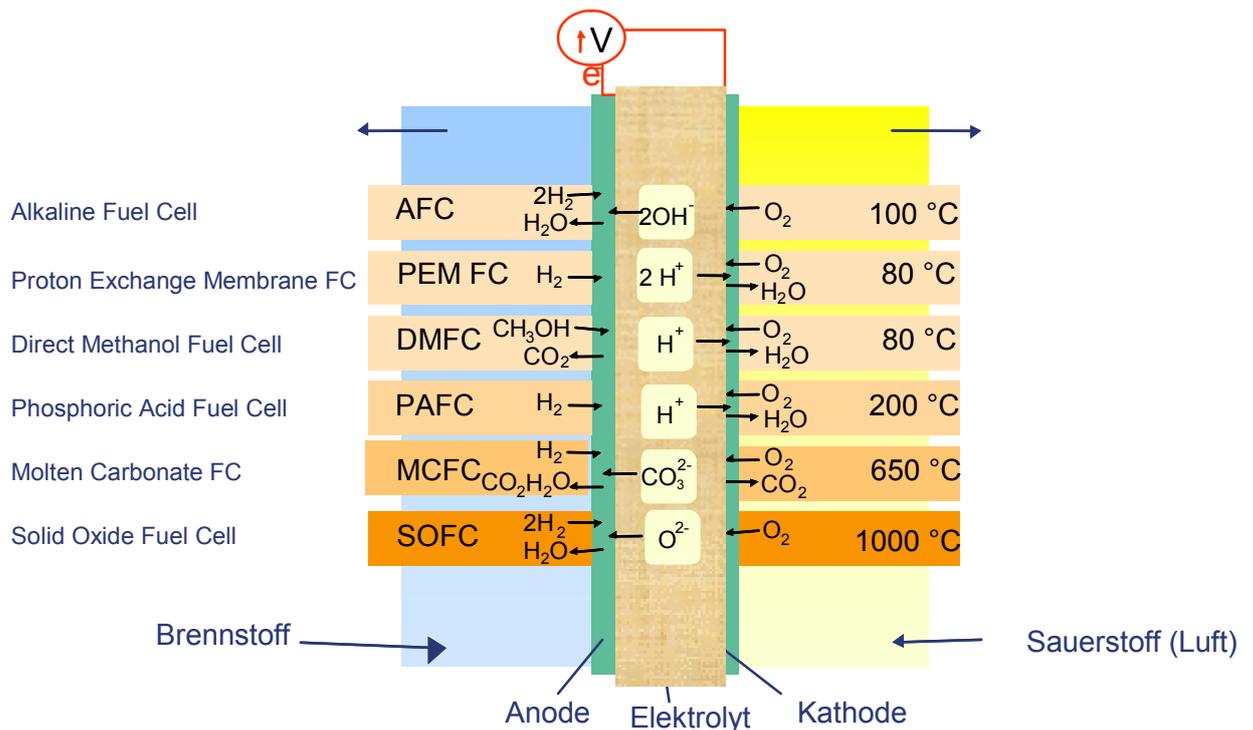
4.3 Brennstoffzellen Elektrofahrzeuge

4.3.1 Technologiebeschreibung

Die Brennstoffzellen-Technologie hat in den letzten 15 Jahren eine neue Welle von Forschung und Entwicklung erfahren, führende Automobilfirmen Serienfahrzeugen für das Jahr 2004 angekündigt hatten. Der Markteintritt für mobile und stationäre Brennstoffzellen wurde zwischenzeitlich auf 2015 verschoben. Einzelne Firmen bieten aber 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 Abbildung 4-7. Weitere Einteilungen erfolgen über die Arbeitstemperatur (Tief- und Hochtemperaturbrennstoffzellen) und ihre Anwendung (stationär, portabel oder mobil).

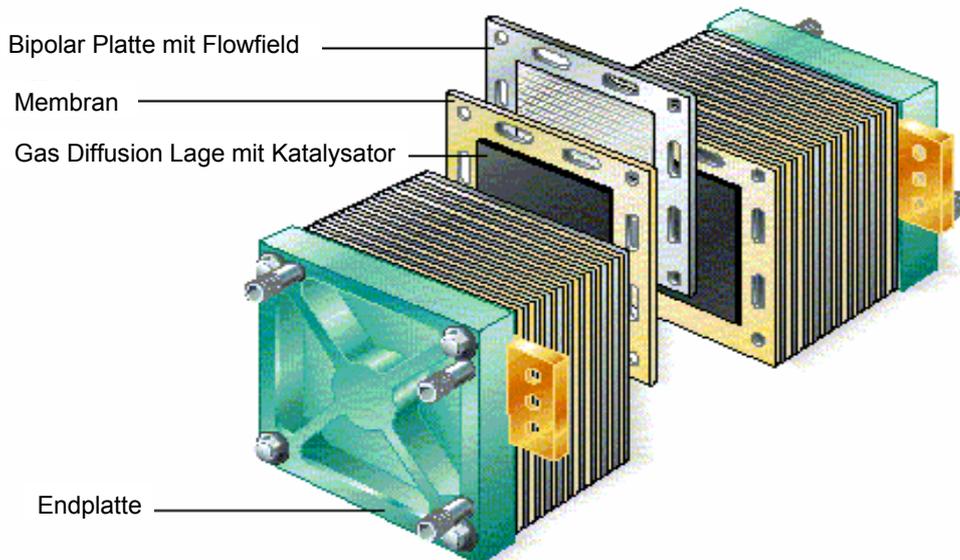
Abbildung 4-7: Funktionsprinzip von Brennstoffzellen



Quelle: Ledjeff-Hey

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 Abbildung 4-8.

Abbildung 4-8: Aufbau einer Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle (PEM)

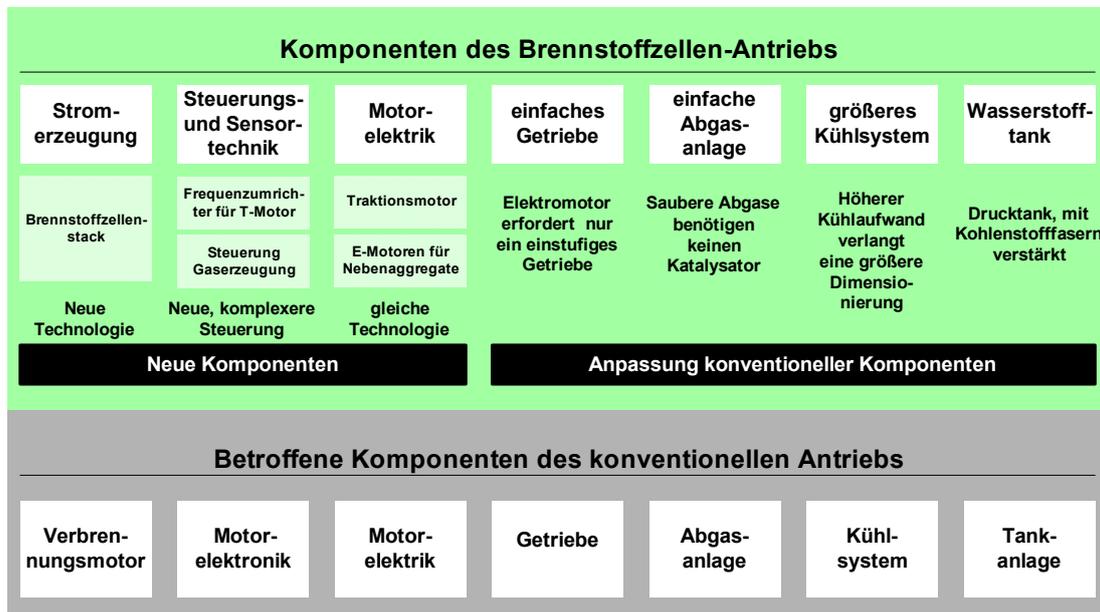


Quelle: Celanese

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

In der Abbildung 4-9 werden die Komponenten eines Brennstoffzellenantriebs denen eines Verbrennungsmotors gegenübergestellt. Beim konventionellen Antriebsstrang entfallen der Verbrennungsmotor und seine Elektrik und Elektronik. Angepasst werden müssen vor allem der Tank, aber auch Getriebe, Abgasanlage und Kühlsystem (Wengel et Schirmeister 2000).

Abbildung 4-9: Änderung bei den Komponenten des Antriebsstranges



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. Als Katalysator wird in der Regel kohlegetragertes Platin verwendet. In den letzten Jahren ist es gelungen, die notwendigen Edelmetallgehalte auf ca. 0,5 mg/cm² zu senken, wobei die Beladung der Kathode mit ca. 0,4 mg/cm² größer ist als bei der Anode. Für derzeit ca. 1 A pro cm² bei 0,65 V ergibt sich ein Verbrauch von 0,8 g Platin pro kW Leistung in PEMs (ICT, 2008). In der Literatur finden sich auch deutlich geringere Werte, wie z. B. 0,05 mg/cm² als Platinbedarf der Anode und 0,1 mg/cm² für die Katode (IUTA 2007).

Von Bedeutung ist 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 wird aus Kosten- und Gewichtseinsparung nicht mit Permanentmagneten gebaut sondern in der Regel als Reluktanzmotor ausgeführt, bei dem der Rotor aus einem weichmagnetischen Material wie z. B. Eisen besteht und der Stator die Magnetspulen enthält. Die Menge an Kupfer für einen 50 kW Motor wird auf ca. 30 kg geschätzt, dreimal höher als bei Hybridfahrzeugen (European Copper Institute 2004).

Der elektrische Leistungsbedarf von Fahrzeugen nimmt infolge des zunehmenden Einsatzes von Elektromotoren stetig zu. Neuere Entwicklungen deuten auf eine weitere Erhöhung des elektrischen Leistungsbedarfs und Kupferverbrauchs durch so genannte "by-wire-Lösungen" auch bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren 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 können den Einsatz solcher "by-wire-Lösungen" begünstigen (Wengel, Schirrmeyer 2000; Kaiser et al., 2008).

Tabelle 4-8: Angaben zu ausgewählten Metallen beim Brennstoffzellen-Antriebsstrang

	pro kW Leistung	pro Fahrzeug mit 50 kW Leistung
Platin	0,8 g	38,5 g
Kupfer	-	30 kg

4.3.3 Foresight industrielle Nutzung

Derzeit erlebt die Entwicklung der PEM-Brennstoffzellenfahrzeuge eine Phase der Ernüchterung, nachdem Leistungs- und Kostenziele nicht so schnell erreicht werden konnten wie geplant. Daher entwickelt die Automobilindustrie zurzeit verstärkt Hybridfahrzeuge, wobei japanische Firmen eine Vorreiterrolle einnehmen. Ob und inwieweit reine Elektrofahrzeuge 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, Wasserstoffwirtschaft uvm.).

4.3.3.1 Szenario für Brennstoffzellenfahrzeuge

Die zurzeit umfangreichste Abschätzung zum Marktanteil von Brennstoffzellenfahrzeugen liegt von der IEA vor (IEA 2005). Diese geht von einer kumulierten Weltproduktion von 8,6 Mio. Brennstoffzellenfahrzeugen im Jahre 2030 aus. Davon entfallen nach der IEA-Schätzung auf die OECD-Länder ein Anteil von 5 % bei den Neuwagenverkäufen und ein Anteil von 2,2 % beim Bestand an Brennstoffzellenfahrzeugen, beides bezogen auf das Jahr 2030. Geht man von einer mittleren Leistung von 50 kW pro Brennstoffzellenfahrzeug aus, so ergibt sich für das Jahr 2030 eine installierte Leistung von 430 GW.

4.3.3.2 Andere PEM-Brennstoffzellenmärkte

Gemessen an dem mobilen Sektor sind andere Anwendungen von PEM-Brennstoffzellen wie die stationäre Hausenergieversorgung oder portable Stromversorgung von 4C Geräten zwar ökonomisch und für die Markteinführung von Brennstoffzellen interessant, aber relativ unbedeutend in Ihrer installierten Leistung.

4.3.4 Foresight Rohstoffbedarf

Ausgehend von den oben genannten Zahlen von 0,8 g Platin pro 1 kW und 430 GW in Fahrzeugen installierte Leistung im Jahr 2030 ergibt sich ein zukünftiger Bedarf von 344 t. Grundsätzlich kann man auch zukünftig von einer weitergehenden Reduktion des Platineinsatzes pro cm² in der Zelle ausgehen, da er sich in den letzten 10 Jahren von ca. 1 auf 0,4 mg/cm² reduziert hat. Dennoch zeigt sich hier eine offene Schere zwischen Produktion und Bedarf, die sich durch strengere Emissionsnormen und Einführung des Dreiwegekatalysators weltweit noch vergrößert (Schade et al. 2007).

Das notwendige Kupferinventar im Jahr 2030 in Traktionsmotoren für Brennstoffzellenfahrzeuge beträgt hingegen nur 1,7 % der heutigen Produktion, vergleiche Tabelle 4-9.

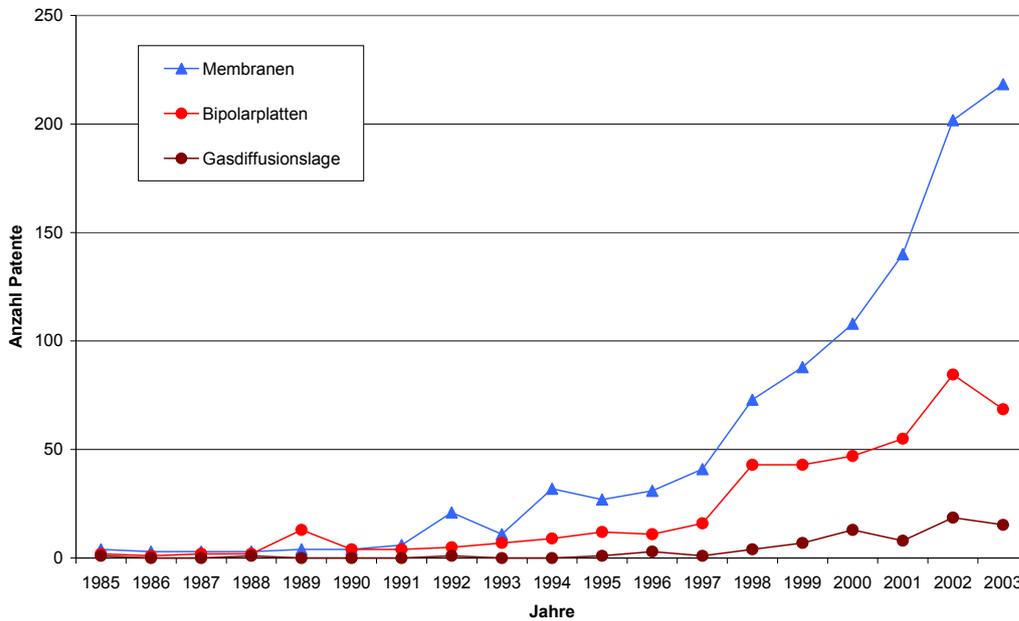
Tabelle 4-9: Globaler Rohstoffbedarf für Brennstoffzellenfahrzeuge in t pro Jahr

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch BZ- Fahrzeuge 2006	Bedarfsvorschau 2030
Platin	221	> 0	344
Kupfer	15.100.000	> 0	258.000

An den Recyclingverfahren für PEM-Brennstoffzellen wird derzeit noch gearbeitet, erste Konzepte liegen aber schon vor (Hagelücken et al 2004; IUTA 2007). Rückgewinnungsraten beim Recycling von Edelmetallen liegen bei heute bekannten Anwendungen bei mehr als 97 % (Hassan 2001).

Die Entwicklung der Komponenten der PEM-Brennstoffzellen ist noch stark im Fluss, wie aus den steigenden Patentanmeldungen weltweit ersichtlich ist, vergleiche Abbildung 4-10. Gerade die Kernkomponente Membran wird stark beforscht mit hohen Patentzuwächsen in den letzten Jahren (Jochem et al. 2007). Es ist noch nicht abzusehen, wieweit der Edelmetallgehalt reduziert werden kann bzw. inwieweit binäre oder ternäre Katalysatorsysteme Platin substituieren können.

Abbildung 4-10: Weltweite Patentanmeldungen zu Komponenten der PEM-Brennstoffzelle



Auf der anderen Seite ist die weltweite Entwicklung im mobilen Sektor ebenfalls schwierig einzuschätzen, da sich hier Low-cost Autos einerseits und High-tech Fahrzeuge mit elektronischen Fahrer-Assistenz- und Sicherheitssystemen andererseits gegenüber stehen. Bis 2030 ist auch unklar, inwieweit der Übergang vom Mineralöl zu nachwachsenden Kraftstoffen gelingt.

4.4 Superkondensatoren für Kraftfahrzeuge

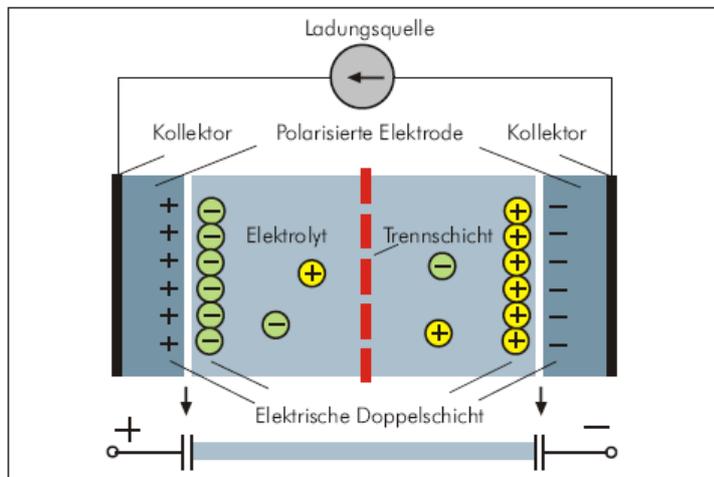
4.4.1 Technologiebeschreibung

Superkondensatoren oder genauer Doppelschichtkondensatoren (EDLC = electrochemical double layer capacitor), auch Super- oder Ultra-Capacitors (Supercaps oder Ultracaps), 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, vergleiche Abbildung 4-11. Wichtig ist dabei auch eine extrem große Elektrodenfläche, weshalb v. a. Aktivkohle aufgrund seines großen Porenvolumens als Elektrode verwendet wird. Es werden auch Kohlenstoff-Aerogele mit größerer spezifischer Oberfläche eingesetzt (Fischle 2005).

Als Elektrolyt dienen zumeist organische Lösungen aus speziellen quaternären Salzen mit einer Dissoziationsspannung von über 2,5 V oder auch wässrige Lösungen¹⁵ mit Kalilauge (KOH) oder Schwefelsäure (H₂SO₄) mit einer Dissoziationsspannung von 1,2 V. Diese Elektrolyte sind im Gegensatz zu konventionellen Kondensatoren ionen- 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 Doppelschicht-Kondensator wie konventionelle Kondensatoren als Wickel aufgebaut ist. Bei organischen Elektrolyten werden hierzu Kunststoffe wie Polypropylen, Polyester, Polystyrol oder Teflon verwendet und bei wässrigen Elektrolyten Glasfasern oder Keramiken. Kapazitäten und Betriebsspannungen lassen sich durch Parallel- bzw. Reihenschaltung mehrerer Zellen vergrößern.

¹⁵ Wird von den Firmen ESMA (RU), Elit (RU), Evan Capacitor (USA), Skeleton Technologies (CH) und Tavrira (CA) verfolgt (Frost & Sullivan, 2003).

Abbildung 4-11: Funktionsprinzip eines elektrischen Doppelschicht-Kondensators



Quelle: Fischle, 2005

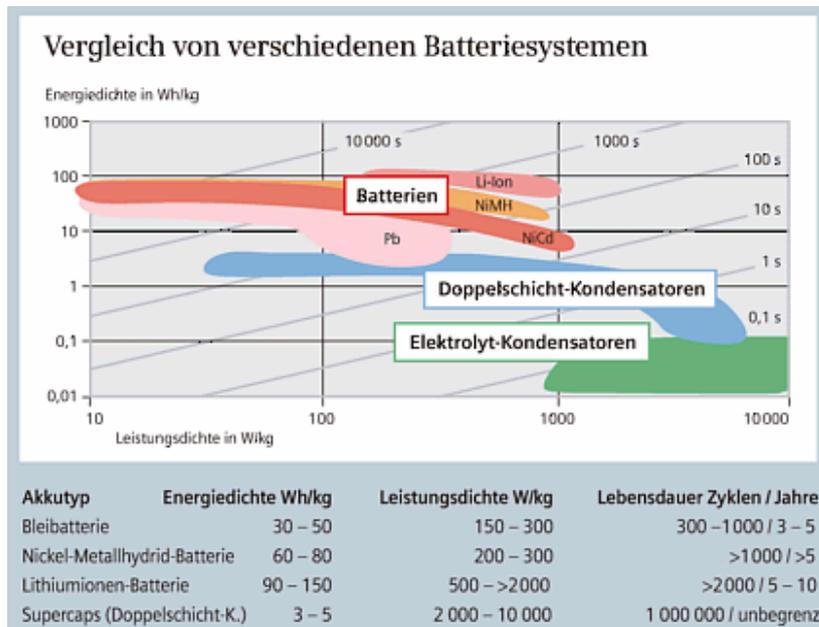
Abbildung 4-12: Bauformen von Doppelschicht-Kondensatoren und Modulen



Quelle: WIMA

Ein EDLC mit einer spezifischen Kapazität von 100 F hat schon eine Elektrodenoberfläche von etwa 1 km². 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 Angström.

Abbildung 4-13: Energie- und Leistungsdichte von Batteriesystemen



Quelle: Siemens

Doppelschichtkondensatoren haben eine längere Lebensdauer durch ihre mögliche Zyklenzahl bis zu 1 Mio. Mal und können sehr schnell entladen und aufgeladen werden. Bei Akkus und Batterien wäre das nur unter großem Leistungsabfall möglich. Das beruht darauf, dass Akkus 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 Hochleistungs-Kondensatoren ist nahezu wartungsfrei. Supercaps füllen die Lücke in der Energiedichte zwischen Batteriesystemen und herkömmlichen Kondensatoren, vergleiche Abbildung 4-13. Durch seine extrem hohe Leistungsdichte kann ein Doppelschicht-Kondensator vor allem Systeme puffern, die kurzzeitig einen hohen Strom abgeben oder benötigen, wie zum Beispiel beim Bremsen eines Autos: die Bremsenergie kann gespeichert und kurz später wieder zum Anfahren verwendet werden. Der Einsatz im Personenwagen hängt aber stark von den Kosten des Kondensators ab (Kötz et al. 2005).

4.4.2 Rohstoffinhalt

Die kommerziell erhältlichen Doppelschicht-Kondensatoren 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, Glasfaserverwerkstoffe oder dünnes Gewebe auf Cellulose-Basis.

Für einen Doppelschicht-Kondensator 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 1000 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 Supercaps aber noch preiswerter werden und auch Energie- und Leistungsdaten erhöht werden. Supercaps stehen immer in Konkurrenz zu Batterien, die in der Zukunft auch höhere Leistungsdichten bei deutlich höherer Energiedichte aufweisen werden. Daher stellte auch der in Europa führende Hersteller passiver Bauelemente Epcos im März 2007 die Produktion seiner "UltraCaps" ein. Die Herstellung war wirtschaftlich nicht mehr rentabel. Die Kondensatoren sollten in Antriebstechnologien verwendet werden, aber entsprechende Testprojekte waren zu kosten- und zeitintensiv.

4.4.4 Foresight Rohstoffbedarf

Bei Kosten von 10.000 – 20.000 €/kWh und einem Weltmarkt für 2006 von ca. 20,5 Millionen \$ im Fahrzeugbereich (Frost 2003) ergibt sich ein Aluminiuminventar von 68 Tonnen. Mit den ebenfalls in der genannten Studie abgeschätzten Wachstumsraten von ca. 40 % ergibt sich für 2030 ein potenzieller Aluminiumbedarf von ca. 350 kt und erreicht damit keine kritischen Bedarfswerte.

Tabelle 4-10: Globaler Rohstoffbedarf für SuperCaps für Fahrzeuge in t

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030
Aluminium	33.700.000	68	350.000

Im Vergleich zu Batterien sind Supercaps besser zu recyceln, da sie keine giftigen Materialien enthalten. Derzeit findet aber noch kein Recycling von Aluminium oder Elektrolyten statt.

4.5 Scandium-Legierungen für den Airframe Leichtbau

4.5.1 Technologiebeschreibung

Scandium erhöht als Legierungselement von Aluminium dessen Festigkeit. Darüber hinaus verringert Scandium in Al-Sc-Legierungen die Korngröße, was wichtig für das Walzen und Schweißen ist. Diese Eigenschaften machen Al-Sc-Legierungen zu einem potenziell geeigneten Werkstoff für den Luftfahrzeugbau.

Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit des Scandiums sind Al-Sc-Legierungen bisher vorwiegend für den Bau militärischer Luftfahrzeuge verwendet worden. Angesichts steigenden Kostendrucks und wachsender Bedeutung des Klimaschutzes sind Al-Sc-Legierungen eine aussichtsreiche Option für den Leichtbau in der zivilen Luftfahrt:

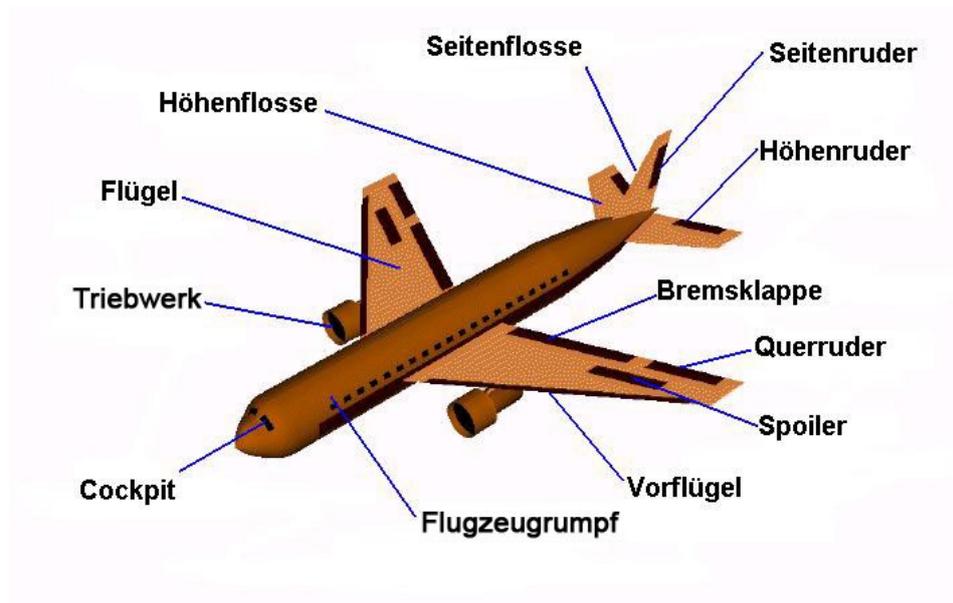
- ▶ Flugzeugflügel, die aus Al-Sc-Legierungen hergestellt werden müssen nicht lackiert werden. Das führt zu einer 1 – 2-prozentigen Gewichtseinsparung bezogen auf das gesamte Flugzeuggewicht.
- ▶ Zwar ist Scandium sehr teuer, bei einer systemischen Betrachtung sind Al-Sc-Legierungen jedoch um 15 % billiger als heutige Flugzeugwerkstoffe, da sie nicht genietet werden müssen, sondern mit Lasern geschweißt werden können (Eaglefield 2005)¹⁶.

Es wird deshalb angedacht, Al-Sc Bleche im neuen Airbus A 350 einzusetzen (DGM 2006; Eaglefield 2005; Røyset 2008; Røyset et al. 2005; Smolej et al. 2002; Walter 2008). Für Al-Sc-Legierungen eignen sich insbesondere der Flugzeugrumpf sowie das Tragflächenmittelstück und das Querruder (vgl. Abbildung 4-14).

Weil Scandium eine höhere Löslichkeit in Aluminium als andere Seltene Erdmetalle besitzt, führt das zu erhöhter Stärke, Belastbarkeit und einer besseren Kontrolle über die Mikrostrukturen. Wird Scandium zu Aluminiumlegierungen hinzugefügt, erhöht es die Streckfestigkeit dieser Legierungen (Al-Mg, Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu) und reduziert die Korngröße deutlich (vgl. Abbildung 4-15). Von allen Legierungselementen erhöht Scandium, wenn es Aluminium zugesetzt wird, die Festigkeit pro Atomprozent am meisten (Raade 2003). Außer der geringeren Korngröße und der höheren Festigkeit weisen Aluminium-Scandium-Legierungen noch eine erhöhte Resistenz gegen Kristallbildung und gegen Warmrissbildung auf (Scandium Information Center 2008).

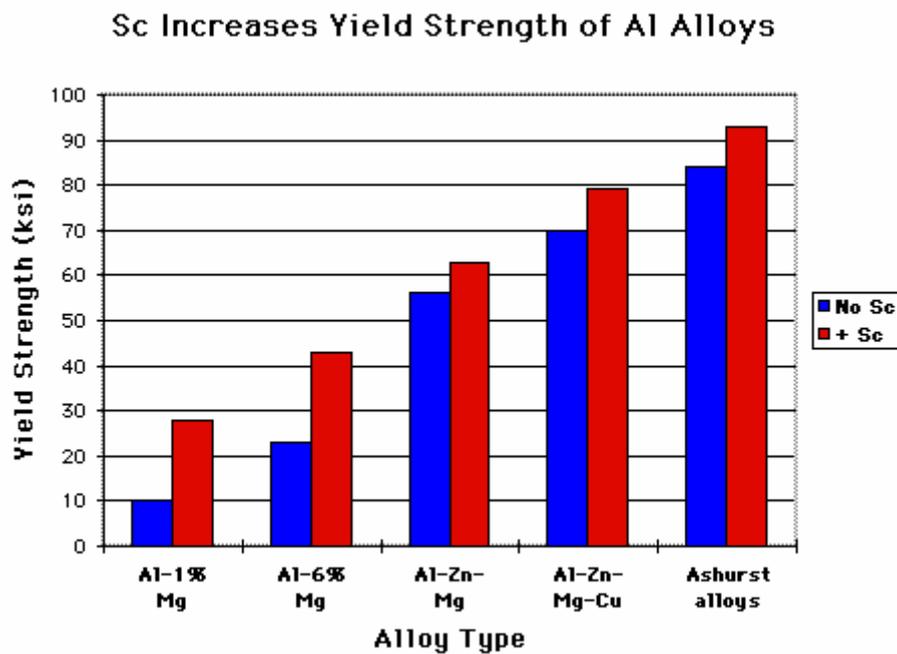
¹⁶ Andere Forschungsrichtungen konzentrieren sich darauf, Drähte für Schweißverbindungen aus einer Aluminium-Scandium-Legierung herzustellen.

Abbildung 4-14: Hauptkomponenten eines Flugzeugs (schematisch)



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 4-15: Erhöhte Streckfestigkeit durch Scandium in Kiloquadratzoll



Quelle: Scandium Information Center 2008

4.5.2 Rohstoffinhalt

Im TANGO-Projekt des EU-Growth-Programms wurden zahlreiche neue Konstruktionswerkstoffe für den Flugzeugbau untersucht. Dazu gehörten Aluminium-Lithium-Legierungen, Aluminium-Magnesium-Scandium-Legierungen, Faser-Metall-Lamine und neue Karbonfaser-Verstärkungen.

Tabelle 4-11 gibt die Gewichtsprozentanteile von einzelnen Materialien einer Al-Mg-Sc-Legierung von Airbus an.

Tabelle 4-11: Anteil von Materialien in einer Al-Mg-Sc-Legierung

Rohstoff	Anteil [gew.-%]
Scandium	0,2 – 0,26
Magnesium	4,9
Mangan	0,1 – 0,5
Zirkon	0,1
Aluminium	Rest

Quelle: Walter 2008

Angaben zum Rohstoffinhalt von Al-Sc-Legierungen sind nicht verfügbar. Der Bedarf dieser Legierungen für die Luft- und Raumfahrt ist aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums nicht abschätzbar.

4.5.3 Foresight industrielle Nutzung

Der vielversprechendste Scandium-Markt der Zukunft ist der kommerzielle Flugzeugbau (Eaglefield 2005). Die Al-Mg-Sc-Legierung soll beim Airbus A 350 in Zukunft eingesetzt werden. Die Legierung ist für den Flugzeugbau qualifiziert worden. Sie eignet sich als Blech für Strukturbauteile des Flugzeugs – vor allem für die Bauteile, die besonders schlag- bzw. korrosionsresistent sein müssen (Nase, Verblendung der Flügel, Landeklappen, Höhen- und Seitenleitwerke).

In der derzeitigen Designphase ist jedoch bei Airbus noch nicht entschieden worden, für welche Bauteile die Bleche eingesetzt werden. Außer Al-Sc-Legierungen eignen sich auch Composite Werkstoffe, deren Herstellung und Verarbeitung derzeit noch sehr aufwendig ist (Walter 2008).

4.5.4 Foresight Rohstoffbedarf

Wie verschiedene Untersuchungen bewiesen haben, scheinen die Materialeigenschaften von Al-Sc-Legierungen für verschiedene Konstruktionsanwendungen im Flugzeug-

bau geeignet zu sein. Es ist derzeit jedoch noch nicht möglich, den Rohstoffbedarf abzuschätzen, da noch nicht entschieden ist, welche Bauteile aus Al-Sc-Legierungen gefertigt werden.

Der hohe Preis von Scandium (ja nach Reinheitsgrad zwischen 700 und 2.100 \$/kg (USGS 2007) scheint eine Hürde für den Einsatz von Al-Sc-Legierungen zu sein. Die Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit von Scandium sind aber wichtigere Kriterien bei der Materialwahl als der Preis. Airbus verlässt sich auf einen Lieferanten für die Al-Sc-Legierung.

Wie bei vielen Funktionsmaterialien besteht auch bei Scandium das Grundsatzdilemma (Patt Situation), dass die Produktionskapazität gering, die Verfügbarkeit schlecht (single source) und der Wettbewerb gering ist, die Ressourcen aber nicht erschlossen werden, weil der Lieferant keine Sicherheit über die Nachfrage hat. Keiner von beiden entschließt sich also, die Nachfrage zu garantieren bzw. die Kapazität zu erhöhen (Walter 2008).

Informations- und Kommunikationstechnik, optische Technologien, Mikrotechniken

4.6 Bleifreie Lote

4.6.1 Technologiebeschreibung

Als Löten bezeichnet man eine Verbindungstechnik von Metallen, wenn der Schmelzpunkt der flüssigen Phase niedriger ist als jener der zu verbindenden Metalle. Dies unterscheidet das Löten vom Schweißen. Lote sind Metalllegierungen mit niedrigem Schmelzpunkt. Liegt die Schmelztemperatur des Lotes über 450 °C spricht man von Hartloten, darunter von Weichloten. Mit Hartloten verbunden werden beispielsweise Kupferrohre, Kupfer- und Messingfittings in der sanitären Hausinstallation, oder in Kupferwärmetauschern. Weichlöten ist *die* zentrale Füge-technik bei elektronischen Schaltungen. Sie ermöglicht es, dauerhafte mechanische und elektrische Verbindungen herzustellen, ohne die temperaturempfindlichen elektronischen Bauteile thermisch zu überlasten. Auch in anderen Anwendungen werden Weichlote eingesetzt, beispielsweise bei Klempnerarbeiten, im Kühlerbau und für das Fügen von Aluminium. Alle diese Anwendungen erreichen jedoch nicht die wirtschaftliche Bedeutung des Lötens in der Elektronik.

Das klassische Weichlot besteht aus einer Legierung von Zinn und Blei. Metallisches Zinn ist nicht gesundheitsschädlich. So hat die Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe bisher keine Maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) für Zinn und seine anorganischen Verbindungen festgelegt. Problematisch ist dagegen der Legierungsbestandteil Blei. Blei ist in Kategorie 2 der krebserzeugenden Arbeitsstoffe eingeordnet und als krebserzeugend für den Menschen anzusehen. Blei findet sich beim Menschen im Blut, in den Weichteilen und wird in den Knochen akkumuliert. Aufnahmepfade sind vor allem die Inhalation von bleihaltigen Stäuben, wobei Feinstäube unter 10 µm in die Alveolen der Lunge und von dort in das Blut gelangen, und die Ingestion. Die Aufnahme über die Haut bei Berührung bleihaltiger Stoffe spielt dagegen keine Rolle. Bleivergiftungen führen zur Beeinträchtigung des blutbildenden Systems, zur Nierenschädigung und als Folge zu Bluthochdruck. Auch neurologische Effekte, die sich in einer verminderten Intelligenzleistung bis zur Verwirrtheit äußern, sind nachgewiesen. Es wird vermutet, dass dies 1848 für das Scheitern des Selbstrettungsversuchs der vom arktischen Eis eingeschlossenen Franklin Expedition verantwortlich war. Damals wurden die Konservendosen mit Bleilot verschlossen. In vom Permafrost konservierten Körpern von Matrosen wurden Bleivergiftungen festgestellt.

Die gesundheitliche Gefährdung durch Blei hat die Europäische Kommission veranlasst, die breite Nutzung von Blei in Weichloten für die Elektronikfertigung zu beenden. Das Bleiverbot wurde mit der Richtlinie 2002/95/EC, Directive on the Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment (RoHS), umgesetzt. Sie fordert die Mitgliedsstaaten auf, vom 1. Juli 2006 an keine elektrischen und elektronischen Geräte auf den Markt zu bringen die Blei und weitere bezeichnete Stoffe enthalten. Die RoHS-Richtlinie trägt der Unsicherheit über die Dauerhaftigkeit der zurzeit verfügbaren Ersatzstoffe Rechnung, indem sicherheitsrelevante Ausrüstungen ausgenommen werden, darunter medizinische Geräte, die Autoelektronik, die Telekommunikationsinfrastruktur, Server, Speichersysteme und der militärische Bereich.

Die wichtigsten industriellen Lötverfahren der Serienfertigung elektronischer Baugruppen sind das Wellenlöten (auch Schwalllöten) und das Reflowlöten (auch Wiederaufschmelzlöten). Das Wellenlöten wurde für Durchsteckbauteile (THT – through-hole-technology) entwickelt, kann in der Zwischenzeit aber auch für Aufsteckbauteile (SMD – surface mounted device) und gemischte Bestückungen aus beiden Technologien angewendet werden. Dabei werden zunächst am Schaltungsträger (Leiterplatte) die elektronischen Bauteile durchgesteckt, die Lötstellen auf der Rückseite mit Flussmittel bestrichen und vorgeheizt. Dann wird die bestückte Leiterplatte über ein Bad aus flüssigem Lot gezogen in dem eine Welle erzeugt wird, welche die Lötstellen benetzt. Stellen, die nicht von Lot benetzt werden sollen, sind Lot abweisend beschichtet. Der Fertigungsprozess endet mit einer kontrollierten Abkühlung. Die Löttemperatur bei konventionellen Bleiloten wird auf etwa 250 °C gehalten, bei bleifreien Loten wird mit 260 -280 °C gearbeitet.

Das Reflowlöten wird für Aufsteckbauteile (SMD) genutzt. Dabei wird an den Lötstellen des Schaltungsträgers Lötpaste aufgetragen und anschließend die elektronischen Bauteile aufgesteckt. Die klebrige Lötpaste hält die Bauteile für den Lötprozess fest. Anschließend wird die Baugruppe vorgeheizt und dann in der Reflow Zone auf Löttemperatur gebracht. Das Lötzinn der Lötpaste schmilzt auf, stellt die elektrische Verbindung her und fixiert nach dem Erstarren des Lots das Bauteil. Das Aufschmelzen des Lots kann je nach Material der Leiterplatte auf einer Heizplatte, mittels Infrarotstrahler oder mit einem Laserstrahl erfolgen. Der Laserstrahl erlaubt es, Wärme punktgenau zu übertragen und die thermische Belastung der Bauteile in Grenzen zu halten. Auch beim Reflowlöten werden heute bleifreie Lote eingesetzt.

Bleifreie Lote sind erheblich teurer als das konventionelle Bleilot. Ein bleifreies Lot der Zinn-Silber-Kupfer-Familie kostete im Mai 2006 23,17 US\$/kg, das Zinn-Blei-Lot nur 6,39 US\$/kg (IPC 2007:1).

4.6.2 Rohstoffinhalt

Konventionelle bleihaltige Lote bestehen aus der eutektischen Legierung von 63 % Zinn und 37 % Blei. Sie schmelzen bei etwa 180 °C. Die bleifreie Alternative mit der zurzeit größten praktischen Bedeutung ist die Familie der Dreistofflegierungen aus Zinn, Silber und Kupfer, die um 220 °C schmelzen. Auch die Zweistofflegierungen Zinn-Kupfer, Zinn-Silber, Zinn-Zink und Zinn-Wismut sind im Einsatz. Die niedrigste Schmelztemperatur hat das Eutektikum aus Zinn und Indium, sie liegt aber zu nahe an der Betriebstemperatur vieler Bauteile, wodurch die Zuverlässigkeit der Verbindung gefährdet wird. Zudem ist Indium extrem knapp und teurer und eine Zulegierung von 52 % deshalb ausgeschlossen. Die nächsthöhere Schmelztemperatur hat die Legierung Zinn-Wismut. Wismut verträgt sich jedoch nicht mit Blei, und das Zusammentreffen mit Blei, beispielsweise bei Reparaturen, kann nicht ausgeschlossen werden (APC 2008).

Tabelle 4-12: Bleifreie Lote (Ahrens 2004:5)

Metallgehalt als Gewichtsanteil in %	Schmelztemperatur in °C
Sn99,3Cu0,7	227
Sn96,5Ag3,5	221
Sn95,5Ag3,8Cu0,7	217 (nahe eutektisch)
Sn93,5Ag3,5Bi3	206 – 213 (nicht eutektisch)
Sn91Zn9	198,5
Sn42Bi58	138
Sn48In52	118

Die Dauerhaftigkeit bleifreier Lote ist noch nicht abschließend geklärt. Probleme könnten dauerhaft tiefe Betriebstemperaturen bereiten, weil unterhalb von 13,2 °C das Zinngefüge von der tetragonalen in die rhombische Gitterstruktur übergeht und dies mit einer schleichenden Auflösung der Zinnintegrität einhergeht (Zinnpest). Geringe Mengen Zink beschleunigen diesen Übergang, weshalb Zinn-Zink Lote als problematisch angesehen werden.

Die Entwicklung bleifreier Lote ist noch im Fluss und man trachtet durch minimale Veränderung der Zusammensetzung und/oder das Zulegieren von Spuren weiterer Metalle, die Eigenschaften zu verbessern. So sind beispielweise neben dem in Tabelle 4-12 aufgenommenen Mitglied der SnAgCu-Lotfamilie auch Lote der Zusammensetzung Sn95,5Ag3,9Cu0,6, Sn96,5Ag3,0Cu0,5 und Sn95,25Ag3,8Cu0,7Sb0,25 im Einsatz. Die Wahl der Lotzusammensetzung wird auch durch das eingesetzte Lötverfahren, Wellen oder Reflow, beeinflusst (Kester 2008:1).

Ein zum Patent angemeldetes Lot des Prozessorherstellers INTEL mischt der Metallmatrix Kohlenstoff-Nanoröhren (CNT – Carbon Nano Tubes) zu. Der entstehende Nanokomposit wird als Durchbruch der Löttechnologie gefeiert. Die CNT sollen Leitfähigkeit, Festigkeit und Stoßfestigkeit verbessern und die unerwünschte Elektromigration von Ionen aus dem Metallgitter behindern (Soldertec 2008).

4.6.3 Foresight industrielle Nutzung und Rohstoffbedarf

China und Japan sind dabei, ähnliche Regelungen wie in der EU einzuführen. Die USA und die übrigen Staaten werden folgen. Es kann mit großer Sicherheit davon ausgegangen werden, dass bis 2030 weltweit, vielleicht mit Ausnahme von Nischenanwendungen, ausschließlich bleifrei Lote Verwendung finden.

Nach Angaben von ITRI, ein internationaler Zinnverband mit Sitz in England, haben in der Zwischenzeit bleifreie Lote einen Anteil von 59 % am Weichlotmarkt erreicht. Nach der gleichen Quelle wurden 2006 188.300 t Zinn für die Herstellung von Loten eingesetzt. Daraus lässt sich ein globaler Weichlotverbrauch von rund 230.000 t ableiten. Für bleifreie Weichlote wurden 2006 über 5.000 t Silber benötigt (Tabelle 4-13), der Bedarf an Kupfer und anderen Legierungsmetallen fällt dagegen nicht ins Gewicht.

Die Elektronik ist eine Wachstumsbranche. Dies begründet die Annahme, dass ihre globalen Wachstumsraten in den Jahren bis 2030 über dem mittleren Wachstum der Weltwirtschaft liegen werden. Auf der anderen Seite schreitet die Miniaturisierung unaufhaltsam fort. Schaltungen, die früher eine Platine füllten, sind heute in einem einzigen Chip integriert. Dies gilt für die elektronischen Bauteile. Der Verkleinerung von elektrischen Baugruppen, beispielsweise das Netzteil von Geräten, sind dagegen Grenzen gesetzt. Mit der Miniaturisierung elektronischer Schaltungen nimmt auch die benötigte Lotmenge ab. Geht man davon aus, dass die Produktion elektronischer und elektrischer Geräte bis 2030 mit jährlich 5 % wächst und der Integrationsgrad¹⁷ bis dahin um das Dreifache zunimmt, dann steigt der jährliche Zinnverbrauch für Weichlote bis 2030 moderat auf 232.900 t an. Gravierender ist der Bedarfszuwachs bei Silber, wenn 2030 beinahe die Hälfte der globalen Silberproduktion 2006 für Weichlote benötigt wird.

¹⁷ Als *Integrationsgrad* wird hier das Verhältnis des heutigen zum künftigen Materialbedarf bezeichnet. Der Integrationsgrad nimmt durch die Miniaturisierung elektronischer Schaltungen zu.

Tabelle 4-13: Globaler Rohstoffbedarf für Weichlote in t

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030
Zinn	302.000	188.300	232.900
Silber	20.200	5.100	9.300
Kupfer	15.100.000	950	1.700

Wachstumsannahmen der Weltproduktion der Elektronik- und Elektroindustrie bis 2030, sind selbstverständlich mit beträchtlichen Unsicherheiten behaftet. Auch die künftige technische Entwicklung der Schaltungsintegration lässt sich nicht mit Sicherheit quantifizieren. Beide Größen beeinflussen den künftigen Rohstoffbedarf gravierend. Dies zeigt Tabelle 4-14 für drei Wachstumsraten und drei unterschiedliche Integrationsgrade. Ein Rückgang des Lotbedarfs könnte von neuen Fügetechnologien ausgehen, wenn es gelingt, sichere und schnelle Klebetechniken zu entwickeln. Damit wird seit geraumer Zeit mit mäßigem Erfolg experimentiert.

Tabelle 4-14: Sensitivitätsanalyse des Rohstoffbedarfs 2030 für Weichlote in Abhängigkeit von sektoralem Weltwirtschaftswachstum und Integrationsgrad

		Wachstumsrate	3 %/a	4 %/a	5 %/a
		Rohstoffbedarf in t			
Integrationsgrad	1,0	Zinn	445.000	560.000	706.000
		Silber	17.700	22.300	28.0100
	2,0	Zinn	222.400	280.500	352.900
		Silber	8.900	11.200	14.000
	3,0	Zinn	146.800	185.100	232.900
		Silber	5.800	7.400	9.300

Ohne Berücksichtigung der Effekte der Schaltungsintegration würde sich schon bei einem moderaten Wachstum der Elektronik- und Elektroindustrie von 3 % pro Jahr der Zinnbedarf für Weichlote mehr als verdoppeln und der Silberbedarf beinahe das Volumen der Weltsilberproduktion von 2006 erreichen.

Der Rohstoffbedarf wird durch primäre Rohstoffe aus geologischen Ressourcen und durch beim Recycling gewonnene Sekundärrohstoffe gedeckt. Die niedrig schmelzenden Weichlote können prinzipiell thermisch gut von den übrigen Stoffen abgetrennt werden. Im Zuge der Substitution bleihaltiger Lote wird das starke Wachstum des Zinn- und Silberbedarfs nur zum Teil aus dem Recycling gedeckt werden können. Nach Abschluss dieser Substitution kann dann der größte Teil der benötigten Rohstoffe durch das Recycling gebrauchter Geräte gewonnen werden, weil der Lotbedarf durch den

dämpfenden Einfluss der Schaltungsintegration vom Wirtschaftswachstum abgekoppelt wird und nur mehr moderat steigt.

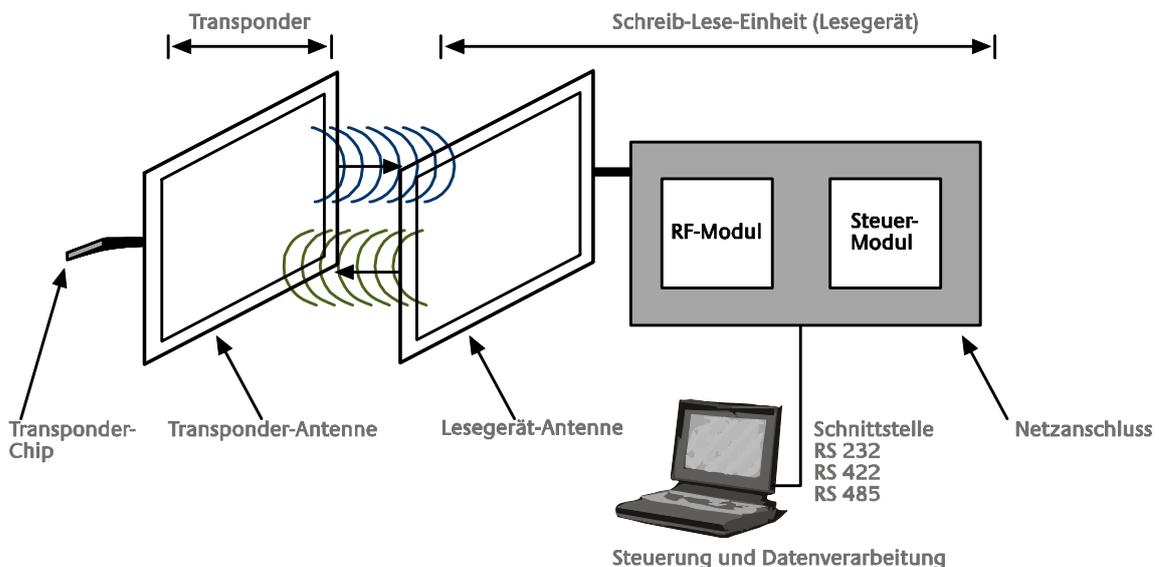
4.7 RFID – Radio Frequency Identification

4.7.1 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, Smart Tickets und Smart Cards.

Folgende Abbildung zeigt die Funktionsweise des RFID-Systems schematisch:

Abbildung 4-16: Schematischer Aufbau eines RFID-Systems



Quelle: IZT, EMPA, BSI 2004

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. Aktive Transponder eignen sich aufgrund hoher Kosten, Wartungsbedarf und begrenzter Lebensdauer der Batterie nicht für einfache Kennzeichnungsaufgaben (IZT, EMPA 2008).

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 hervorzuheben¹⁸:

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

RFID-Systeme erweitern die Funktionalitäten und Einsatzmöglichkeiten anderer Auto-ID-Systeme (Barcode-System, Chip-Karten¹⁹, Optical Character Recognition OCR und Biometrie) und bieten hohe Effizienzsteigerungspotenziale.

Ein Hauptanwendungsgebiet für RFID werden in Zukunft Smart Labels ("intelligente Etiketten") mit passiven RFID-Tags sein. Sie dienen wie herkömmliche Etiketten dazu, Objekte zu identifizieren und über diese zu informieren. Smart Label kommen heute schon beispielsweise zum Supply Chain Management bei der METRO Group im großen Maßstab zum Einsatz. Sollten die Kosten für RFID-Tags von heute rund 10 – 15 Cent auf 1 – 2 Cent pro Tag reduziert werden können, so dürfte die Anwendung auf Massenprodukten wie z. B. Lebensmittelverpackungen große Marktpotenziale haben. Wir reden dann von jährlich in Verkehr gebrachten Stückzahlen an RFID-Tags in mehrstelliger Milliardenhöhe.

Ein passiver RFID-Transponder besteht aus den Hauptkomponenten Substrat, Chip (IC) und Antenne. In der Bauform Smart Label wird der RFID-Transponder häufig noch mit Folien und Klebflächen versehen. Für RFIDs in Smart Labels kommen vorwiegend die HF- (13,56 MHz) und UHF-Technologie (über 800 MHz) zum Einsatz. Die Interfe-

¹⁸ Weitere Funktionalitäten sind z. B. die Überwachung von Tieren oder der Umwelt.

¹⁹ Chip-Karten können mit RFID-Technologie als kontaktlose Chipkarten kombiniert werden. Sie werden überwiegend im Ticketing und zur Zutrittskontrolle eingesetzt.

renz der Radiowellen mit Wasser (u. a. Lebensmittel) und Aluminium (u. a. Verpackung) verlangt spezielle technische Lösungen zur Gewährleistung der Funktionalität. 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 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. Deshalb wird RFID auch als eine volkswirtschaftliche Schlüsseltechnologie angesehen (VDI/VDE 2007). 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). Neben diesen Firmen von Weltrang gibt es darunter aber auch viele innovative mittelständische Betriebe wie TBN, KSW Microtec und Feig Elektronik.

4.7.2 Rohstoffinhalt

Es gibt keine repräsentative Untersuchung zur stofflichen Zusammensetzung von passiven RFID-Tags. Am sichersten sind die Angaben zur stofflichen Zusammensetzung von passiven RFID-Tags gemäß des Technischen Reports ISO/IEC TR 24729-2:2007²⁰.

²⁰ Die stofflichen Angaben im Annex B sollen explizit für eine theoretische Abschätzung dienen, ob der RFID-Fluss heutige Recyclingprozesse beeinträchtigen kann. Hinsichtlich der Funkfrequenz (LF, HF, UHF) werden keine Differenzierungen vorgenommen.

Tabelle 4-15: Stoffliche Zusammensetzung von heutigen passiven RFID Tags

Komponente	Material	Masse [mg]		
		76,2 * 76,2 mm Tag	15 * 97 mm Tag	15 * 148 mm Tag
Deckschicht	PP	270	65	100
	Papier	525	130	200
Klebstoff	Acrylat	115	30	45
IC	Silizium	0,5	0,5	0,5
ACP	Epoxy-basiertes Material	0,8	0,8	0,8
ACP Metall	Nickel	0,1	0,1	0,1
Klebstoff	Polyurethan	40	10	15
Antenne	Kupfer	340	105	140
	Aluminium	50	15	20
	Silber (gedruckt)	43,6*	10,9	16,4*
	Bonding Agent (gedruckt)	18,4*	4,6	6,9*
Substrat	PET	410	100	155
Klebstoff	Acrylat	155	40	60
Gesamt	nach Antenne (ohne Deckschicht)	Cu: 1021,4	Cu: 286,4	Cu: 401,4
		Al: 731,4	Al: 196,4	Al: 281,4
		Ag: 743,4*	Ag: 196,9	Ag: 284,7*

Quellen und Anmerkungen: * Berechnungen in Analogie zu Aluminium und Kupfer basierend auf ISO/IEC TR 24729-2:2007; IC – Integrierter Schaltkreis, ACP – Adhesive Conductive Paste

Die hauptsächlichen Massebestandteile eines RFID-Tags variieren beträchtlich. Das Gesamtgewicht der passiven RFID-Tags (ohne Deckschicht) wird wesentlich durch das Antennenmaterial und die Tag-Fläche bestimmt.

- ▶ Die Spurenbestandteile IC, ACP und ACP-Metall sind für alle Baugrößen gleich groß, während bei den anderen Materialien ein flächenbezogener Multiplikationsfaktor angesetzt ist²¹.

²¹ Die Werte des Tags mit den Dimensionen 76,2 mm * 76,2 mm ergeben sich überschlägig aus denen des Tags mit den Dimensionen 15 mm * 97 mm durch Multiplikation mit dem Faktor 3 1/3 – 4; diejenigen für den Tag mit 15 mm * 148 mm sind etwa mit 1 1/3 – 1 1/2 zu multiplizieren. Auch im Bonding Agent befindet sich nach Fraunhofer IZM et al. 2006 teilweise Silber.

- ▶ Das Gesamtgewicht des Transponders variiert je nach Antennenmaterial beträchtlich. Transponder mit Kupferantenne wiegen rund 30 – 40 % mehr als gleich große Transponder mit Aluminium- bzw. Silberantenne.

Es liegen weitere Quellen zur stofflichen Zusammensetzung passiver RFID-Tags vor (FLOG 2007, AIM 2005, CEPI 2005, Fraunhofer IZM et al. 2006)²². Zur Berechnung der heutigen RFID-Stoffströme werden aufgrund der hohen Qualität und Legitimität der Angaben die Mengen gemäß ISO/IEC 2007 herangezogen.

Die Forschung zu RFID-Tags umfasst alle Komponenten einzeln und im Zusammenspiel, d. h. die Chip-Technologie, Substrate, Verbindungstechnik, Antennendesign, Energieversorgung sowie die Integration weiterer Komponenten.

Aus stofflicher Sicht ist insbesondere das Antennendesign der Zukunft interessant. Die Materialeinsparungspotenziale beim Antennendesign werden in naher Zukunft ausgereizt sein, da der Miniaturisierung durch die erforderlichen elektromagnetischen Eigenschaften enge Grenzen gesetzt sind. Die heutigen Materialien Kupfer und Aluminium werden auch in Zukunft eingesetzt. RFID-Transponder werden in naher Zukunft mit hoher Wahrscheinlichkeit massenhaft kostengünstig im Druckverfahren hergestellt werden können. Als Antennenmaterial ist dann Silberleitpaste erforderlich. Der Silberanteil der Pasten variiert nach verschiedenen Patentangaben zwischen ca. 30 % und 95 % mit typischen Werten um 60 – 70 % (Steiger 2008).

Über diese inkrementellen Optimierungen hinaus werden Basisinnovationen wie zum Beispiel die Dampf-Abscheidung von Aluminium und Elektroplating von Kupfer diskutiert (Syed et al. 2007)²³. In der Vision des Vollpolymer-Transponders, d. h. mit Polymerantenne (2020), würde kein Metall mehr für die Antenne benötigt. Heutige Antennenmaterialien aus Polymeren haben noch nicht genügend Leitfähigkeit (Mildner 2008). Es ist unklar, welche Polymere zukünftig dafür geeignet sein werden. Die Massenpolymere kommen sicherlich nicht in Frage; eher wird anspruchsvolle organische Chemie erforderlich sein. Es ist derzeit nicht abzusehen, dass Polymerantennen kostengünstiger als Silberantennen herstellbar sind (Steiger 2008). 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.

²² Wesentliche Abweichungen von der ISO/IEC Norm konnten in Interviews weitgehend erklärt werden (Helmigh 2008; Müller, Nissen 2008; Steiger 2008).

²³ Beim Elektroplating können auch Silber und Kupfer kombiniert werden, wobei erst Silber und dann darauf Kupfer abgeschieden wird.

4.7.3 Foresight industrielle Nutzung

Nach IDTechEx (2007) wurden im Jahr 2007 1,74 Mrd. RFID-Tags weltweit verkauft. Im Jahr 2006 waren es erst 1,02 Mrd. RFID-Tags. Diese Zahlen lassen sich mit Zahlen für Europa vergleichen. Das Bridge-Projekt (2007) liefert für die Jahre 2007, 2012, 2017 und 2022 Momentaufnahmen der Stückzahlen von in Europa in Verkehr gebrachten RFID-Tags. Es sollen die vielversprechendsten Märkte für passive RFID-Tags auf physischen Objekten sein:

Tabelle 4-16: Prognose der Märkte für passive RFID-Tags in Europa bis 2022 (Mio. Stück)

Vertikaler Markt	2007	2012	2017	2022
Einzelhandel und Konsumgüterindustrie	62	2.270	13.700	56.100
- auf Lebensmitteln	0	520	5.200	31.700
- auf anderen Gütern	26	960	5.000	12.400
- auf Kisten	34	760	3.300	11.500
- auf Paletten	2	40	200	500
Flugindustrie	10	60	300	500
- auf Gepäck	10	56	249	481
- auf Assets	0	0	1	7
- auf Gegenständen beim Flug	0	0	1	8
- auf Flugzeugkomponenten	0	0	1	31
Pharmazeutische und Gesundheitsindustrie	9	350	1.710	6.740
- auf Krankenhaus-Assets	2	98	190	320
- auf Proben	1	8	30	40
- auf Medikamenten	5	246	1.500	6.380
Automobilindustrie	6	50	200	500
- auf Mehrweg-Transportbehältern	6	45	187	490
- auf Automobilen	0	1	2	5
Post und Expressgutindustrie	21	270	3.500	12.600
- auf Paketen	20	265	780	2.900
- auf Post	0	0	2.750	9.600
- auf Mehrweg-Transportbehältern	1	2	10	30
andere Märkte	36	230	3.000	10.300
- auf Tieren	12	25	125	150
- auf Büchereibüchern	22	55	80	120
- auf militärischen Gütern	1	100	800	2.000
- auf archivierten Dokumenten	1	50	2.000	8.000
Summe	144	3.220	22.400	86.700

Quelle: Bridge 2007

Im Jahr 2007 sind die Hauptanwendungen für passive RFID-Tags bei der Kennzeichnung hochwertiger Güter und auf Kisten im Einzelhandel und Konsumgüterbereich, in

der Paketlogistik, auf Tieren sowie in Büchereien zu finden. Bis 2022 liegen die Zahlen um über einen Faktor 600 höher, was das exponentielle Wachstum verdeutlicht. Es dominieren dann der Einzelhandel und die Konsumgüterindustrie insbesondere mit dem Tagging auf Artekelebene. Auch die Post- und Expressgutindustrie sowie die Archivierung von Dokumenten sind bis 2022 Massenmärkte geworden.

Die Autoren halten ihre Angaben für konservative Schätzungen, da auch 2022 nur ein Bruchteil der in Umlauf befindlichen Objekte mit RFID-Tags versehen wäre. Auch den Zahlen im Bridge-Projekt liegen relativ grobe Schätzungen des Prozentsatzes von mit RFID-Tags versehenen Objekten bei, allerdings bei hohem Differenzierungsgrad.

Der europäische Anteil am RFID-Tag-Weltmarkt betrug 2007 etwa ein Viertel. Multipliziert man diese europäischen Zahlen zur Kennzeichnung physischer Objekte für 2022 mit einem Faktor 4, so erhält man eine konservative Schätzung für die globale Marktentwicklung. Dies entspricht auch in etwa dem Anteil der EU 27 am weltweiten BSP. Die Berücksichtigung personenbezogener Anwendungen, aber auch das mögliche Wachstum in anderen Wirtschaftsräumen wie China sprechen für ein real noch größeres globales Wachstum. Ein Faktor 5 kann immer noch als realistische Hochrechnung in räumlicher Hinsicht gelten.

Für die Marktdiffusion liegen nur Prognosen bis 2022 vor. Bis 2030 wird in einer konservativen zeitlichen Schätzung angenommen, dass die absoluten Verkaufszahlen von RFID-Transpondern im Vergleich zu 2022 noch einmal um einen Faktor 2 ansteigen.

4.7.4 Foresight Rohstoffbedarf

Das valideste Fundament für eine Abschätzung zukünftiger Stoffströme durch RFID bietet eine zurzeit im Auftrag des Umweltbundesamtes angefertigte Studie (IZT, EMPA 2008). Projektionen des zukünftigen Rohstoffbedarfs müssen die technologische Entwicklung und die zeitliche Diffusionsdynamik von RFID in Betracht ziehen. Folgende Randbedingungen sind zu beachten:

- ▶ Der Miniaturisierung der Antenne sind aufgrund der erforderlichen elektrischen Eigenschaften enge technische Grenzen gesetzt.
- ▶ Killerapplikationen auf Einzelverpackungsebene werden nur im Druckverfahren möglich sein, d. h. aus heutiger Sicht mit silberbasierten Leitpasten.
- ▶ Es ist zu erwarten, dass die Kupferpreise dauerhaft eher noch deutlicher oberhalb der Aluminiumpreise liegen werden.

Für die Abschätzung des zukünftigen Rohstoffbedarfs wurde zum einen angenommen, dass die durchschnittliche Größe der Tags vom mittleren Tag 2006 bis zum kleinen

Tag 2030 sinkt. Der Antennenanteil von Kupfer/Aluminium/Silber verschiebt sich in diesem Zeitraum von 50/40/10 auf 10/30/60 (vgl. IZT, EMPA 2008).

Tabelle 4-17: Globaler Rohstoffbedarf für RFID-Tags in t

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030
Kupfer	15.100.000	50,4	9.100
Aluminium	33.700.000	5,76	3.900
Silber	20.200	1,05	5.670
Nickel	1.580.000	0,072	26,1

Angesichts einer Kupferproduktion in Höhe von 15,1 Mio. t pro Jahr ist die durch passive RFID Tags induzierte Kupfermenge isoliert gesehen gering. Auch die Einflüsse auf die Aluminium- und Nickelnachfrage sind nur unter weitreichenden Annahmen relevant.

Anders verhält es sich bei den Einflüssen der RFID-Tag-Nachfrage auf den Silberbedarf. Mit 5.670 Tonnen im Jahre 2030 könnte angesichts einer Weltproduktion von 20.200 t/a im Jahr 2006 ein wichtiges zusätzliches Nachfragesegment entstehen. In einem Extremszenario könnte der Silberbedarf auch ein bis zwei Größenordnungen oberhalb der Werte in obiger Tabelle liegen. Ursachen wären insbesondere höhere Silbergehalte pro Tag²⁴ und eine stärkere Diffusion bis 2030 auch aufgrund der Essentialität von silberbasierten Leitpasten für die Antennenaufbringung im Druckverfahren. Auch ein deutlich moderaterer Verlauf ist möglich, wenn Substitute stärker vom Markt profitieren. Insgesamt scheint ein Silberbedarf im Jahr 2030 in Höhe von 3.000 – 8.000 t/a eine realistische Bandbreite zu sein. Vor dem Hintergrund zu erwartender Preisefekte könnte der Silberbedarf für RFID-Tags neben anderen Hemmnissen wie Datenschutz und Sicherheit zu einem großen Problem für die weltweite massenhafte Einführung von RFID-Systeme werden.

²⁴ Der Silberbedarf pro Tag lag in obiger Abschätzung eher im unteren Bereich. Hier wurde ein Tag mit einem Silberbedarf von 10,9 mg/Tag zugrundegelegt, andere Angaben zu Tags im Scheckkartenformat liegen bei 32,1 mg/Tag (Fraunhofer IZM et al. 2006) bzw. gar 148,5/Tag mg (FLOG 2007). Nach Fortis Bank (2008) wurden 2006 bereits 10 t Silber für RFID-Tags eingesetzt und nicht wie in dieser Abschätzung gut eine Tonne. Obige Berechnung unterschätzt womöglich den spezifischen Silbergehalt um den Faktor 3 - 10. Erst durch eine Reihe vertiefender Interviews konnten widersprüchliche Angaben zum Silbergehalt in der Literatur erklärt werden.

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 werden²⁵.

²⁵ 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 klarer Entwicklungsbedarf von Recyclingsystemen zur Wiedergewinnung von Silber.

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

4.8.1 Technologiebeschreibung

Die Display-Technologie hat sich in den letzten Jahren zu einer typischen Querschnittstechnologie 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 Touch-Screens 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, hat in den letzten Jahren erheblich Marktanteile eingebüßt. Flachbildschirme auf Basis von Flüssigkristallen (Liquid Crystal Displays (LCDs)) oder Plasma Display Panels (PDPs) werden weiter Marktanteile dazugewinnen (Kanellos, Greif 2006). Im Jahr 2007 wurden erstmals mehr LCDs als CRTs verkauft.

Field Emitter Displays (FED) befinden sich im Demonstrationsstadium. Sie basieren auf dem CRT-Prinzip. Allerdings stehen jedem Pixel Elektronenquellen zur Verfügung. Field Emitter Displays (FEDs) sind Flachdisplays, d. h. sie kombinieren den Vorteil, dünn wie LCDs zu sein, mit hohem Kontrast, hohen Bildwiederholungsraten und der guten Bildqualität von CRTs (Fraunhofer IZM 2007).

OLED-Displays sind zwar in geringen Abmessungen kommerziell verfügbar; ihr Marktanteil ist aber derzeit gering. OLED Displays werden derzeit in Navigationsgeräten, Autoradios, MP3-Playern und für Preisauszeichnungen in Supermärkten eingesetzt. OLED gilt technologisch wie wirtschaftlich als eine aussichtsreiche neue Flachdisplay-Technologie. 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 können leitfähige transparente Oxide eingesetzt (TCO, transparent conductive oxide) werden, 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

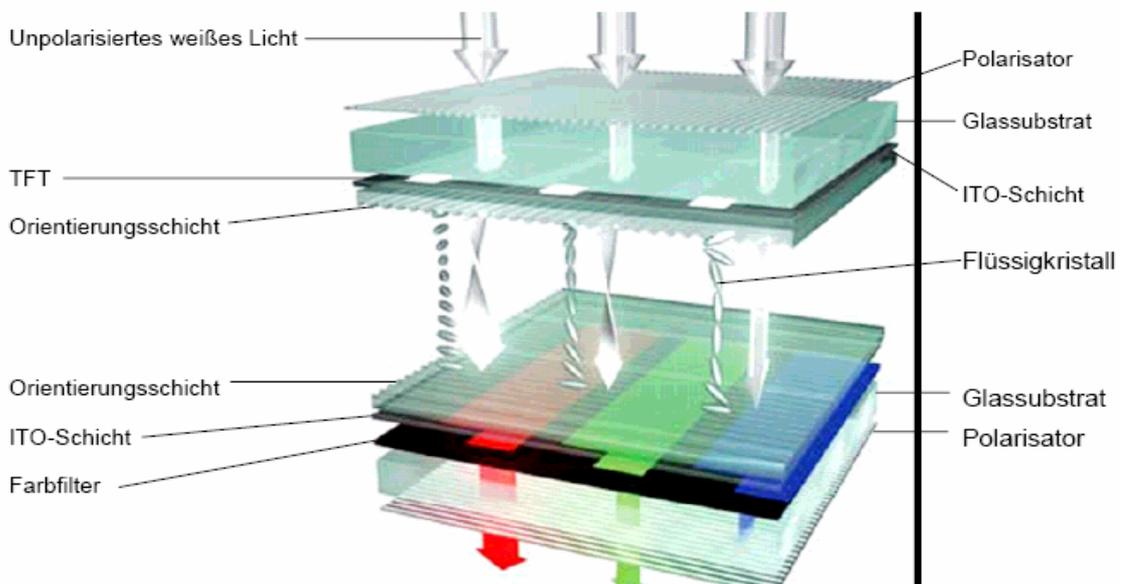
Verfahren entwickelt, Antimonzinnoxid (ATO) als transparente Elektrode auf Glas zu drucken. ATO besteht aus 90 % Zinn und 10 % Antimon, das preisgünstiger und leichter verfügbar als Indium ist (Bush 2006).

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. 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).

Abbildung 4-17: Schematischer Aufbau eines LC-Display



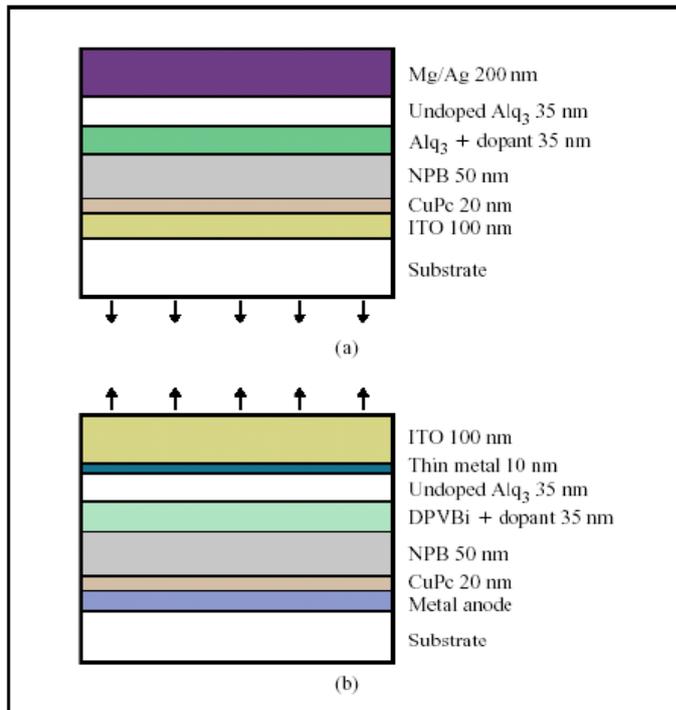
Quelle: Merck 2008

Organic Light Emitting Diodes Displays (OLED-Displays)

Bei der Herstellung von OLED-Displays wird pro Stack (siehe Abbildung 4-18) auf ein Glassubstrat die transparente ITO-Schicht aufgebracht. In den nächsten Schritten werden alle anderen organischen und metallischen Schichten (u. a. Silber) durch verdamp-

fen appliziert. Anschließend wird die Frontscheibe angebracht und das ganze Luftdicht verkapselt (Fraunhofer IZM 2007, Steinfeldt et al. 2004).

Abbildung 4-18: Schematischer Aufbau eines OLED

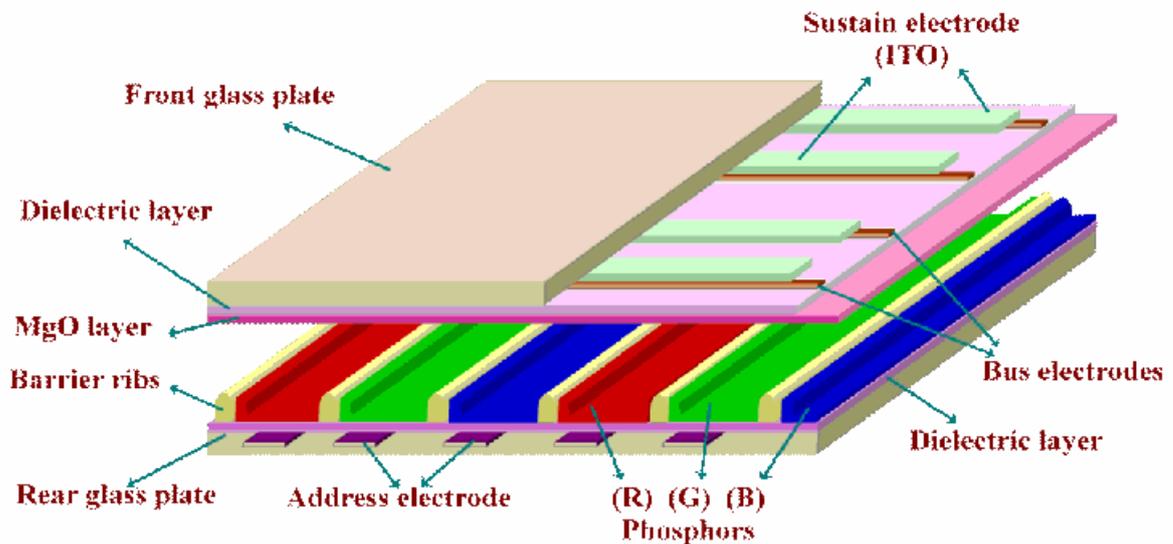


Anmerkung: a) Down-Emitting Stack, b) Up-Emitting Stack
Quelle: Steinfeldt et al. 2004.

Plasma Display Panel (PDP)

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

Abbildung 4-19: Schematischer Aufbau eines PDPs

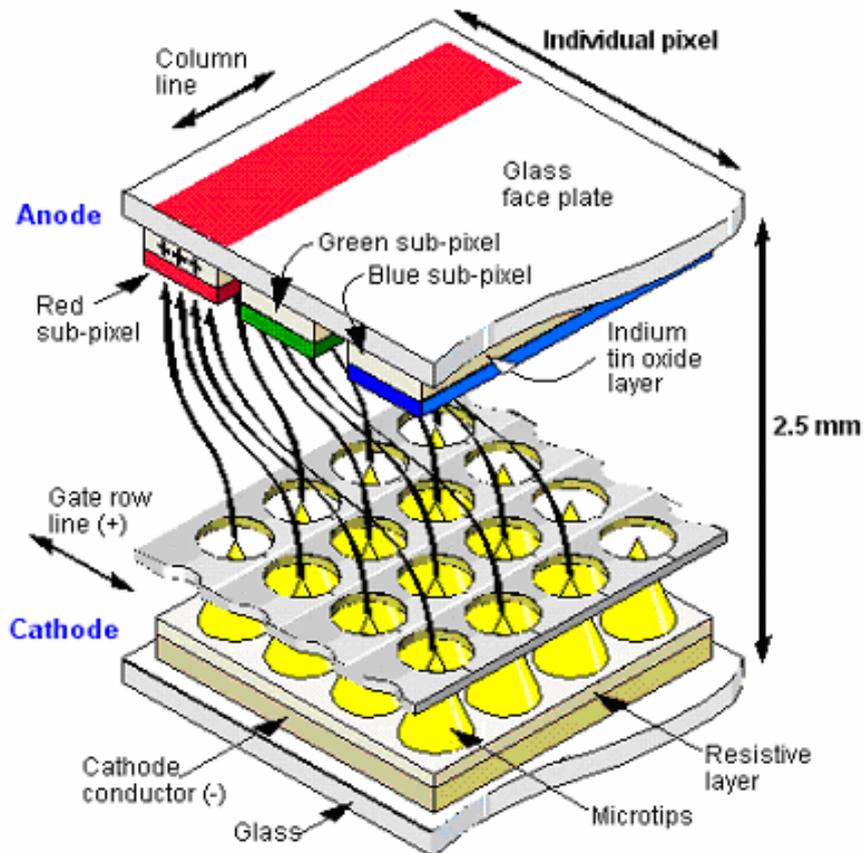


Quelle: Ram 2008

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 Vakuumröhre und einer Frontplatte aus Glas mit einer auf der Innenseite gelegenen ITO-Schicht als Anode. Die Technik ist derzeit noch nicht serienreif. Bemühungen von Canon, eine ähnliche Technologie (Surface conduction Electron emitter Display (SED)) zur Marktreife zu bringen, sind derzeit wegen Patentstreitigkeiten ausgesetzt (Fraunhofer IZM 2007, Steinfeldt et al. 2004).

Abbildung 4-20: Schematischer Aufbau eine Field Emitter Displays



Quelle: www.answers.com 2008

Die nachstehende Tabelle zeigt zentrale Trends der Displaywirtschaft im Überblick (Behrendt et al. 2008). Sie differenziert zum einen hinsichtlich der wesentlichen Displaykategorien, und zum anderen hinsichtlich von Trends des Gesamtmarktes, der Basistechnologien und auch der Produktionsstrukturen.

Tabelle 4-18: Technologie- und Marktentwicklungen im Überblick

	Gesamtmarkt	Basistechnologien	Produktionsstrukturen
Fernseher	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Mehrfachausstattung in EU ▶ Wachstum in Schwellenländern ▶ Global wachsende Stückzahlen ▶ Aufspaltung in High-End- und Low-End-Markt 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ CRT dominierte, Kannibalisierung von zwei Seiten: <ul style="list-style-type: none"> a) LCD bei kleinen Diagonalen b) Plasma- und Rückprojektion, inzwischen auch LCD, bei großen Diagonalen ▶ Alternative Konzepte: Beamer, Web-TV 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ unterschiedliche vertikale Integration bei CRT: Glas, Bildröhre, Endgerät ▶ Abwanderung der CRT- Produktion von Industrie- in Schwellenländer ▶ starker Kostendruck auf CRT ▶ Produktion von anderen Basistechnologien (z. B. LCD, Plasma), Komponenten und Endgeräten vorwiegend in Fernost
Notebooks und Monitore	<ul style="list-style-type: none"> ▶ weltweit großes Wachstum bei Notebooks ▶ Nachholbedarf bei Computer-Monitoren in Schwellenländern ▶ Hohes Wachstum bei Kontroll- und Überwachungsmonitoren ▶ Mehrfachausstattung in Haushalten und Arbeit (mobil und Desktop) ▶ Info-Monitore und Großdisplays im öffentlichen Raum 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ LCD ersetzt CRT massiv, angefangen in kundennahen Bereichen mit wenig Platz und in der Arbeitswelt ▶ CRT v. a. für Grafikdarstellung (CAD, Spiele) wettbewerbsfähig ▶ Weiterverwendung von CRT-Monitoren in der Lagerhaltung und im Kinderzimmer ▶ Alternative Konzepte: E-Paper, interaktive Roomware, holographische Displays, große Videowände 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ ähnliche Produktionsstrukturen von CRT-Monitoren wie bei Fernsehern, noch stärkere Konkurrenz anderer Standorte und Kostendruck ▶ Produktion von LCD, Komponenten und Endgeräten vorwiegend in Fernost ▶ LCD wird billiger (u. a. Senkung des Ausschusses) ▶ Deutschland mit wichtigen Komponentenherstellern (u. a. LCs der Fa. Merck)
Kleine bis mittlere Diagonalen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ wachsende Marktdurchdringung bei Mobiltelefonen, Digital- und Videokameras, Navigationsgeräten, etc. ▶ global stark wachsende Teilmärkte bei Einbettung ▶ mittelfristig Trend zur Einbettung in Weiße Ware 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ LCD, OLED, Foliendisplays und andere mit wechselnden Marktanteilen ▶ von S/W- zu Farbdarstellung ▶ Bildschirm als Eingabemedium ▶ Technische Herausforderungen wie Lebensdauer, Bildwechsel ▶ Alternative Konzepte: Cyber-Brille, Augmented Reality 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ neue Komponentenabnehmer wie Automobil- und Weiße-Ware-Hersteller in EU stark vertreten ▶ Produktion von Basistechnologien und Komponenten vorwiegend in Fernost ▶ Schlüsselindustrien mit hoher strategischer Bedeutung, neue Technologien mit ungeklärten Produktionsstandorten ▶ Deutschland mit wichtigen Komponentenherstellern (u. a. für OLED)

Quelle: Behrendt et al. 2008, basierend auf Behrendt, Erdmann 2004

4.8.2 Rohstoffinhalt

Typischerweise setzt sich Indium-Zinn-Oxid (ITO) aus 90 % In_2O_3 und 10 % SnO_2 zusammen. Werden die Atommassen der Elemente beachtet, besteht demnach ITO zu 75 % aus Indium. Die Daten für die Abschätzung des Rohstoffinhalts in kg/cm^2 sind Socolof et al. (2001) für LCDs und Steinfeldt et al. (2004) für OLEDs entnommen. Der Indiumgehalt von PDPs und FEDs wird auf die Hälfte des Indiumgehalts von OLEDs geschätzt, da bei beiden Technologien jeweils nur eine Elektrode aus ITO besteht. Der Indiumgehalt in kg/cm^2 wurde zur Abschätzung des Indiumbedarfs für den Gesamtdisplaymarkt auf Displays unterschiedlicher Größe umgerechnet. Für Kleingeräte wird ein Seitenverhältnis von 2 zu 3, bei Großgeräte von 16 zu 9 angenommen. Die Diagonalen von Displays für Kleingeräte – alle Displays kleiner zehn Zoll werden diesem Marktsegment zugeordnet – werden hier mit drei und sieben Zoll angenähert. Für das Marktsegment Computer-Monitore wird als Diagonale 21 Zoll, für Fernseher 37 Zoll und für Displays im öffentlichen Bereich 46 Zoll angenommen.

Der berechnete Indiumgehalt der Displays unterschiedlicher Technologien und Größen findet sich in Tabelle 4-19.

Tabelle 4-19: Indiumgehalt der Displays unterschiedlicher Technologien und Größen.

Gesamtverbrauch bei der Herstellung	[kg/cm^2]	Kleingeräte [kg/3"]	Kleingeräte [kg/7"]	Computer Monitore [kg/21"]	Fernseher [kg/37"]	öff. Displays [kg/46"]
LCD						
Indium ¹	4,00E-07	1,11E-05	6,07E-05	7,28E-04	2,26E-03	3,49E-03
OLED						
Indium ²	1,88E-08	5,23E-07	2,85E-06	3,41E-05	1,06E-04	1,64E-04
Silber ²	1,82E-08	5,07E-07	2,76E-06	3,31E-05	1,03E-04	1,59E-04
PDP						
Indium	9,38E-09	2,61E-07	1,42E-06	1,71E-05	5,30E-05	8,19E-05
FED						
Indium	9,38E-09	2,61E-07	1,42E-06	1,71E-05	5,30E-05	8,19E-05

Quellen und Anmerkung: ¹ Socolof et al. 2001; ² Steinfeldt et al. 2004. Der Indiumgehalt von PDPs und FEDs wird auf die Hälfte des Indiumgehalts von OLEDs geschätzt, da bei beiden Technologien jeweils nur eine Elektrode aus ITO besteht.

4.8.3 Foresight industrielle Nutzung

Im Jahr 2006 sind im Marktsegment größer 10 Zoll 50,5 Mio. LCDs und 11,1 Mio. PDPs verkauft worden. Im Jahr 2006 betrug der Anteil der CRTs am Gesamtmarkt für große Displays 70 %, im Jahr 2007 wurden jedoch erstmals mehr LCDs als CRTs verkauft. Im Jahr 2030 werden nach diesen Abschätzungen keine CRTs mehr verkauft werden. Im Marktsegment für Displays kleiner 10 Zoll sind 2006 allein 3,6 Mrd. LCDs und 72 Mio. OLED-Displays verkauft worden. Das Marktsegment Kleindisplays (kleiner 10 Zoll) macht nach Anteil der verkauften Einheiten knapp 95 % des Gesamtmarktes für Displays aus. Da genauere Angaben zu exakten Displaygrößen fehlen, wird hier angenommen dass 50 % der kleinen LCDs 3 Zoll, die andere Hälfte 7 Zoll groß sind. Außerdem wird angenommen, dass im Jahr 2006 nur 3 Zoll große OLED Displays verkauft worden sind, da sie vor allem in Handys, MP3 Playern und als Preisauszeichnung eingesetzt wurden.

Um die Bandbreite möglicher zukünftiger Entwicklungen einzugrenzen, werden zwei Projektionen vorgenommen:

- ▶ Projektion A: Im Jahr 2006 sind in allen Marktsegmenten etwa 3,9 Mrd. Displays verkauft worden. Bei einem Wachstum des Gesamtdisplaymarkts von moderaten 2 % werden im Jahr 2030 6,2 Mrd. Displays verkauft (Projektion A, siehe Tabelle 4-20). Es wird angenommen, dass der Anteil von kleinen Displays am Gesamtmarkt konstant bleibt, so dass im Jahr 2030 ca. 5,9 Mrd. kleine Displays verkauft werden. Der Markt verschiebt sich jedoch zugunsten von OLED-Displays auf einen Marktanteil von 47,5 % – die Hälfte davon 3 Zoll, die andere Hälfte 7 Zoll groß.
- ▶ Projektion B: Hier werden im Jahr 2030 knapp 10 Mrd. Displays verkauft. Hier werden statt des Gesamtmarktes die einzelnen Marktsegmente mit unterschiedlichen Wachstumsraten modelliert. Der Anteil von Kleindisplays im Jahr 2030 sinkt auf 88 %, da der Trend zu großen Displays stärker favorisiert wird. LCDs dominieren mit 65 % noch den Kleindisplaymarkt, OLEDs besitzen jedoch in diesem Segment schon einen Marktanteil von 35 %. Wegen des technologischen Fortschritts ist es nicht ausgeschlossen, dass bis 2030 auch OLED-Displays, die bisher nur für Kleingeräte existieren, auch die anderen Marktsegmente erobern (34 % des Gesamtmarktes großer Displays). Außerdem wird hier angenommen, dass bis 2030 auch FEDs, die sich besonders für große Durchmesser eignen, 6 % des Groß-Displaymarktes einnehmen. Das hat zur Folge, dass der Anteil großer LCDs von 84 % im Jahr 2006 auf 55 % im Jahr 2030 sinkt.

Wegen der Vielzahl der Technologien sowie der Dynamik und Innovationsschnelligkeit des Displaymarktes ist es schwierig, die einzelnen Marktanteile der Technologien abzuschätzen. Welche Technologie sich langfristig wirklich durchsetzen wird, hängt von vielen Faktoren wie Anwendungsmöglichkeiten, Kosten und technologischen Entwicklungen ab. Tabelle 4-20 zeigt die Entwicklung des Gesamtdisplaymarktes 2006 bis 2030 im Überblick:

Tabelle 4-20: Entwicklung des Gesamtdisplaymarktes 2006 bis 2030

Display	2006		2030 – Projektion A		2030 – Projektion B	
	Marktanteil [%]	Anzahl [Stück]	Marktanteil [%]	Anzahl [Stück]	Marktanteil [%]	Anzahl [Stück]
LCDs ¹	1,4	55.100.000	1,75	109.153.779	6,45	634.892.228
LCDs (3") ²	46,4	1.800.000.000	23,78	1.481.372.717	28,82	2.838.270.240
LCDs (7") ²	46,4	1.800.000.000	23,78	1.481.372.717	28,82	2.838.270.240
OLEDs	0,0	0	1,25	77.966.985	3,90	384.084.832
OLEDs (3") ³	1,9	72.100.000	23,78	1.481.372.717	15,37	1.513.575.498
OLEDs (7") ³	0,0	0	23,78	1.481.372.717	15,37	1.513.575.498
PDPs ¹	0,3	10.700.000	1,25	77.966.985	0,75	74.128.373
FEDs	0,0	0	0,50	31.186.794	0,53	51.874.849
CRT	3,6	140.000.000	0,00	0	0,00	0
Summe	100	3.877.900.000	100	6.230.281.686	100	9.848.671.760

Quellen und Anmerkungen: 1 <http://www.eetindia.co.in>, 2 www.cellular-news.com: 3,6 Mrd. LCDs kleiner 10 Zoll im Jahr 2006, 3 www.ledsmagazine.com: 72,1 Mio. verkaufte kleine OLEDs, eigene Berechnungen

4.8.4 Foresight Rohstoffbedarf

Der Gesamt-Indiumbedarf für die Elektrodenbeschichtung bei Displays betrug 230 t im Jahr 2006. Dieser Wert ist angesichts der jährlichen Indiumproduktion von 510 t in 2006 als realistisch einzustufen. 99,6 % entfiel auf die Herstellung von LCDs, 56 % auf die Herstellung von LCDs für Kleingeräte. Die restlichen 0,4 % wurden für OLED-Displays und PDPs verwendet. FEDs waren im Jahr 2006 noch nicht marktreif. Indiumdünnschichtbeschichtungen werden außer in Displays auch für elektrolumineszierende Lampen und zur Beschichtung z. B. von Photovoltaik verwendet.

Die Abschätzung für den Indiumbedarf für das Jahr 2030 bewegt sich zwischen 355 t und 1.600 t, je nachdem, welches Wachstumsmodell und welche Technologieverteilung

lung angenommen wird (siehe Tabelle 4-20 und Tabelle 4-21). Die höhere Projektion halten wir für wahrscheinlicher. Die Spreizung zeigt, dass ITO auf Displays unter bestimmten Umständen hoch relevant bleiben wird. Der Gesamtbedarf für kleine Displays nimmt ab, da im Jahr 2030 genauso viel OLED-Displays wie LCDs für Kleingeräte verkauft werden, diese jedoch nur ca. 5 % des Indiums benötigen. Großgeräte schlagen demnach mit einem höheren prozentualen Anteil zu Buche. In Projektion B entwickelt sich der Markt für Großgeräte dynamischer als für Kleingeräte (Marktanteil in Anzahl verkaufter Displays 2030: 87,3 %). Deswegen liegt der im Jahr 2030 gebundene Indiumgehalt in Fernsehern und öffentlich zugänglichen Displays mit knapp 84 % noch höher als in Projektion A mit 69 %.

Der Bedarf an Silber beträgt für OLED-Displays im Jahr 2006 200 kg. Im Jahr 2030 beträgt der Silberbedarf für OLED-Displays in Projektion A bereits knapp 9,5 t, da angenommen wird, dass im Jahr 2030 deutlich mehr OLED-Displays vor allem im Marktsegment Kleingeräte abgesetzt werden. Diese knapp 10 t fallen jedoch im Vergleich zur Rohstoffproduktion im Referenzjahr 2006 von 20.200 t Silber kaum ins Gewicht, was auch für Projektion B mit rund 28 t gilt.

Tabelle 4-21: Globaler Rohstoffbedarf für Displays in t

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030
Indium	580	230	355 – 1.581
Silber ¹	20.200	0,2	10 – 28

Quelle und Anmerkungen: eigene Berechnungen, 1. Silberbedarf nur für OLED-Displays

Flachdisplays sind eine Querschnittstechnologie, die in vielen Bereichen und in unterschiedlichen Größen Verwendung findet. Die Anwendungen reichen von einem wenige Zoll messenden OLED-Display für einen MP3-Player bis zu einem PDP Display mit einer 103 Zoll Diagonale. Diese Bandbreite der Größen, Anwendungsbereiche und Technologien sowie der dynamische Markt erschweren die Abschätzung des Indiumbedarfes für Displays.

Die ersten groben Abschätzungen des ITO-Bedarfs für Displays beruhen auf einer Reihe von Annahmen, die eher konservativ sind. Eine große Unsicherheit sind die zukünftigen relativen Marktanteile der Displaytechnologien. Es ist unklar, ob OLED das LCD-Segment auf breiter Front vereinnahmen wird; die Konsequenzen für den Indiumbedarf wären aber enorm, da sie nur 5 % des LCD Bedarfes an Indium benötigen. Der Indiumbedarf für PDP und FED wurde anhand der niedrigeren Werte für OLED – und nicht anhand LCD – abgeschätzt. Die realen Schichtdicken sind jedoch nicht bekannt. Der Trend zum Pervasive Computing kann bis 2030 noch weitaus extremer ausfallen,

z. B. indem ganze Büroeinrichtungen und der öffentliche Raum mit großflächigen, interaktiven Displays versehen sind.

Mit der Verabschiedung der WEEE-Richtlinie in der EU-25 können seit 2006 Fernseher zur Wiederverwendung, Wiederverwertung und Entsorgung zurückgegeben werden. Nach der WEEE-Richtlinie soll die Rückgewinnungsrate auf mindestens 75 % des durchschnittlichen Gewichts des Gerätes erhöht werden; die Wiederverwendung von Komponenten, Materialien und Rohstoffen soll auf mindestens 65 % des durchschnittlichen Gewichts des Gerätes erhöht werden.

Das Recycling von Displays mit anschließender Wiedergewinnung des Indiums ist in obigen Betrachtungen nicht berücksichtigt. Der wachsende Materialwert, die zu erwartende kürzere Produktlebenszeit, und die wachsende Verbreitung von LCD-TVs wird zu Millionen von ausrangierten LCD-Fernsehern in den nächsten Jahrzehnten führen (Fraunhofer IZM 2007). So hat zum Beispiel die Firma Sharp eine eigene Technologie entwickelt, wertvolles Indium aus der ITO-Schicht zu recyceln (Kawaguchi 2007, Fraunhofer IZM 2007). Der Rücklauf von LCDs ist derzeit noch gering. Die wertgebenden Anteile im werkstofflichen Recycling sind vor allem Gold und Kupfer. Wenn diese Stoffe aus dem Elektro- und Elektronik-Schrott zurückgewonnen werden, dann lohnt sich unter Umständen auch die Gewinnung von Indium aus dem konzentrierten Nebenstrom. Allerdings ändert der Glaseintrag durch das LCD auch das Schlackegleichgewicht, so dass die Metallausbeute bei hohem LCD-Eintrag beeinträchtigt werden könnte (Hagelüken 2008).

4.9 Infrarot-Detektoren in Nachtsichtgeräten

4.9.1 Technologiebeschreibung

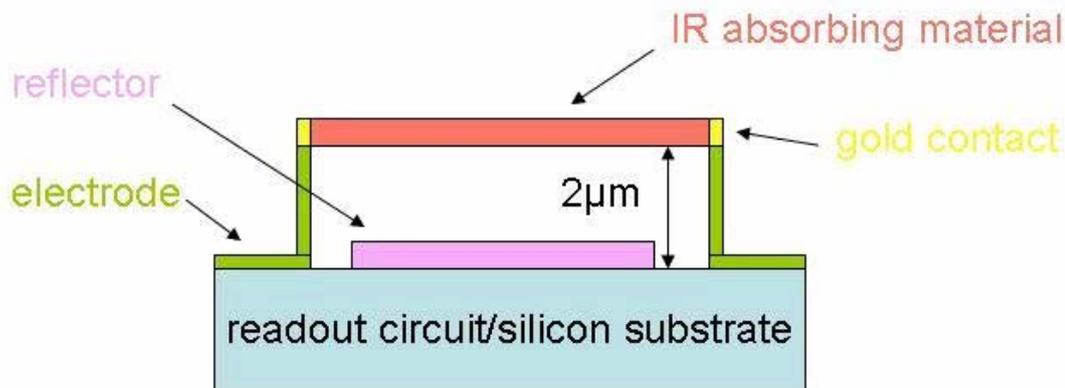
Infrarot-(IR)Detektoren werden in gekühlte und ungekühlte Detektoren eingeteilt. Innerhalb der ungekühlten IR-Detektoren kommen hauptsächlich so genannte Mikrobolometer und pyroelektrische Detektoren zum Einsatz. Dagegen basieren die gekühlten Detektoren vorwiegend auf Photodioden.

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.

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 temperaturabhängigen Widerstand (siehe Abbildung 4-21).

Abbildung 4-21: Mikrobolometer-Zelle



Quelle: Wikipedia 2008d

Einen Mikrobolometer-Array gibt es normalerweise in zwei Größen, 320 x 240 Zellen oder – etwas weniger teuer – mit 160 x 20 Zellen. Neue Technologien haben dazu geführt, dass auch Geräte mit 640 x 480 Zellen hergestellt werden. In älteren Geräten betrug die Zellgröße normalerweise 45 μm , in aktuellen Geräten ungefähr 22 μm . Die Entwicklung hat zum Ziel, unter 20 μm zu kommen. Viel kleiner kann es jedoch nicht werden, da die Größe durch die Wellenlänge begrenzt ist (Hoffmann 2008). Die Dicke des Absorbermaterials beträgt wenige Mikrometer. Viele unterschiedliche Materialien

werden als Detektorelement in Mikrobolometern verwendet. Die meistverwendeten sind jedoch amorphes Silizium und Vanadiumoxide (VO_x , V_2O_5 , VO_2).

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 (normalerweise Dünnschicht-) Materialien aus Galliumnitrid (GaN), Caesiumnitrat (Cs_3NO_3) oder Lithiumtanatalat (LiTaO_3) entwickelt (Gautschi 2002; Lang 2005).

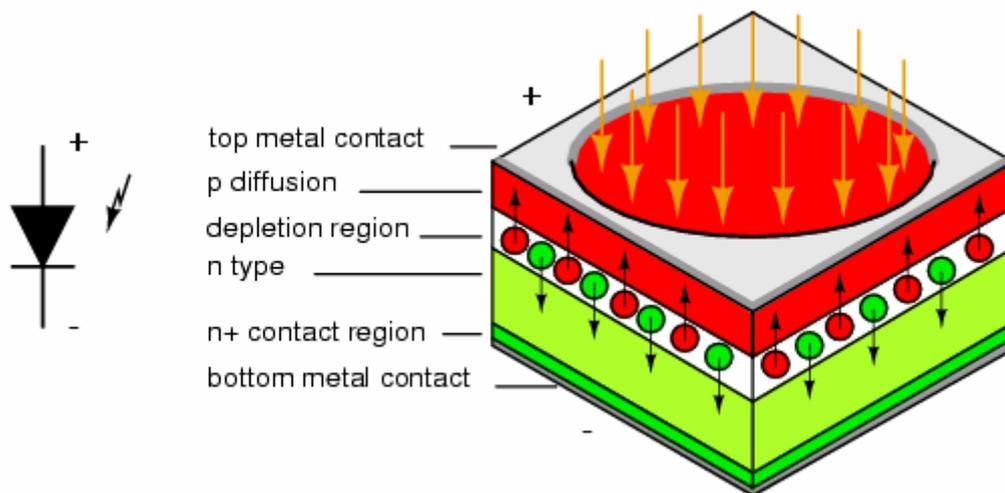
Gekühlte Infrarotdetektoren

Gekühlte Infrarotdetektoren bestehen aus einem Array aus Photodioden. Hunderte oder tausende (bis zu 2048) Photodioden mit einer typischen Größe von 0,025 mm mal 1 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 Thermografie-systems gegenüber den ungekühlten Detektoren wesentlich erhöht. Nachteile der Methode sind "Systemblindheit" bei Kühlungsausfall, lange Anlaufzeiten, bis das System auf Betriebstemperatur runtergekühlt ist sowie erhöhte Anschaffungs- und Betriebskosten (Wikipedia 2008e).

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 (Abbildung 4-22). Nur ein Photon mit einer höheren oder gleich hohen Energie²⁶ als die Bandlücke kann diesen Effekt hervorrufen. 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.

²⁶ Die Energie des Photons ist umgekehrt proportional zur Wellenlänge.

Abbildung 4-22: pn-Photodiode



Quelle: Kuphaldt 2000

Darüber hinaus gibt es noch Sonderfunktionsweisen von Photodioden, darunter Photoleitende Detektoren, photovoltaischer Detektor und pin Photodioden und Lawinendiioden.

Unterschiedliche Materialien für Infrarot-Photodioden sind:

Tabelle 4-22: Materialien für IR-Photodioden

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-Cadmium-Tellurid (HgCdTe) photoleitender Detektor	0,8 – 25,0

Quelle: Wikipedia 2008c

Thermografiekameras arbeiten entweder mit gekühlten oder mit ungekühlten Infrarotdetektoren. IR-Detektoren kommen in einer Vielzahl von Anwendungsbereichen zum Einsatz, darunter insbesondere (USGS 2008, Wikipedia 2008e):

- ▶ 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 Nachtsichtgeräte in Kraftfahrzeugen näher untersucht werden.

4.9.2 Rohstoffinhalt

Neben Germanium ist Vanadium in Nachtsichtgeräten ein möglicher Kandidat für erhöhte Ressourcennachfrage.

Germanium

Für den Einsatz in Nahinfrarotkameras wird Germanium von Indium Gallium Arsenid (InGaAs) verdrängt, weil InGaAs wesentlich weniger Dunkelstrom aufweist. Der weltweite Markt für Germaniumphotodioden wird auf wenige 100 Stück pro Jahr eingeschätzt, da für diesen Typ von Photodioden wenige Anwendungsfelder existieren. Hinzu kommt die Konkurrenz zu InGaAs, das im gleichen Wellenlängenbereich eingesetzt wird. InGaAs Photodioden reagieren sehr schnell, so dass sie vor allem in der Kommunikationsbranche eingesetzt werden (Brüggemann 2008; Carner 2008).

Die Fläche einer durchschnittlichen Germanium-Photodiode beträgt 1 mm² bei 0,5 mm Dicke. Bei einer Germanium-Dichte von 5,323 g/cm³ ergibt sich pro Diode die Menge von 0,0026 g. Nimmt man an, dass weltweit 500 Dioden jährlich verkauft werden, so werden nur 1,33 Gramm benötigt, ohne Berücksichtigung des Herstellungsabfalls. Dennoch ist dieser Bedarf zu vernachlässigen, wenn man sich vor Augen führt, dass bei der Herstellung eines Linsensystems bis zu 500 g Germanium benutzt werden (Brüggemann 2008; Carner 2008).

Wichtiger als der Einsatz von Germanium für Photodioden ist also die Verwendung von poly- oder monokristallinem Germanium für Fenster- und Linsen-Systeme sowie optische Gläser mit Infrarotdurchlässigkeit. Hier eignen sich auch Germanium Chalkogenid Gläser, mit einem Germaniumanteil von 20 – 30 %. Als Frontoptik in Wärmebildkameras wird Germanium für Wellenlängen zwischen 8 und 14 µm benutzt. Der derzeitige weltweite Germaniumbedarf für optische Systeme wird auf 15 – 20 t/a geschätzt (Reichelt 2008; Wikipedia 2008a; Wikipedia 2008b).

Vanadium

Es existieren zwei verschiedenen Nachtsichtsysteme für Autos auf dem Markt: Ferninfrarotsysteme (FIR) und Nahinfrarotsysteme (NIR). Ein FIR ist passiv und misst Wärmestrahlung der Wellenlänge 8 – 12 μm . NIR Systeme benutzen Nahinfrarotlichtquellen mit einer Wellenlänge von ca. 800 nm und messen das vom Objekt reflektierte Licht (Källhammer 2006).

Ferninfrarot Wärmebildkameras benutzen Mikrobolometer-Arrays aus amorphem Silizium oder Vanadiumoxid sowie pyroelektrische Detektoren aus Barium-Strontium-Titanit. Nach Dr. Hoffmann von "DIAS Infrared Systems" spielt die Verfügbarkeit von Vanadium oder amorphem Silizium eine Rolle. Es wird der Stoff eingesetzt, der am Markt gerade verfügbar ist (Hoffmann 2008).

Die Firma AutoLiv Inc. entwickelt das Night Vision System für BMW, bei dem eine Wärmebildkamera für Ferninfrarotlicht eingesetzt wird. Der Detektor der Kamera besteht aus einem Mikrobolometer-Array der Größe 320 x 240 Zellen mit einem Pixelraster von 25 μm . Als Absorbermaterial kommt Vanadiumoxid zum Einsatz. Aus Geheimhaltungsgründen wurde die Schichtdicke und genaue Materialzusammensetzung nicht mitgeteilt (Büttner 2008).

Bei der Berechnung des Materialverbrauchs wird hier angenommen, dass Vanadiumpentoxid (V_2O_5) zum Einsatz kommt. Das Zellvolumen wird hier mit 25 μm Seitenlänge und 1 μm Höhe berechnet. Bei einer Vanadiumpentoxidichte von 3,357 g/cm^3 unter Beachtung der molaren Massen von Vanadium und Sauerstoff ergeben sich die in folgender Tabelle angegebenen Materialverbrauchswerte:

Tabelle 4-23: Verbrauch von Vanadium für Mikrobolometer-Zellen (Seitenlänge 25 μm , Höhe 1 μm) und für einen Array von 320 x 240 Zellen.

Verbrauch	[kg/Zelle]	[kg/320 x 240 Array]
Vanadium	1,18E-12	9,02E-08

4.9.3 Foresight industrielle Nutzung

Nachtsichtsysteme sind im Jahr 2000 als erstes in dem 2000 Model vom Cadillac Deville (FIR) und danach von Lexus/Toyota im Jahr 2002 (NIR) eingeführt worden. Trotz des ersten Interesses der Käufer und optimistischer Prognosen haben sich Nachtsichtgeräte nicht im Markt etabliert. 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. Das Marktpotenzial ist derzeit jedoch noch begrenzt, da die Systeme

me noch für um die 2.000 US \$ als Zubehör für Luxuslimousinen angeboten werden. Für die weite Verbreitung der Systeme ist eine starke Kostensenkung nötig (Källhammer 2006).

Im Jahr 2006 wurden etwa 613.000 Autos der oben genannten Klassen (BMW, Mercedes und Honda), in denen FIR Systeme installiert werden, verkauft (BMW Group 2006; DaimlerChrysler 2006; Honda Motor Co. 2007). Hier wird angenommen, dass in etwa 10 % der Autos FIR Infrarotsysteme mit Vanadiumpentoxid-Mikrobolometerdetektoren installiert wurden²⁷. Projektion A geht von einem jährlichen Wachstum von 9 %, Projektion B von 3 % aus. So werden im Jahr 2030 je nach Szenario 125.000 bzw. 485.000 FIR Systeme installiert.

Tabelle 4-24: Anzahl weltweit verkaufter FIR Kameras

Anzahl	2006	2030
Projektion A	61.359	485.416
Projektion B	61.359	124.730

4.9.4 Foresight Rohstoffbedarf

Folgende Tabelle zeigt das Ergebnis der Abschätzung für Vanadium und Germanium:

Tabelle 4-25: Globaler Rohstoffbedarf für FIR Systeme in Autos

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030
Vanadium	62.400 t	5,54 g	11,3 – 43,8 g
Germanium	90 t	unbekannt	unbekannt

Die weltweite Minen-Produktion an Vanadium im Jahr 2006 lag bei 62.400 t. Nach dieser Abschätzung ist der Vanadiumverbrauch von 44 g bzw. 11 g für Mikrobolometer-Array-Wärmebildkameras zu vernachlässigen. Hier ist darauf hinzuweisen, dass nur ein Sektor von vielen für Wärmebildkameras abgeschätzt wurde.

Für das aus Ressourcensicht viel wichtigere Germanium ist keine Abschätzung gelungen. Auch nach mehreren Interviews fand sich kein Hersteller, der bereit ist, den Ger-

²⁷ Für Ferninfrarot Wärmebildkameras in Autos eignen sich auch pyroelektrische Systeme. Für die Berechnung des Rohstoffbedarfs wird hier jedoch von einem Mikrobolometer-Array ausgegangen. Dieses System wird in Fahrzeugen von BMW eingesetzt.

maniumgehalt realistisch zu taxieren²⁸. Bei Vanadium bestehen Unsicherheiten über die Absorberschichtdicke. Details zu den Stoffen und der Schichtdicke werden von den Herstellern von Mikrobolometern nicht verraten.

Nachtsichtsysteme für Autos ist nur ein Anwendungsfeld, in denen Wärmebildkameras angewendet werden. Der Gesamtmarkt für Wärmebildkameras müsste genauer festgestellt und auf dessen Basis Szenarien erstellt werden.

²⁸ Eine überschlägige Multiplikation des Maximalwertes von 500 g pro Linsensystem mit den Projektionen ergibt dass der Germaniumbedarf durchaus erheblichen Einfluss auf die globale Germaniumnachfrage haben kann.

4.10 Weiße LED

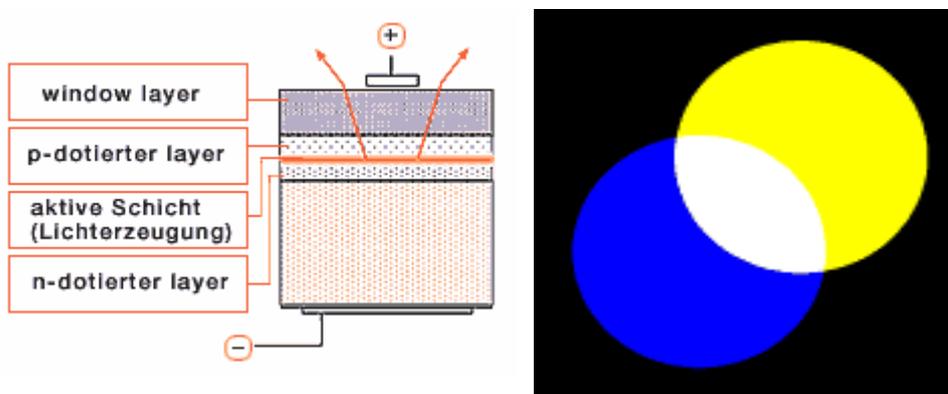
4.10.1 Technologiebeschreibung

Eine Leuchtdiode LED 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 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 Abbildung 4-23). WLEDs erreichen mittlerweile eine Leuchtstärke bis zu 94 Lumen/W (Steinfeldt et al. 2004; VITO et al. 2007).

Je nach Halbleitermaterial wird Licht in einer bestimmten Farbe abgegeben. Für blaue Dioden werden die Halbleitermaterialien auf Basis von (Indium-)Gallium Nitrid (InGaN oder GaN) hergestellt. Auf einem einkristallinen Grundmaterial (Wafer) werden unterschiedliche Halbleiterschichten aufgetragen. Eine moderne blaue Leuchtdiode besteht aus einer Vielzahl verschiedener Materialien wie Gallium-Nitrid als Basismaterial, Indium-Gallium-Nitrid als leuchtende Schicht und Aluminium-Gallium-Nitrid zur Effizienzsteigerung.

Abbildung 4-23: Funktionsweise einer Light Emitting Diode



Quellen: OSRAM 2008; Steinfeldt et al. 2004

Die Leuchtkraft und Lebensdauer von WLEDs nimmt rapide mit der Umgebungstemperatur ab. Deswegen können keine großen Energiedichten oder kompakte Lichtquellen hergestellt werden. WLEDs werden deshalb hauptsächlich dort benutzt, wo kleine weiße Lichtquellen – kleine Leuchten im niedrigen Wattbereich (typischerweise 1 – 5 W) – benötigt werden.

Der Hauptmarkt ist Display Hintergrundbeleuchtung für mobile elektronische Geräte und für Notebook LCDs. Auch für Straßensignale werden WLEDs eingesetzt. Außerdem werden sie als Lichtquelle in Büro, Haushalt und Freizeit eingesetzt. Der Einsatz von WLEDs für Auto-Frontscheinwerfer wird in Zukunft ein wichtiger Markt werden. Handys werden nicht mehr wie in den letzten Jahren die Treiber des LED-Marktes sein. Das Wachstum von WLED Hintergrundbeleuchtungen für Farbdisplays in mobilen elektronischen Geräten und Laptops gleicht jedoch den Rückgang des Handymarktes aus. Sich entwickelnde Märkte sind WLEDs für Frontscheinwerfer, Signalanwendungen und Beleuchtungen mit Wachstumsraten zwischen 5 und 15 % (Steele 2007; Steinfeldt et al. 2004).

4.10.2 Rohstoffinhalt

Die Mengenangaben beruhen auf Zahlen der Produktionsanlage für LEDs der Universität Magdeburg. Die LEDs werden in diesem Verfahren aus 5 Zoll großen Wafern gewonnen, von denen jeweils 7 Stück auf einem sogenannten Rang Platz finden. Für die Herstellung eines Rangs werden 5 g Trimethylgallium, 1 g Triethylgallium und 1,5 g Trimethylindium benötigt. Das ergibt mit Verschnitt ca. 900 je ein Quadratmillimeter große Dioden, die in dieser Größe als Hochleistungsdioden bezeichnet werden (Dadgar 2008). Aus den obigen Mengenangaben sind die in Tabelle 4-26 aufgeführten Kilogrammangaben pro Diode errechnet.

Tabelle 4-26: Gesamtverbrauch von Indium und Gallium bei der Herstellung von Hochleistungs-WLEDs der Größe 1mm²

Gesamtverbrauch	[mg/LED]
Indium	0,17
Gallium	0,53

Quelle: eigene Berechnungen, basierend auf Dadgar 2008

4.10.3 Foresight industrielle Nutzung

Im Jahr 2006 sind etwa 31 Mrd. Hochleistungs LEDs (High Brightness LEDs) verkauft worden. 48 % des Marktvolumens (in Mrd \$) fiel auf weiße LEDs (entspricht ungefähr

15 Mrd. Einheiten). Bis 2011 wird prognostiziert, dass der Gesamtmarkt um 38 % wächst (6,5 % p.a.) und der Anteil der WLEDs auf 60 % steigt (Steele 2007).

Geht man davon aus, dass der Markt weiterhin bis 2030 um 6,5 % wächst und der Anteil der WLEDs bei 60 % konstant bleibt, werden im Jahr 2030 84 Mrd. WLEDs verkauft (Projektion A). Geht man von Wachstumsraten des Gesamtmarktes von 2011 – 2020 von 15 % p.a. aus und von 2020 – 2030 von 10% p.a. und steigt der Marktanteil WLED auf 70 %, so werden im Jahr 2030 271 Mrd. WLEDs verkauft (Projektion B) (siehe Tabelle 4-27).

Tabelle 4-27: Projektionen der Anzahl verkaufter LEDs und WLEDs

	Anzahl [Mrd.]		Wachstumsrate [%]		
	2006	2030	2006 – 2011	2011 – 2020	2020 – 2030
Projektion A					
WLEDs	15	84	11,0	6,0	6,0
LEDs	31	141	6,5	6,5	6,5
Projektion B					
WLEDs	15	271	11,0	16,0	11,0
LEDs	31	388	6,5	15,0	10,0

Quelle: eigene Berechnungen

4.10.4 Foresight Rohstoffbedarf

Tabelle 4-28 gibt den Indium und Galliumbedarf für WLEDs wieder, der auf Basis der Rohstoffangaben in Tabelle 4-26 und den Marktwachstumsszenarien in Tabelle 4-27 berechnet worden ist.

Tabelle 4-28: Indium- und Galliumbedarf für WLEDs (t)

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030
Indium	580	3	14 – 46
Gallium	99	9	44 – 143

Quelle: eigene Berechnungen

Im Jahr 2006 wurden etwa 3 t Indium für die Herstellung von WLEDs benötigt. Das ist wenig im Vergleich zu der Gesamtproduktion im Jahr 2006 von 580 t. Wächst der Markt wie in den Projektionen A und B angenommen, steigt der Rohstoffbedarf für WLEDs auf das 5 bis 15-fache (14 – 46 t Indium). Das wäre zwischen 2,4 und 8 % der weltweiten Indiumproduktion im Jahr 2006.

Der Galliumbedarf für WLED betrug im Jahr 2006 9 t. Gemäß USGS (2007) lag die weltweite Produktion von Gallium-Metall im Jahr 2006 bei 99 t. Steigt der Bedarf auf 44 – 143 t Gallium, so wird 2030 bis zum 1,5-fachen der geschätzten weltweiten Galliumproduktion im Jahr 2006 für WLEDs benötigt.

Die Abschätzung des Marktes bis zum Jahr 2011 beruht auf Abschätzungen von "Strategies Unlimited". Projektion A stellt das "Business as usual" Szenario da, Szenario B spiegelt ein etwas dynamischeres Wachstum bis 2030 wieder. Beide Szenarien können als realistisch angesehen werden.

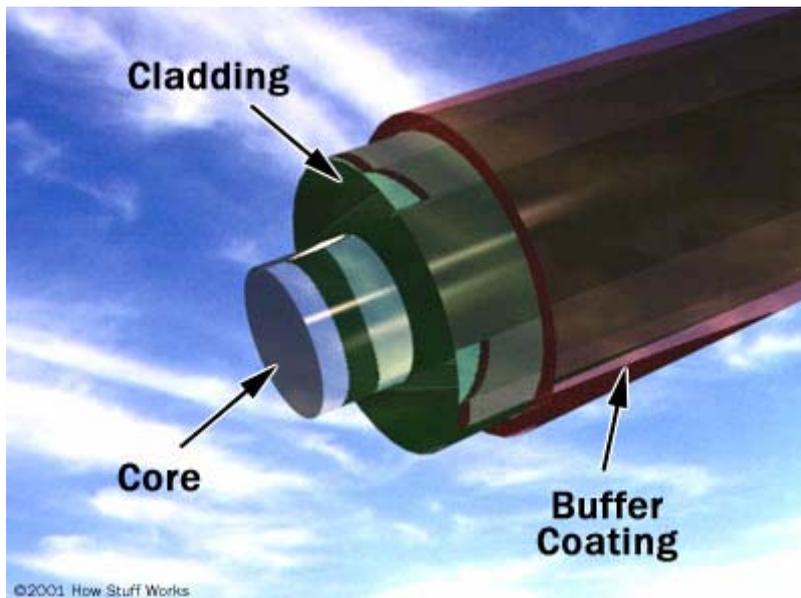
Die spezifischen Rohstoffmengen pro Diode können je nach Hersteller und Geometrie der LEDs variieren. Die hier verwendeten Rohstoffangaben beruhen auf einer mündlichen Mitteilung eines Mitarbeiters der Uni Magdeburg nach Daten der dort installierten Produktionsanlage (Dadgar 2008).

4.11 Glasfaserkabel

4.11.1 Technologiebeschreibung

Glasfasern sind lange dünne Adern, die aus zwei konzentrischen hoch reinen Quarzglasschichten – dem Kern (Core) und dem Mantel (Cladding) – bestehen, die von einer schützenden Hülle (Buffer Coating) umgeben sind (siehe Abbildung 4-24). Lichtimpulse bewegen sich durch den Glaskern ohne den Glasmantel zu durchdringen, da der Mantel einen geringeren Brechungsindex als der Kern hat (Totalreflexion). Elektrische Signale werden für die Übertragung in einem Transmitter in Lichtsignale umgewandelt. Als Lichtquellen werden LEDs oder Laser benutzt. Der Receiver wandelt das ankommende digitale Lichtsignal wieder in elektrische Signale um.

Abbildung 4-24: Aufbau einer Glasfaser



Quelle: Freudenrich 2008

Es wird zwischen Multi-Mode und Single-Mode Glasfasern unterschieden.

Multi-Mode Glasfasern

Multi-Mode Glasfasern haben typischerweise einen Durchmesser von 50 bis 100 μm . Multi-Mode Fasern ermöglichen eine sehr schnelle Datenübertragung mit einer großen Bandbreite auf mittlerer Weglänge (2 – 275 km). In langsameren lokalen Netzen (Local Area Networks-LAN) werden LED-Lichtquellen der Wellenlänge 850 und 1300 nm, bei Übertragungsraten von Gigabits pro Sekunde oder mehr, Laser der Wellenlänge 850 nm und 1310 nm eingesetzt. Die Lichtwellen dispergieren in mehrere Schwingungsmodi, während sie sich durch den Kern bewegen. Die Überlagerung der Modi kann bei

längeren Strecken zu Signalstörungen am Empfängerende und zu inkorrekt und unvollständiger Datenübertragung führen.

Single Mode Glasfasern

So genannte Single-Mode Glasfasern bieten höhere Übertragungsraten und bis zu 50 mal längere Übertragungswege als Multimode-Glasfasern. Single-Mode Glasfasern haben einen kleineren Durchmesser (8,3 – 10 μm) als Multi-Mode Fasern. Sie übertragen nur den Schwingungsmodus niedrigster Ordnung mit einer Wellenlänge zwischen 1300 – 1320 nm. Die Lichtimpulse dispergieren wenig. Störungen, die durch sich überlappende Lichtimpulse entstehen, werden so vermieden. Single-Mode Fasern weisen die geringste Signaldämpfung und die höchste Übertragungsgeschwindigkeit aller Glasfasertypen auf und verfügen über eine hohe Bandbreite. Single-Mode Glasfaserkabel werden für Telekommunikation- und Kabelfernsehnetzwerke benutzt. Wegen der geringen Signaldämpfung werden weniger Verstärker für lange Distanzen benötigt. Zusätzlich können die Lichtsignale bis zu Übertragungsraten von über 40kb/s moduliert werden.

Jedes Jahr werden Millionen von Kilometern an Glasfaserkabeln weltweit installiert. Glasfaserkabel werden benutzt für (Freudenrich 2008; Wikipedia 2008f; ARC Electronics 2008):

- ▶ die Backbone Architektur bei Telefonnetzen,
- ▶ die Verbindung von Stadttelefonnetzen,
- ▶ Kabelfernsehnetzwerke,
- ▶ Local Area Networks (LAN) in Universitäten, Gebäuden, Fabriken etc.,
- ▶ in Energieversorgungsunternehmen, die vermehrt Glasfaserkabel für die Kommunikation einsetzen und ihr Energienetz überwachen,
- ▶ für transkontinentale Tiefsee-Internetverbindungen und kontinentale Verbindungen von Netzknoten sowie
- ▶ FTTx: FTTP – fibre to the premises (Glasfaser zum Grundstück), FTTH – fibre to the home (Glasfaser zum Heim), FTTB – fiber to the building (Glasfaser zum Gebäude).

Die Haupttreiber sind erstens FTTx Anwendungen und zweitens der Telekommunikationssektor in sich entwickelnden Märkten wie China. Weiterer Treiber ist die Verbesserung und Aufrüstung bestehender Netzwerke für schnellere Internetverbindungen oder neue Dienste wie Internetfernsehen (IPTV) oder Internettelefonie (voice over IP). Ebenso wird erwartet, dass Netzwerke der nächsten Generation (Next Generation

Networks – NGN) und Anwendungen für Hochgeschwindigkeits-Datenübertragung die Nachfrage nach Glasfaserkabel weiter antreiben werden.

4.11.2 Rohstoffinhalt

Optische Glasfasern werden produziert, indem zuerst ein Glaszylinder mit großem Durchmesser und einem sorgfältig überprüften Brechungsindexprofil hergestellt wird. Aus diesem werden danach die Glasfasern gezogen. Germanium wird als Dotiersubstanz für reines Silica Glas benutzt, um den Brechungsindex zu erhöhen. Die Herstellung von Glasfasern besteht aus zwei Prozessen:

- ▶ Herstellung einer Vorform aus einem Glaszylinder mittels zwei möglicher Abscheidungsprozesse²⁹ und
- ▶ Ziehen von Glasfasern aus dem Glaszylinder³⁰.

In USGS (2007) wurde geschätzt, dass 31 % des weltweiten Germaniummetall-Verbrauchs auf Glasfaser-Optik entfällt. Das heißt, dass im Jahr 2006 von 90 t Germanium fast 28 t zur Produktion von Glasfasern benutzt worden sind. Eine Veröffentlichung von KMI Research gibt an, dass im Jahr 2006 etwa 89 Mio. km Glasfaserkabel installiert worden sind (PennWell 2007). Unter der Annahme, dass die weltweite Glasfasermenge nahezu vollständig in Form von installierten Glasfaserkabeln aufgenommen wird³¹ ergibt sich ein Germaniumbedarf von im Schnitt 0,3 Gramm pro Kilometer installierte Glasfaserleitung (siehe Tabelle 4-29).

²⁹ Bei der modifizierten chemischen Abscheidung aus der Dampfphase "modified chemical vapour deposition" rotiert ein hohler Silikatglaszylinder von ca. 40 cm Länge horizontal auf einer Drehmaschine. Gase wie Siliziumtetrachlorid (SiCl_4) und Germaniumtetrachlorid (GeCl_4) werden zusammen mit Sauerstoff in den Zylinder eingebracht. Das Gas wird mittels eines externen Wasserstoffbrenners auf eine Temperatur von 2300° C erhitzt, bei der die Tetrachloride mit dem Sauerstoff reagieren und zu Siliziumdioxid (SiO_2) und Germaniumdioxid (GeO_2) Molekülen werden. Die Siliziumdioxid- und Germaniumdioxidmoleküle lagern sich auf der Innenseite des Hohlzylinders ab und verschmelzen zu Glas. Bei der äußeren Abscheidung aus der Dampfphase ("outside vapour deposition, axial vapour deposition") wird das Glas mittels Flammenhydrolyse, ein Prozess bei dem Siliziumtetrachlorid und Germaniumtetrachlorid durch die Reaktion mit Wasser in einer Knallgasflamme oxidiert, hergestellt.

³⁰ Nach Beschichtung und Testen des Brechungsindex wird der Glaszylinderrohling in einen Faserziehturm gestellt. Der Rohling wird in einen Graphitofen der Temperatur 1900°C bis 2200°C gesenkt, wo die Spitze schmilzt und aus den entstehenden Tropfen Glasfasern bis zu einer Länge von 2,2 km gezogen werden (Freudenrich 2008; Wikipedia 2008; ARC Electronics 2008).

³¹ Andere Bau- und Applikationsformen, wie z. B. der Einsatz in optoelektronischen Computern, sind vermutlich mengenmäßig von untergeordneter Bedeutung.

Tabelle 4-29: Durchschnittlicher Verbrauch von Germanium pro km installiertes Glasfaserkabel

Verbrauch	[g/km]
Germanium	0,313

Quelle: eigene Berechnungen, basierend auf USGS 2007 und PennWell 2007

4.11.3 Foresight industrielle Nutzung

Nach der 2007er Ausgabe vom "Weltweiter Glasfaser und Kabelmarkt Bericht" von KMI Research sind im Jahr 2006 ca. 89 Mio. km Glasfaserkabel (Single-Mode und Multi-Mode) installiert worden. Es wird prognostiziert, dass bis 2011 die jährliche Wachstumsrate bei 9 % liegt. Geht man davon aus, dass der Markt weiterhin um 9 % wächst, so werden im Jahr 2030 700 Mio. km (Projektion A) installiert. Geht man von einem dynamischeren Wachstum bis 2030 aus, so werden im Jahr 2030 1,7 Mrd. km Glasfaserkabel verlegt (Projektion B) (siehe Tabelle 4-30).

Tabelle 4-30: Jährlich installierte Kilometer Glasfaserkabel im Jahr 2006 (Basisjahr) und im Jahr 2030 abhängig von den Wachstumsraten

	Mio. km		Wachstumsrate [%/a]		
	2006	2030	2006 – 2011	2011 – 2020	2020 – 2030
Projektion A	89	706	9	9	9
Projektion B	89	1.720	12	15	12

Quelle: eigene Berechnungen, basierend auf PennWell 2007

4.11.4 Foresight Rohstoffbedarf

Tabelle 4-31 gibt den Germaniumbedarf für Glasfaserkabel wieder, der auf Basis der Rohstoffangaben in Tabelle 4-29 und den Marktwachstumsszenarien in Tabelle 4-30 berechnet worden ist.

Tabelle 4-31: Globaler Rohstoffbedarf für Glasfaserkabel in t

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030
Germanium	90	28	220 – 540

Im Jahr 2006 (Basisjahr) wurden 31 % der weltweiten Germaniumproduktion von 90 t für Glasfaserkabel genutzt. Bei einem moderaten Wachstum in Projektion A verachtfacht sich der Germaniumbedarf für Glasfaserkabel im Jahr 2030. Der Bedarf liegt dann bei mehr als dem Doppelten der Jahresproduktion im Jahr 2006 von 90 t. Geht

man von einem dynamischeren Wachstum aus, so werden im Jahr 2030 540 t Germanium für Glasfaserkabel benötigt, 2,4 mal so viel wie bei moderatem Wachstum.

Der Anteil der Nutzung von Germanium in Glasfasern wird in USGS 2008 mit 35 %, in USGS 2007 mit 31 %, in USGS 2006a mit 20 % und in USGS 2006b mit 24 % angegeben. Diese Unsicherheit wirkt sich auch auf die Robustheit der Rohstoffprognose aus. Insgesamt scheint die Nachfrage nach Germanium für Glasfaserkabel weiterhin deutlich zu steigen.

Der Rohstoffinhalt pro Kilometer Kabel kann nur als Durchschnittswert angesehen werden. Je nach Kabelart (Multimode, Singlemode) und Anzahl der Litzen unterscheidet sich der Germaniumbedarf. Andere Glasfaseranwendungen, wie z. B. in optoelektronischen Computern, sind in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt.

Es ist nicht klar, wann der Markt gesättigt ist und die Netze nicht mehr zusätzlich ausgeweitet werden. Dann müssen bestehende Netze jedoch aufgerüstet oder erneuert werden. Es kann also sein, dass nach Anstieg der jährlichen Wachstumsraten die Degression stärker ist.

4.12 Mikroelektronische Kondensatoren

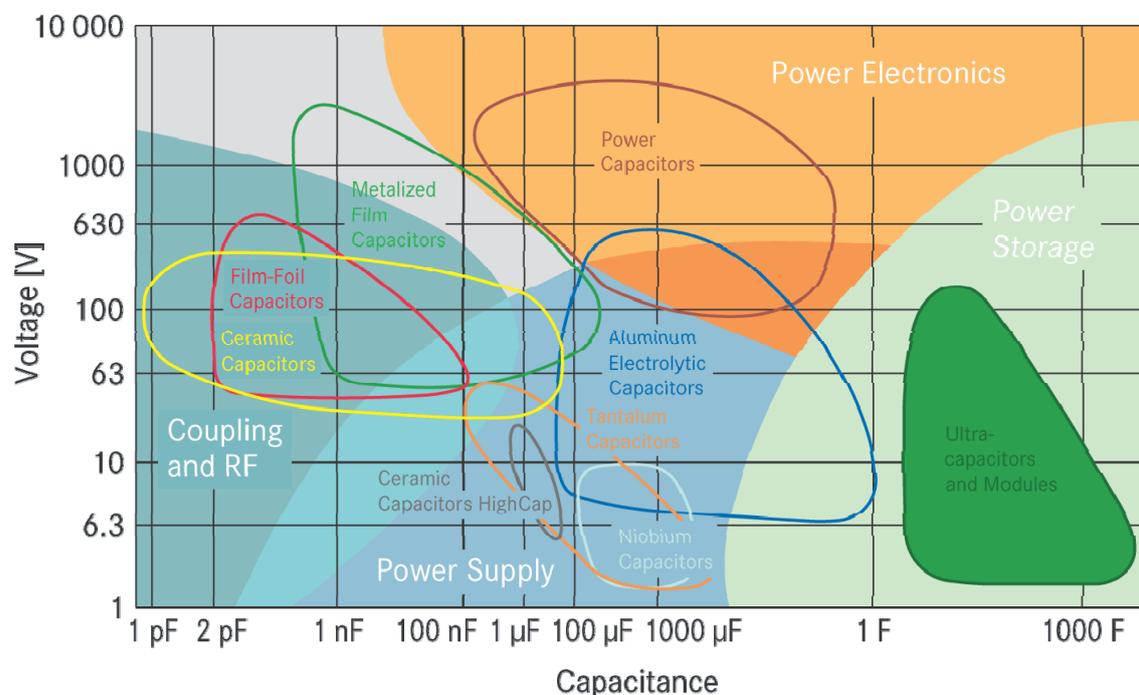
4.12.1 Technologiebeschreibung

Kondensatoren dienen der Speicherung von elektrischer Ladung und werden u. a. zur Aufrechterhaltung eines gleichmäßigen Stromes in Integrierten 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 Unterscheidungsline sind Elektrolyt- und Keramik-basierte Kondensator-technologien. 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.

Die folgende Abbildung zeigt Applikationsbeispiele verschiedener Kondensator-technologien in Abhängigkeit von der Spannung und Kapazität.

Abbildung 4-25: Applikationsbeispiele verschiedener Kondensator-technologien



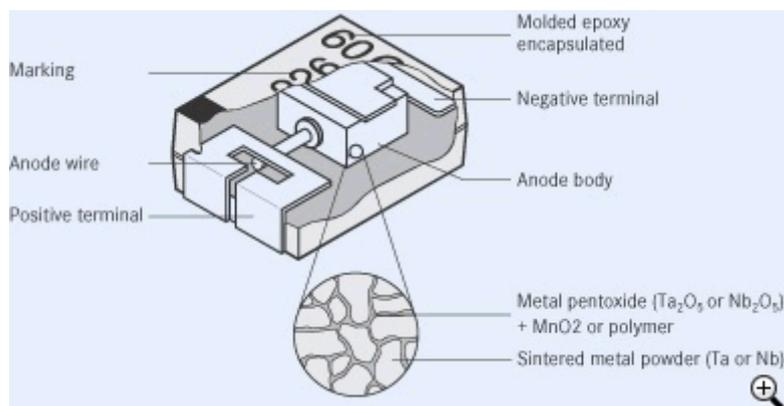
Quelle: epcos 2006

Im Leistungsbereich von Tantal-basierten Elektrolytkondensatoren, also Niederspannung mit mittlerer Kapazität, gibt es insbesondere Überlappungen mit Niob-basierten

Elektrolytkondensatoren, aber auch mit Aluminiumbasierten Elektrolytkondensatoren und Keramikkondensatoren. 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).

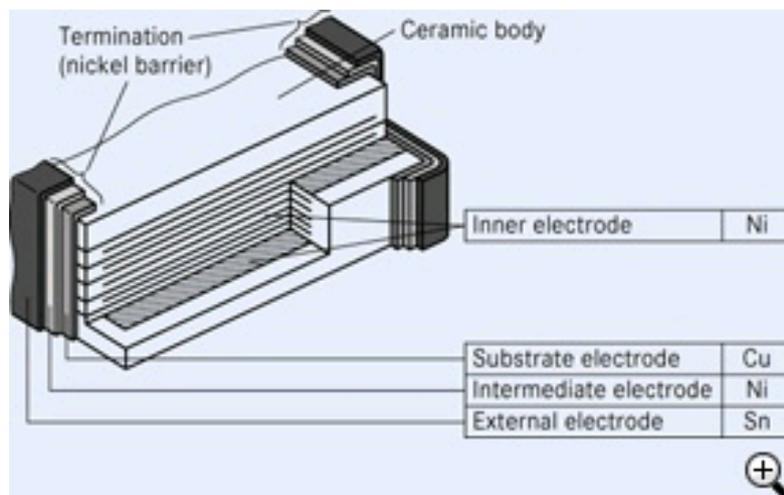
Im Folgenden sind Aufbau und Funktionsweise der beiden Haupttypen Tantal-/Niobbasierte Elektrolytkondensatoren und MLCC beschrieben.

Abbildung 4-26: Aufbau eines Tantal-/Niobbasierten Elektrolytkondensators



Quelle: epcos 2006

Abbildung 4-27: Aufbau eines Keramischen Vielschichtkondensators (MLCC)



Quelle: epcos 2006

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

- ▶ Tantalkondensatoren mit MnO_2 -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-Konvertern in Notebooks, PDA, Telekommunikation und anderen Anwendungen.
- ▶ Nioboxidkondensatoren sind die sicherste Alternative zu Tantal-Kondensatoren mit gutem Preis-Leistungsverhältnis. Die exzellente 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 2008).

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, einer 100 %-igen Tochter der Bayer AG (Stand: November 2008), ist ein wichtiger Tantalverarbeiter in Deutschland angesiedelt (ca. 20 – 30 % der Weltproduktion). Der Markt für Kondensatoren mit hoher Kapazität wird von 8 Herstellern dominiert, darunter auch die in Deutschland ansässige Firma EPCOS.

4.12.2 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. Folgende Tabelle zeigt die Zusammensetzung von Tantalkondensatoren gemäß ZVEI-"Umbrella-Spezifikation" (ZVEI 2008):

Tabelle 4-32: Zusammensetzung von Tantal-Kondensatoren gemäß ZVEI-"Umbrella-Spezifikation"

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

Quelle: ZVEI 2008

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 2003b).

Ein MLCC-Kondensator besteht aus den aktiven Komponenten und dem Anschluss. Folgende Tabelle zeigt die Zusammensetzung von MLCC-Kondensatoren gemäß ZVEI-"Umbrella-Spezifikation" (ZVEI 2003b):

Tabelle 4-33: Zusammensetzung von MLCC gemäß ZVEI-"Umbrella-Spezifikation"

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)			
	Blei (Bleilot)	0	3	0
Summe				100

Quelle: ZVEI 2003a

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 (EPCOS AG 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 2003a).

4.12.3 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, Dieselzündungssteuerung 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. Eine Voraussage bis 2030 in einem sich derart dynamisch entwickelnden Feld ist mit großen Unsicherheiten behaftet, wie auch ein Blick in die jüngere Vergangenheit illustriert:

- ▶ Für die ersten Pentium-Rechner brauchte man rund 50 Kondensatoren insgesamt; im Jahr 2001 waren es bereits 200 – 300 (Werner und 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.

2007 haben die Verkäufe an Tantalkondensatoren nach Stückzahlen fast die Werte aus dem Jahr 2000 mit 6 Mrd. Stück erreicht. 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 möglich ist, sind Niobkondensatoren aufgrund ihrer geringeren Kosten oft erste Wahl.

4.12.4 Foresight Rohstoffbedarf

Die Verknappung an Tantal für miniaturisierte Kondensatoren 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 Tantalkondensatoren mit 6 Mrd. Stück rund 1/3 des gesamten Teilmarktes ausmachen. Auf Niobkondensatoren können rund 1/3 und auf MLCC ebenfalls rund 1/3 entfallen. 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 2030 gibt es in der Simulation folgende Entwicklungen:

- ▶ Projektion A: Wachstum des Gesamtmarktes um 4 %/a bis 2030, Beibehaltung der heutigen Marktanteile und keine Materialeffizienz.
- ▶ Projektion B: Wachstum des Gesamtmarktes um 7 %/a, MLCC-Kondensatoren haben 2030 60 % Marktanteil; Tantal- und Niobkondensatoren nur noch jeweils 20 %; als Elektrode in MLCC-Kondensatoren wird zu 90 % Nickel-Zinn eingesetzt

und die Materialeffizienz bei Elektrolytkondensatoren beträgt 10 % bzw. bei MLCC 25 %.

Die Zahl der Kondensatoren wächst in diesen Projektionen von rund 18 Mrd. Stück im Jahr 2006 auf 44 – 85 Mrd. Stück im Jahr 2030. Aufbauend auf diesen Annahmen ergeben sich folgende zukünftige Rohstoffbedarfe:

Tabelle 4-34: Foresight Rohstoffbedarf für miniaturisierte Kondensatoren [t]

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030
Tantal	1.400	551	1.360 – 1.410
Niob	44.500	288	1.360 – 1.410
Barium	7.960.000	509	1.250 – 3.260
Titan	201.000	177	437 – 1.140
Silber	20.200	210	369 – 518
Palladium	224	7,2	9,22 – 17,7
Mangan	11.900.000	109	266 – 267
Nickel	1.580.000	288	710 – 2.030
Zinn	302.000	105	259 – 444
Antimon	134.000	27,6	67,9 – 70,6

Quelle und Anmerkungen: Barium als Barit, Titan als Titan-Metall; eigene Berechnungen

Tantal wird in beiden Projektionen im Jahr 2030 deutlich mehr nachgefragt werden als 2006. Heute gehen rund 50 % der Tantalproduktion in Höhe von 1400 Tonnen in die Elektronikindustrie, davon ein Großteil zur Kondensatorfertigung. Die rund 550 t sind vermutlich eine gute Schätzung des tatsächlichen heutigen Tantalbedarfs. Das Wachstum des Gesamtmarktes bis 2030 überkompensiert Materialeinsparungen und den sinkenden Marktanteil. Der gesamte Bedarf an Tantal 2030 liegt in der Größenordnung der heutigen globalen Tantalproduktion. Die äquivalenten Niobmengen heute und in Zukunft fallen angesichts einer Jahresproduktion 2006 von 45.000 t kaum ins Gewicht.

Der 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 Keramikkondensatoren 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 Keramikkondensatoren ersetzt werden können. Zum Recycling miniaturisierten Kondensatoren liegen keine Angaben vor. Wegen ihrer Materialvielfalt und der geringen Mengen ist das Recycling aber stark erschwert.

4.13 Hochleistungs-Mikrochips

4.13.1 Technologiebeschreibung

Die Masse der integrierten Schaltkreise basiert 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" (siehe Abbildung 4-28).

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")³², Musterung ("patterning")³³, Dotierung ("doping")³⁴ und Hitzebehandlung ("heat treatment")³⁵.

Diese 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

32 Beim Beschichten werden dünne Schichten auf die Waferoberfläche aufgebracht. Diese Schichten können Isolatoren, Halbleiter oder Leiter sein. Verschiedene Materialien (z.B. Siliziumdioxid, polykristallines Silizium, Silizium Germanium) werden mit unterschiedlichen Prozessen (Thermische Oxidation, chemische Dampfabscheidung, Verdampfung, Sputtern, Galvanisierung) auf den Wafer (z. B. Silizium oder GaAs) abgeschieden.

33 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.

34 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.

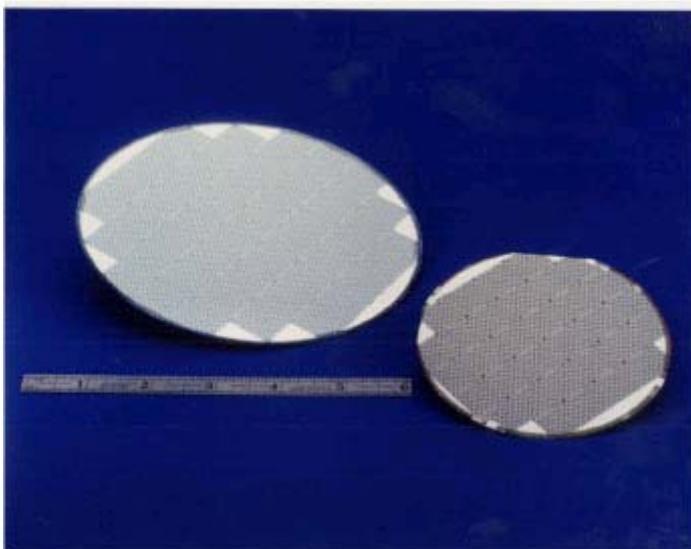
35 Die Hitzebehandlung findet statt, um bestimmte Eigenschaften hervorzurufen. Es wird kein zusätzliches Material hinzugefügt oder entfernt.

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 Photomikrograph vom gesamten Chip nicht erkannt werden können.

Derzeit sind mehr als 90 % der weltweit produzierten Wafer aus Silizium. Jedoch sind einige elektrische Eigenschaften von GaAs (s. Abbildung 4-28) 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 störanfällig und haben einen geringeren Energiebedarf. Wegen dieser Eigenschaften sind GaAs-Schaltkreise für Hochfrequenzleistungsanwendungen in Mobiltelefonen, für drahtlose lokale Netze (WLAN) und GPS besonders geeignet (Hischier et al. 2007; Wikipedia 2008a).

Abbildung 4-28: Chips auf GaAs-Wafern

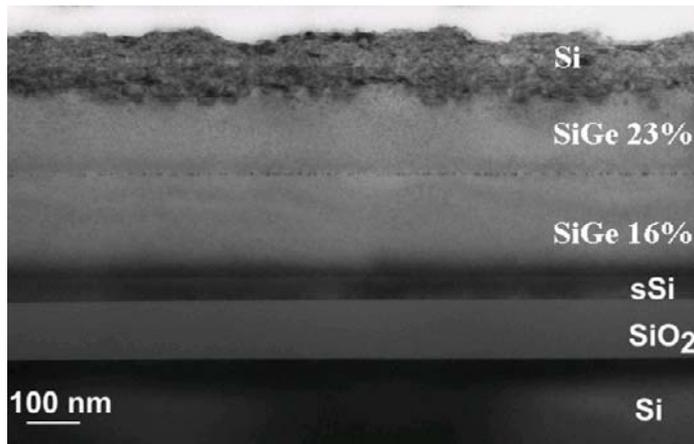


Quelle: NIST 2008

Reine Germaniumwafer (bulk Germanium) 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 Abbildung 4-29). Mit Silizium Germanium (SiGe) wird die Legierung $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ bezeichnet, welche aus einem molaren Verhältnis von Silizium und Germanium besteht.

Abbildung 4-29: 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. Derzeit dominieren SiGe BiCMOS in Hochfrequenz-Sendern und -Empfängern für Mobilgeräte. Im Jahr 2005 wurden SiGe Wafer im Wert von nahezu einer Milliarde US-Dollar verkauft, der Hauptteil davon für Anwendungen im Mobilfunkbereich (Elbaz 2008; Kempf 2005; USGS 2006a; USGS 2007; Wikipedia 2008b).

Die Kristallzucht von 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 Compound Materials 2008; Splettstößer 2008).

4.13.2 Rohstoffinhalt

Nach USGS (2006b) betrug die Nachfrage nach reinen GaAs Wafern 75 % (bulk GaAs) der globalen Produktionskapazität von ca. 800.000 6" Waferäquivalenten. Ein 6 Zoll GaAs Wafer wiegt nach Angabe des Waferherstellers "Freiberger Compound Materials GmbH" 63,4 g. Beachtet man die unterschiedlichen Molmassen der Elemente Gallium und Arsen erhält man die in Tabelle 4-35 angegebenen Mengen pro 6" GaAs Wafer. Hier ist anzumerken, dass nur mit dem reinen Rohstoffinhalt der Wafer gerechnet wird. Nach Auskunft von "Freiberger" wird jedoch der Verschnitt gleich wieder in der Produktion eingesetzt. Aus dem noch übrigen Ausschuss wird das Gallium in Raffinerien wiedergewonnen (Freiberger 2008; Splettstößer 2008; USGS 2006b).

GaAs als Dünnschicht-Epitaxie ist bei den Materialverbrüchen vernachlässigt worden, da Schichten der Dicke 1 bis 5 Mikrometer auf den Träger aufgebracht werden. Das ist wenig im Vergleich zur Schichtdicke von 675 Mikrometer bei 6 Zoll Wafern (Freiberger 2008; Splettstößer 2008).

Tabelle 4-35: Rohstoffbedarf für GaAs-Wafer

Verbrauch (bulk GaAs)	[kg/6" Wafer]
Ga	0,031
As	0,033

Quelle: eigene Berechnungen, basierend auf Freiberger 2008 und USGS 2006b

4.13.3 Foresight industrielle Nutzung

Gallium Arsenid

Im Jahr 2006 betrug der Gesamtmarkt für GaAs Bauteile 3,1 Mrd US\$. Davon entfielen 84 % auf MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuits³⁶). Der Mobiltelefonmarkt war der Haupttreiber für GaAs MMICs. Die Nachfrage nach Mobiltelefonen wird auch weiterhin der Wachstumstreiber für die GaAs Industrie sein. Ab dem Jahr 2007 werden Wi-Fi Anwendungen den zweiten Rang für GaAs Bauteile einnehmen. Der Gesamtmarkt wird im Jahr 2011 5 Mrd. US\$ betragen (Anwar et al. 2008; compoundsemiconductor.net 2007).

Der steigende Wohlstand in den Schwellen- und Entwicklungsländern, die verstärkte drahtlose IKT Vernetzung und die Nutzung von Satellitennavigationssystemen könnten Treiber für die wachsende Nachfrage nach kleinen tragbaren Geräten, die unterschied-

³⁶ Integrierte Schaltkreise, die bei Mikrowellenfrequenzen von 300 MHz - 300 GHz arbeiten.

liche Funktionen wie Satellitennavigation (GPS), Internet (UMTS, Wi-Fi) und Mobiltelefonie vereinen, sein. Das wiederum wird die Nachfrage nach schnellen Halbleiterbauelementen aus GaAs und die Nachfrage nach GaAs-Wafern (Epitaxie oder "bulk") weiter steigern.

Nach USGS (2006) betrug die Nachfrage nach reinen GaAs-Wafern 75 % (bulk GaAs) der globalen Produktionskapazität von ca. 800.000 6" Wafer-Äquivalenten. Es wurden demnach 600.000 6 Zoll GaAs-Wafer produziert. Nach (Anwar 2006) wächst der Markt für bulk substrate in den Jahren 2005 – 2010 um jährlich 18 %. In Projektion A als "business as usual" wird dieses Wachstum bis zum Jahr 2030 fortgesetzt. In Projektion B verlangsamt sich das Wachstum (siehe Tabelle 4-36).

Tabelle 4-36: Wafer-Produktion (6 Zoll Äquivalente) im Jahr 2006 und 2030

	6" Wafer		Wachstumsrate [%/a]		
	2008	2030	2006 – 2011	2011 – 2020	2020 – 2030
Projektion A	600.000	31.865.404	18	18	18
Projektion B	600.000	6.816.825	18	12	6

Quelle: eigene Berechnungen, basierend auf Anwar 2006, USGS 2008

Silizium Germanium (SiGe)

Wegen der unterschiedlichen Nutzung von SiGe als Epitaxieschicht für Halbleiterbauelemente ist es sehr schwierig, den Germaniumbedarf für integrierte Schaltkreise abzuschätzen. Reine Germanium-Wafer (bulk Ge) 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.

4.13.4 Foresight Rohstoffbedarf

Mit den Daten aus Tabelle 4-35 und Tabelle 4-36 wurde der Bedarf an Gallium und Arsen im Jahr 2006 und 2030 berechnet (siehe Tabelle 4-37).

Tabelle 4-37: Globaler Rohstoffbedarf für GaAs-Wafer in t

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030
Gallium	99	18	209 – 975
Arsen	59.200	20	224 – 1.045

Quelle und Anmerkungen: eigene Berechnungen

Die Produktion von raffiniertem Gallium lag 2006 bei 99 t. Nach dieser Abschätzung wurden im Jahr 2006 ca. 18 t Gallium für die GaAs Wafer-Produktion (bulk GaAs) benötigt. In Projektion A erhöht sich der Bedarf auf 975 t. Das entspricht fast dem zehnfachen der Produktion im Jahr 2006. In Projektion B wird im Jahr 2030 immerhin noch zweimal soviel Gallium benötigt, wie im Jahr 2006 produziert wird.

Die weltweite Arsenproduktion lag im Jahr 2006 bei 59.200 t. Selbst in der unwahrscheinlicheren Projektion A beträgt der Anteil des Bedarfes an Arsen nur 1,8 % der Produktion im Jahr 2006.

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. Wird sich in Zukunft die Epitaxie durchsetzen, so wird der Bedarf an Gallium eher ab- als zunehmen, da die Epitaxieschichten um das 30fache dünner als "bulk" Wafer sind³⁷. Auf der anderen Seite konkurrieren weiterhin GaAs Wafer mit Silizium-Wafern, die derzeit mehr als 90 % des Wafer-Marktes ausmachen.

³⁷ Bis zum Jahr 2010 sind nach Anwar 2006 jedoch keine Veränderungen der Marktanteile zu erwarten. Im Jahr 2005 wurden 14.485 ksi bulk GeAs Wafer und 11.932 GeAs Epitaxie Wafer verkauft. Bei beiden Technologien wird das durchschnittliche Marktwachstum bis 2010 mit 18 % angegeben. Die Marktanteile von 55 % "bulk" GaAs bzw 45 % Epitaxie GaAs werden sich also der Vorhersage von "Strategy Analytics" nach nicht zugunsten der Epitaxie verschieben.

Energie-, Elektro- und Antriebstechnik

4.14 Ultraeffiziente industrielle Elektromotoren

4.14.1 Technologiebeschreibung

Elektromotoren sind *das* zentrale Antriebsaggregat für Pumpen, Ventilatoren, Kompressoren, Maschinen und Geräte, Elektrowerkzeuge, Schienenfahrzeuge und für vieles andere mehr. Sie finden sich in Industrie und Gewerbe, Gebäuden, Fahrzeugen, Flugzeugen, Schiffen, Haushaltsgeräten etc. Im Folgenden werden Elektromotoren mit einer Nennleistung von über 750 W betrachtet. Motoren dieser Leistungsklassen werden fast ausschließlich in industriellen Anwendungen genutzt.

Es gibt unterschiedliche Bauarten von Elektromotoren. Zunächst unterscheidet man zwischen Gleichstrom- und Drehstrommotoren. Beinahe 90 % der industriellen Elektromotoren sind Drehstrommotoren. Bei den Drehstrommotoren gibt es Kurzschlussläufer-, Kommutator-, Schleifringmotoren, Einphasen-Wechselstrommotoren und Synchronmaschinen, deren Drehzahl exakt von der Frequenz des Drehstromnetzes bestimmt wird. Der Rotor des Kurzschlussläufermotors weist keine Wicklungen auf, sondern besteht aus Stäben, die am Ende kurzgeschlossen sind. Er kommt ohne Kommutatoren und Schleifringe aus, die Verschleißteile sind. Aufgrund seiner Robustheit und Wartungsarmut ist er das bevorzugte Antriebsaggregat der Industrie. Beinahe 85 % der eingesetzten industriellen Drehstrommaschinen sind Kurzschlussläufer Motoren.

Die Drehstrom-Kurzschlussläufer werden im Klassifizierungsschema der EU in drei Effizienzklassen eingeteilt. Die Effizienzklasse muss auf dem Typenschild angegeben werden. Motoren der Effizienzklasse 3 (Eff 3) weisen den niedrigsten, die Effizienzklasse 1 (Eff 1) den höchsten Wirkungsgrad auf. Eff 3 Motoren spielen heute am Markt kaum mehr eine Rolle. Allerdings bleibt auch die Nutzung hocheffizienter Motoren der Klasse Eff 1 weit hinter den Erwartungen zurück, obwohl beispielsweise bei einer Nennleistung von 7,5 kW der Wirkungsgradgewinn bei einem vierpoligen Motor über 2 Prozentpunkte beträgt.

Eine Fortentwicklung von hocheffizienten Kurzschlussläufermotoren, deren Läuferkäfig aus Aluminium besteht, sind ultraeffiziente Motoren, mit Kupferläuferkäfig. SIEMENS vermarktet diese Motoren bereits unter der Bezeichnung "Premium Efficiency Motor" (Abbildung 4-30). Für einen vierpoligen 7,5 kW Eff 1 Motor schreibt das EU Effizienzsystem einen Wirkungsgrad von 90,1 % vor. Der gemessene Wirkungsgrad eines Premium Efficient Motors der gleichen Nennleistung beträgt 92,4 % (CDA 2007).

Tabelle 4-38: Wirkungsgradvergleich eines vierpoligen 7,5 kW Drehstrom-Kurzschlussläufermotor unterschiedlicher Effizienzklassen

Eff 3	Standard Efficiency Eff 2	High Efficiency Eff 1	Premium Efficiency
< 87,0 %	≥ 87,0 %	≥ 90,1 %	92,4 %

Abbildung 4-30: Ultraeffizienter (Premium Efficiency) Kurzschlussläufermotor mit Läuferkäfig aus Kupfer



Quelle SIEMENS

Angesichts steigender Energiepreise besitzt der Premium Efficiency Standard eine glänzende Zukunft, zumal die Fertigungskosten im Vergleich zum konventionellen Eff 3 Aluminium Käfigläufermotor eher günstiger sind (Kimmich 2005). Unklar ist, ob dies für alle Leistungsklassen gilt. Es stellt sich die Frage, welcher zusätzliche Kupferbedarf entsteht, wenn dieser Motor bis 2030 zum Industriemaschinenstandard wird. Dem wird in den folgenden Kapiteln nachgegangen.

4.14.2 Rohstoffinhalt

Der Elektromotor mit Kupferrotor wird von der Copper Development Association (CDA), New York, promoviert. Die CDA hat im Jahr 1997 das "Copper Motor Rotor Project" initiiert, das sich zum Ziel setzte, einen hocheffizienten Elektromotor zu entwerfen und zu testen, in dem der Aluminiumrotorkäfig durch einen Kupferrotorkäfig ersetzt wird. Der Wirkungsgradgewinn entsteht durch die bessere Leitfähigkeit von Kupfer im Vergleich zu Aluminium und einige marginale materialtechnische und konstruktive Verbesserungen. Als Problem erwies sich zunächst der Druckguss des Kupferrotors, aufgrund der hohen Gießtemperatur von 1200 °C. Das Problem konnte gelöst werden und im

Jahr 2000 hat die CDA ein Patent unter dem Namen "Apparatus and Method to Die Casting" zum Druckguss von Kupfer angemeldet. Lizenzen werden von der CDA kostenfrei vergeben (CDA 2004a:3).

In der Zwischenzeit ist das Projekt über den Entwicklungsstand hinaus, und es werden, wie bereits erwähnt, ultraeffiziente Kurzschlussläufermotoren mit Kupferrotoren am Markt angeboten. Die Effizienz von zwei solcher kommerziellen Motoren hat die CDA geprüft und ihre Materialzusammensetzung mit der von herkömmlichen Motoren mit Aluminiumkäfigen verglichen. Die Motoren mit Kupferrotoren benötigen zwar in der Statorwicklung weniger Kupfer, diese Einsparung wird jedoch durch den Kupfergehalt des Rotors überkompensiert. Ein 5,5 kW Motor mit Kupferrotor enthält 0,7 kg mehr Kupfer und ein 11 kW Motor 4,4 kg.

Tabelle 4-39: Kupfergehalt von vierpoligen 5,5 kW und 11 kW Kurzschlussläufermotoren mit Aluminium- und Kupferrotoren (CDA 2004b)

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

4.14.3 Foresight Industrielle Nutzung und Rohstoffbedarf

Angesichts steigender Strompreise und der anhaltenden Klimadebatte muss aus heutiger Sicht davon ausgegangen werden, dass ultrahocheffiziente Elektromotoren bis 2030 zum Industriestandard werden, sei es freiwillig oder durch Regelungen erzwungen. Durch die Nutzung solcher Motoren entsteht zusätzlicher Kupferbedarf, der im Folgenden abgeschätzt werden soll. Dabei wurde versucht die lückenhafte Datenlage über die Materialzusammensetzung der Motoren durch Anfragen bei einem Hersteller und beim Verband zu schließen. Dies ist nur zum Teil gelungen.

Für Europa stehen aus einer Frost & Sullivan Studie aus dem Jahre 2003 fundierte Marktdaten über Elektromotoren zur Verfügung. In der EU-15, der Schweiz und Norwegen wurden 2006 zusammen 7,3 Mio. Drehstrommotoren verkauft. 83,9 % davon, das sind 6,1 Mio. Stück, waren Kurzschlussläufermotoren (Frost 2003:p4-4...6). Davon entfielen knapp 60 % auf den Leistungsbereich 0,75 – 7,5 kW, gut ein Fünftel auf 7,5 – 75 kW und der Rest auf größere Motoren (Zeile 2 in Tabelle 4-40). Der Markt für Industriemotoren in Europa ist sehr statisch, Volumen und Struktur verändern sich über die Jahre kaum. Die großen europäischen Motorenhersteller, SIEMENS und ABB, zäh-

len auch im Weltmarkt zu den Marktführern. Beide liegen im europäischen Markt mit einem Marktanteil von jeweils um die 16 % weit vor den übrigen Wettbewerbern (Frost 2003:3–27). Im deutschen Markt hält Siemens einen Anteil von fast 30 % und schlägt ABB mit 9 % und die anderen Hersteller um Längen (Frost 2003:6 – 9).

Der ZVEI hat auf Anfrage Angaben zum Kupferinventar von Motoren der Effizienzklassen Eff 1 und Eff 2 für einige Leistungsklassen zur Verfügung gestellt (ZVEI 2006). Diese Angaben ließen sich gut inter- und extrapolieren und bilden eine gute Basis für die Abschätzung des Kupferinventars der Motoren im Markt in Tabelle 4-40. Etwa 85 % der heute industriell eingesetzten Motoren gehören zur Effizienzklasse Eff 2. Der höhere Kupferbedarf der etwa 8 % Eff 1 Motoren wird durch den geringeren Bedarf von 7 % Eff 3 Motoren kompensiert. Für das abgeschätzte Kupferinventar von 420.000 t in den gegenwärtig genutzten Kurzschlussläufermotoren im europäischen Markt wurde deshalb der Eff 2 Standard zugrunde gelegt. Das Kupferinventar der Motoren würde auf 461.000 t ansteigen, wenn alle industriellen Motoren im Markt dem Eff 1 Standard entsprechen. Das ist ein hypothetischer Mehrbedarf von knapp 10 %.

Tabelle 4-40: Hypothetische Kupfermenge aller Kurzschlussläufermotoren im europäischen Markt 2006 (Frost 2003:4–4, 6, 9; Gloor 2006:2)

Nennleistungsklasse [kW]	0,75 – 7,5	7,5 – 75	75 – 750	> 750	Summe
Marktanteil [%]	59,6	21,4	12,2	6,8	
Anzahl Motoren im Markt [1.000]	3.636	1.305	744	415	6.100
Kupferinventar aller Motoren im Markt					
Gegenwärtiger Standard [1.000 t]	13.000	31.000	160.000	216.000	420.000
Eff 1 Motoren (Aluminiumrotor) [1.000 t]	19.000	38.000	172.000	232.000	461.000
Ultraeff. Motoren (Kupferrotor) [1.000 t]	24.000	47.000	215.000	290.000	576.000

Problematisch ist die Berechnung des hypothetischen Kupferbedarfs für ultraeffiziente Motoren mit Kupferrotor. SIEMENS Industry Automation and Drive gibt aus nicht nachvollziehbaren Gründen keine Auskunft über den Kupfergehalt seiner Kupferläufermotoren, obwohl das Unternehmen solche Motoren ausliefert. Die Copper Development Association (CDA) hat die Materialzusammensetzung von 5,5 kW und 11 kW Motoren

mit Aluminium- und Kupferrotor verglichen. Der festgestellte Kupferanteil ist in Tabelle 4-39 zusammengestellt, lässt aber keine Gesetzmäßigkeit erkennen. Es wird deshalb hier pauschal von einem 25 % höheren Kupfergehalt von Kurzschlussläufermotoren mit Kupferrotor gegenüber Eff 1 Motoren mit Aluminiumrotor ausgegangen. Unter dieser Annahme errechnet sich ein hypothetisches Kupferinventar von 576.000 t, wenn alle Motoren im europäischen Markt diesen Effizienzstandard hätten.

Tabelle 4-41 rechnet diese Werte auf den Weltmarkt hoch. Damit beträgt das Kupferinventar der 2006 weltweit genutzten industriellen Kurzschlussläufermotoren 1,4 Mio. t, das sind gut 9 % der Weltkupferproduktion im gleichen Jahr. Würden ausschließlich ultraeffiziente Motoren mit Kupferrotor eingesetzt, betrüge das Kupferinventar der Motoren 1,92 Mio. t oder knapp 13 % der Weltkupferproduktion von 2006.

Tabelle 4-41: Weltkupferbedarf 2006 für Kurzschlussläufermotoren mit unterschiedlichem Effizienzstandard

Motoreffizienz	Jährlicher Kupferbedarf in t/a
Genutzter Standard (tatsächlich)	1.400.000
Hocheffizient mit Aluminiumrotor (hypothetisch)	1.540.000
Ultrahocheffizient mit Kupferrotor (hypothetisch)	1.920.000

Die Weltwirtschaft wächst und mit ihr die globale Industrieproduktion. Eine höhere Industrieproduktion benötigt mehr Elektromotoren. Setzt man das mittlere jährliche Wachstum der Weltwirtschaft zwischen 2006 und 2030 vorsichtig mit 2,5 %/a an, dann werden 2030 rund 3.470.000 t Kupfer benötigt, wenn die Drehstrom-Kurzschlussläufermotoren bis dahin ausschließlich im Standard ultrahocheffizient ausgeliefert werden. Ohne Verbesserung des heutigen Effizienzstandards würden 2030 2.530.000 t Kupfer benötigt. Die Anhebung des Standards geht also mit einem zusätzlichen Kupferbedarf von 940.000 t/a einher, das sind moderate 6 % der Weltkupferproduktion von 2006.

Massiv schlägt allerdings selbst das niedrig angenommene Wachstum der Weltwirtschaft auf den Kupferbedarf durch. Während heute 9 % der Kupferproduktion für die Fertigung von industriellen Kurzschlussläufermotoren benötigt werden, werden es 2030 bezogen auf die Kupferproduktionsmenge von 2006 23 % sein (Tabelle 4-42).

Tabelle 4-42: Weltkupferbedarf für Kurzschlussläufermotoren 2030

Kupferproduktion 2006	Kupferbedarf für Kurzschlussläufermotoren 2006	Kupferbedarf für ultrahocheffiziente Kurzschlussläufermotoren 2030
15.100.000 t	1.400.000 t	3.470.000 t
100 %	9 %	23 %

Im Vergleich zu anderen Einflüssen auf die Kupfernachfrage sind die Effekte, die von der Verbesserung der Energieeffizienz von Elektromotoren ausgehen, also weniger bedeutsam.

4.15 Thermoelektrische Generatoren

4.15.1 Technologiebeschreibung

Bei Verbrennungsprozessen entsteht Abwärme, die oft nicht sinnvoll verwertet werden kann, sei es, weil kein räumlich nahe gelegener Bedarf vorhanden ist, oder die Abwärme in mobilen Aggregaten, beispielsweise in Fahrzeugen oder Flugzeugen, anfällt, die sich nicht mit externen Abnehmern verbinden lassen. Es hat deshalb nicht an Versuchen gefehlt, aus der anders nicht sinnvoll nutzbaren Abwärme direkt Elektrizität zu erzeugen. Elektrizität lässt sich einfach und kostengünstig transportieren und das die Abwärme erzeugende Aggregat hat für die Aufrechterhaltung der Verbrennung selbst Verwendung dafür.

Mit thermoelektrischen Generatoren lässt sich Wärme direkt in Strom umwandeln. Sie nutzen den so genannten Seebeck-Effekt, den der deutsche Physiker Thomas Johann Seebeck 1821 entdeckt hat. Als Seebeck-Effekt wird das Phänomen bezeichnet, dass zwischen zwei Stellen eines elektrisch leitenden Materials eine elektrische Potenzialdifferenz (Spannung) entsteht, wenn diese unterschiedliche Temperaturen aufweisen. Die Elektronen eines Leiters sind an der Wärmeleitung beteiligt. Bei höheren Temperaturen bewegen sich die Elektronen schneller, wodurch die heiße Stelle an Elektronen verarmt, während die kalte Stelle Elektronen gewinnt. Die entstehende Potenzialdifferenz bewirkt einen Rückfluss von Elektronen, der den Gewinn ausgleicht. Es entsteht eine für das spezifische Leitermaterial typische Spannung, die durch die Gleichung beschrieben wird:

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

U Spannung in V

α Seebeck-Konstante (Thermokraft) in V/K

ΔT Temperaturdifferenz zwischen der heißen und kalten Stelle in K

Ziel ist es, bei einer bestimmten Temperaturdifferenz eine möglichst hohe Spannung zu erzielen. Als Gütemaß für die thermoelektrische Leistungsfähigkeit von Stoffen hat sich der dimensionslose "ZT-Wert" herausgebildet.

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

σ elektrische Leitfähigkeit in $1/\Omega \text{ m}$

κ Wärmeleitfähigkeit in W/m K

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

Bei den Angaben in der Literatur ist oft nicht klar, ob der ZT-Wert tatsächlich auf die mittlere Temperatur oder die Temperatur an der heißen Stelle bezogen wurde, die einen höheren ZT-Wert ergibt. Der ZT-Wert ist mit dem (inneren) Wirkungsgrad des thermoelektrischen Generators korreliert.

$$(3) \quad P = I \cdot U = \frac{U^2}{R} = \frac{A}{l} \cdot \sigma \cdot \alpha^2 \cdot (\Delta T)^2$$

$$(4) \quad Q = \frac{A}{l} \cdot \kappa \cdot \Delta T$$

$$(5) \quad \eta_i = \frac{P}{Q} = \alpha^2 \cdot \frac{\sigma}{\kappa} \cdot \Delta T$$

Pelektrische Leistung in W

QWärmeleistung in W

ALeiterquerschnitt in m^2

l Leiterlänge in m

η_i (innerer) elektrischer Wirkungsgrad des TEG (dimensionslos)

Der innere elektrische Wirkungsgrad η_i des Generators sagt nichts über den Grad der Ausnutzung des Wärmeangebots der Wärmequelle, bspw. eines Abgasstroms, aus. Die Effizienz der Wärmeauskoppelung gibt Gleichung (6) wieder.

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

η_aWirkungsgrad der Wärmeauskoppelung

T_{in}Temperatur des Wärmestroms vor dem TEG

T_{out}Temperatur des Wärmestroms nach dem TEG

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

$$(7) \quad \eta = \eta_i \cdot \eta_a$$

Die Technologieentwicklung trachtet Materialien mit hohem ZT-Wert, also hohen inneren elektrischen Wirkungsgrad, bereit zu stellen. Geeignete Materialien benötigen eine hohe elektrische Leitfähigkeit, aber zugleich eine geringe Wärmeleitfähigkeit. Damit scheidet Metalle aus, bei denen gute elektrische und gute Wärmeleitfähigkeit gepaart sind. Isolatoren haben zwar eine geringe Wärmeleitfähigkeit, aber auch eine sehr geringe elektrische Leitfähigkeit (Tabelle 4-43). Deshalb werden für thermoelektrische

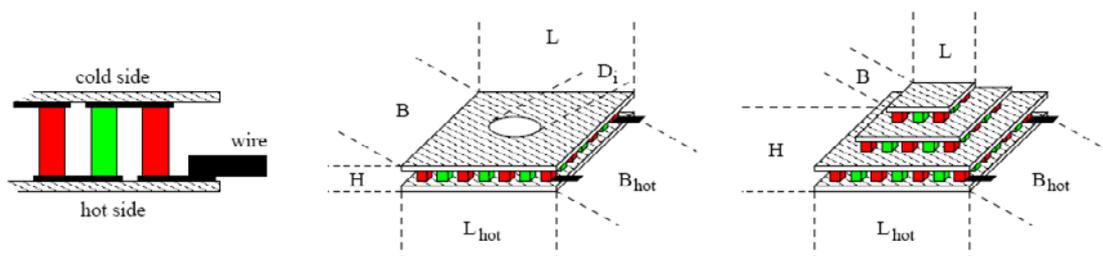
Generatoren Halbleiter eingesetzt und sie sind der bevorzugte Gegenstand von Forschung und Entwicklung. Neuere Ansätze versuchen, mit nanotechnologischen Instrumenten Halbleiter gezielt auf die Anforderungen einzustellen.

Tabelle 4-43: Thermoelektrische Eigenschaften von Isolatoren, Metallen und Halbleitern bei Raumtemperatur (nach Fleurial 1993:2)

		Isolatoren	Metalle	Halbleiter
Seebeck-Konstante α	10^{-6} V/K	1.000	5	200
Elektrische Leitfähigkeit σ	$1/\Omega$ m	10^{-10}	10^8	10^5
Wärmeleitfähigkeit κ	W/m K	0,1 – 1	10 – 1.000	1 – 100
Gütemaß ZT	1	10^{-14}	10^{-3}	0,1 – 2,2

Bei der technischen Realisierung von thermoelektrischen Generatoren werden n- und p-dotierte Halbleiter in Serie hintereinander geschaltet. An den Enden dieser Verbindungen liegt die nutzbare Spannung an. Thermisch sind die Halbleiter mit der kalten und heißen Wärmequelle über Keramikplatten verbunden. Abbildung 4-31 zeigt Prinzipskizzen von thermoelektrischen Generatoren, die von der EURECA Messtechnik GmbH stammen. Die in Serie geschalteten n- und p-Halbleiter sind in dieser Abbildung rot und grün eingefärbt. Sie werden mit den schwarz dargestellten Drähten verbunden und oben und unten mit Keramikplatten abgedeckt. Die Abbildung zeigt auch einen Stack, in dem mehrere Generatoren übereinander gestapelt sind.

Abbildung 4-31: Schaltprinzip und Aufbau von thermoelektrischen Generatoren



EURECA Messtechnik GmbH

Thermoelektrische Generatoren weisen keine bewegten Teile auf, sind deshalb verschleißarm, langlebig, zuverlässig und vollkommen lautlos. Es dürfte keine andere technische Anwendung zur Stromgewinnung geben, die so dauerhaft ist und dabei vollkommen wartungsfrei funktioniert.

4.15.2 Rohstoffinhalt

Traditionelle thermoelektrische Materialien sind Basislegierungen von Bi_2Te_3 , PbTe , $\text{Si}_{80}\text{Ge}_{20}$. Damit werden im Temperaturbereich von 350 bis 700 °K ZT Werte um etwa 1 erreicht (Fleuriel 1993:21). Mit $(\text{GeTe})_x(\text{AgSbTe}_2)_{100-x}$, den so genannten TAGS-Legierungen, wird bei 700 °K ein ZT-Wert von 1,2 erreicht. Mit AgSbTe_2 -18 PbTe , den LAST-Legierungen, wurden ZT-Werte von 2,2 gemessen. LAST- und TAGS-Legierungen zählen aus heutiger Sicht zu den leistungsfähigsten thermoelektrischen Werkstoffen.

Die TAGS-Legierungen sind Gegenstand neuerer Forschung. Durch gezielte Nanostrukturierung der Kristallgitterstruktur ist es gelungen, den ZT-Wert bei 700 °K auf 1,5 anzuheben (Yang 2008:3). Die nanotechnologischen Eingriffe zielen darauf, die Wärmeleitfähigkeit des Kristallgitters herabzusetzen. Dabei wird auch mit Nanokompositen experimentiert, also der Einlagerung von organischen Stoffen in das Metallgitter, und dem Einbau von Indium und Neodym.

Tabelle 4-44 stellt zentrale Rohstoffe, die für die Herstellung leistungsfähiger thermoelektrischer Werkstoffe benötigt werden, zusammen und gibt die statische Reichweite der Ressourcen an. Kurze rechnerische Reichweiten haben Silber und Antimon. Es ist dabei aber zu berücksichtigen, dass die Reichweite weniger die geologische Verfügbarkeit in der Erdkruste wiedergibt, sondern eher ein Maß für die Intensität der bisherigen Explorationsanstrengungen ist, die wiederum vom Preisniveau maßgeblich getriggert werden. Die Reichweite von Kupfer, beispielsweise, beträgt seit 1965 etwa 32 Jahre (RWI/ISI/BGR 2007:13) und die von Erdöl ist in den 25 Jahren seit 1982 sogar von 35 auf 40 Jahre gestiegen (BP 2007:10).

Tabelle 4-44: Rohstoffe für die Herstellung elektrochemischer Generatoren

Stoff	Weltproduktion 2006 [t]	Ressourcen [t]	Reichweite [Jahre]
Tellur (Te)	132	> 100.000	> 750
Silber (Ag)	20.200	> 570.000	> 28
Antimon (Sb)	134.000	> 4.300.000	> 32
Germanium (Ge)	90	unbekannt	unbekannt
Blei (Pb)	3.470.000	> 1.500.000.000	> 430
Wismut (Bi)	5.700	> 680.000	> 120
Silizium (Si)	4.970.000	28 % der Erdkruste	Jahrtausende

Weitere Materialien in thermoelektrischen Generatormodulen sind Al_2O_3 Keramiken für die Abdeckplatten und Kupfer als leitende Verbindung zwischen den Halbleitern und für

die elektrischen Anschlüsse. Auch für die Halbleiter selbst wird noch mit anderen Rohstoffen experimentiert (Sterzel 2002).

4.15.3 Foresight Industrielle Nutzung

Thermoelektrische Generatoren werden für unterschiedliche Betriebstemperaturen und Leistungsklassen angeboten. Tabelle 4-45 zeigt einen Auszug aus dem Angebot der EURECA Messtechnik GmbH in Köln. Für Temperaturdifferenzen von 100 und 200 °C, Spannungsebenen von 2,7 bis 10,8 V werden Generatoren mit Leistungen von 0,2 bis 40 W geliefert. Die angegebenen Preise gelten für die Abnahme von Kleinmengen ab 10 Stück im Juli 2008. Sie sind erstaunlich moderat. Der 40 W Modul erreicht Leistungskosten von 3.000 €/kW. Im Vergleich dazu sind für ein photovoltaisches Solarmodul mindestens 8.000 €/kW aufzuwenden.

Tabelle 4-45: Auszug aus dem Angebot eines Herstellers für thermoelektrische Generatoren (EURECA 2008)

Abmessungen L x B x H [mm]	Temperatur [°C]	Spannung [V]	Leistung [W]	Preis [€/Stück]
9,1 x 9,9 x 2,3	100	2,7	0,2	31,05
40 x 40 x 3,2	100	8,2	10,1	38,65
40 x 40 x 3,4	200	10,8	19,0	25,10
50 x 50 x 3,4	200	10,3	40,0	30,90

Die Wirkungsgrade von thermoelektrischen Generatoren sind gering, sie erreichen heute 3 – 5 %, eine Publikation spricht von 10 % (Sterzel 2002:5). Dies hat ihre Verbreitung beschränkt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich dabei um das Verhältnis von Wärmeangebot und Elektrizitätsausbeute, also den *Stromwirkungsgrad* handelt. Wird Abwärme genutzt, für die sonst keine Verwendung gefunden werden kann, ist die Frage des Wirkungsgrads dann nachrangig, wenn thermoelektrische Generatoren eine *wirtschaftliche* Nutzung ermöglichen.

Die Entwicklungsanstrengungen zielen auf die Verbesserung des ZT-Wertes und des Wirkungsgrads. Für höhere Temperaturen bis zu 1500 °C könnte ein Durchbruch erzielt worden sein. Jedenfalls bietet die Fraunhofer-Technologie-Entwicklungsgruppe TEG in Zusammenarbeit mit der SAM GmbH & Co. KG in Wattens, Tirol, Lizenzen für thermoelektrische Generatoren an, die Wirkungsgrade bis zu 30 % erreichen sollen (TEG 2008). Damit wäre die Technologie in den Effizienzbereich älterer Großkraftwerke vorgedrungen. Modulleistungen bis zu 500 W seien erreichbar.

Für die Stromerzeugung aus Abwärme sind auf Anhieb unzählige Anwendungen erkennbar. Sie reichen von Heizkesseln in Gebäuden, über die Nutzung von Körperwärme für die Versorgung von Sensoren zur Überwachung von Körperfunktionen und ihre Funkübertragung, über die Stromversorgung abgelegener Stationen, zur Nutzung von Abwärme aus Industrieprozessen, Flugzeugen, Fahrzeugen und thermischen Solarkollektoren. Eine lange Tradition haben thermoelektrische Sensoren in der Raumfahrt. Dort gewinnen sie Strom aus Wärme, die beim Zerfall radioaktiver Elemente entsteht. So wurden beispielsweise die Sonden Pionier, Voyager, Galileo und Cassini mit thermoelektrischen Generatoren ausgerüstet. Auch die Sonnenenergie, die beispielsweise mit Parabolrinnen auf thermoelektrische Generatoren gebündelt wird, kann direkt in Strom gewandelt werden.

Thermoelektrische Generatoren lassen sich als Kühlelemente nutzen. Dabei wird der Peltiereffekt genutzt, den der französische Physiker Jean Charles Athanase Peltier 1834 fand: Wird an einem thermoelektrischen Generator eine Spannung angelegt, wird Wärme von einer Seite zur anderen transportiert und es bilden sich in den äußeren Platten unterschiedliche Temperaturen aus. Das Peltierelement arbeitet als Wärmepumpe und kann zur Kühlung genutzt werden. Erste Anwendungen für die Kühlung von Prozessoren in Computern sind am Markt. Die Nutzung des Peltiereffekts für Kühl- und Gefriergeräte scheiterte bisher am niedrigen Wirkungsgrad von Peltierelementen.

Das naturgesetzliche Phänomen, dass bei jedem technisch nutzbaren thermodynamischen Prozess Abwärme anfällt, und die Robustheit, Wartungsfreiheit, Dauerhaftigkeit und Lautlosigkeit von thermoelektrischen Generatoren eröffnen dieser Technologie hervorragende Zukunftsperspektiven. Mit der Nanotechnologie, ein Werkzeug, das es erlaubt, einzelne Moleküle zu handhaben, könnte ein revolutionärer Durchbruch beim gezielten Design effizienter thermoelektrischer Werkstoffe gelingen. Eine Wirkungsgradsteigerung auf 30 % scheint greifbar. Ein Effizienzgewinn in diesem Ausmaß eröffnet unzählige wirtschaftliche Anwendungen. Dies mag das folgende Beispiel verdeutlichen.

Der Motor eines Pkw der Mittelklasse entnimmt im Wegestreckenmittel mit dem Kraftstoff eine Leistung von etwa 25 kW, um das Fahrzeug zu bewegen. Beim Verbrennungsmotor geht etwa ein Drittel davon mit dem bis zu 700 °C heißen Abgas verloren (Briseno 2008:16), das sind gut 8 kW. Ein thermoelektrischer Generator mit einem Wirkungsgrad von 12 % könnte daraus eine elektrische Leistung von 1 kW gewinnen. Dies würde ausreichen, um das gesamte Fahrzeug mit Strom zu versorgen, die schwere Lichtmaschine wäre überflüssig und selbst die Fahrzeugklimaanlage würde dann mit Abwärme betrieben.

4.15.4 Foresight Rohstoffbedarf

Der Materialverbrauch für einen einzelnen thermoelektrischen Generator ist gering. Bei einer explosionsartigen Verbreitung der Technologie entstehen jedoch in Summe merkliche Nachfrageschübe nach thermoelektrischen Werkstoffen und nach Rohstoffen für ihre Herstellung (Tabelle 4-44). Der in Tabelle 4-45 aufgeführte 40 W Generator dürfte aus den Abmessungen abgeschätzt etwa 50 g wiegen. Um aus dem Pkw Abgas 1 kW zu erzeugen werden heute 25 solcher thermoelektrischen Generatoren benötigt. Wird der Wirkungsgrad künftig verdreifacht, reichen 8 Generatoren aus. Weltweit sind heute 630 Mio. Fahrzeuge im Einsatz und diese Zahl wird nach Schätzungen von Shell bis 2025 auf eine Milliarde steigen (Shell 2007:5). Wären alle diese Fahrzeuge statt mit einer Lichtmaschine mit thermoelektrischen Generatoren ausgerüstet, summiert sich deren Gewicht auf 400.000 t:

$$10^9 \text{ Fahrzeuge} \times 8 \text{ TEG/Fahrzeug} \times 50 \times 10^{-6} \text{ t/TEG} = 400.000 \text{ t.}$$

Auch wenn nur 20 % des Gewichts auf Halbleitermaterialien entfallen mag, entstehen schon in dieser einen Anwendung große Nachfrageimpulse nach den Rohstoffen Tellur, Silber, Antimon Germanium und Wismut für die Fertigung thermoelektrischer Werkstoffe. Der künftige Rohstoffbedarf dieser Technologie ist nach den gegebenen Definitionen als rohstoffsensitiv und als rohstoffintensiv einzuschätzen. Es wird für die sichere Versorgung der Produktion nötig sein, die in thermoelektrischen Werkstoffen eingesetzten Rohstoffe in hohem Maß aus Altfahrzeugen zurückzugewinnen.

4.16 Farbstoffsolarzellen

4.16.1 Technologiebeschreibung

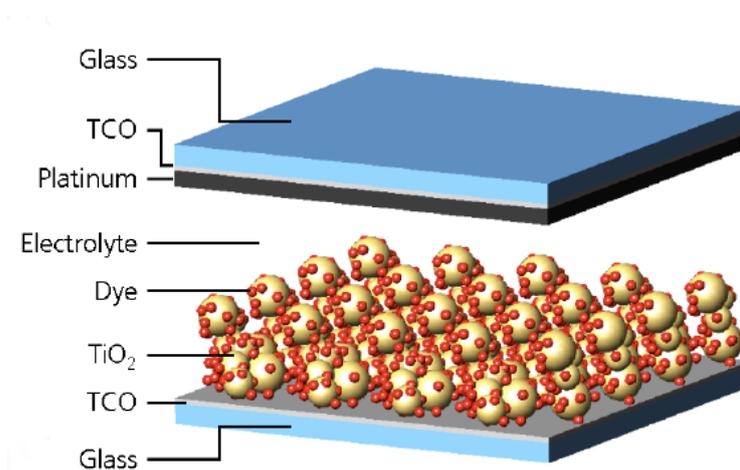
Farbstoffsolarzellen (FSZ) oder auch Grätzel-Zellen (nach dem Erfinder Michael Grätzel) sind ebenso wie Halbleitersolarzellen photovoltaische (PV) Elemente und in der Lage, elektromagnetische Strahlung im Spektralbereich des Sonnenlichts in elektrische Energie umzuwandeln. Das grundlegende Prinzip aller Photovoltaik Elemente besteht in der Generierung und Trennung eines Ladungsträgerpaares (Elektron-Loch-Paar). FSZ beruhen im Vergleich zu Halbleitersolarzellen (siehe z. B. Technologie-Synopse Dünnschichtsolarzellen) jedoch auf vollständig anderen Mechanismen. Für die Generierung und Trennung von Ladungsträgerpaaren wird in der Farbstoffsolarzelle ein metall-organischer Farbstoffkomplex auf der Basis von Ruthenium verwendet. Das Prinzip der Lichtabsorption für photovoltaische Zwecke ist theoretisch auch mit anderen metallorganischen oder rein organischen Farbstoffen nutzbar, nur kommen wegen ihrer hohen Beständigkeit in erster Linie Farbstoffkomplexe auf Basis von Ruthenium zum Einsatz. Die technische Lebensdauer eines FSZ-Moduls kann derzeit noch nicht endgültig abgeschätzt werden. Für eine Lebensdauer von 20 Jahren muss der Farbstoff ca. 100 Millionen Anregungs-Oxidations-Zyklen durchlaufen können. Der Rutheniumfarbstoffkomplex ist prinzipiell dazu geeignet. Im FSZ-Modul wird der Farbstoff als monomolekulare Schicht auf die innere Oberfläche eines Titanoxidfilms adsorbiert, wobei die Oberfläche der porösen und nano-kristallinen Oberfläche des Titanoxidfilms um den Faktor 1000 gegenüber einer geometrischen Fläche gesteigert ist und dadurch dem solarwirksamen Farbstoffkomplex eine große effektive Oberfläche zur Aufnahme des einfallenden Lichtes bietet. Mit diesem Prinzip lässt sich derzeit ein Wirkungsgrad von ca. 8 % erreichen. Eine Steigerung des Wirkungsgrades auf 12 % ist bis 2020 denkbar (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme). Die Limitierung des Wirkungsgrades liegt in der hohen Rekombinationsrate zwischen den Elektronen im Titandioxid und den Triiodidionen des Elektrolyts und in der ungenügenden Anpassung des Absorptionsspektrums des Farbstoffes an das Spektrum des Sonnenlichtes. Im Vergleich zu etablierten Solarzellen bergen die Farbstoffsolarzellen ein erhebliches Kostenreduktionspotenzial, da sowohl kostengünstige Rohstoffe verwendet werden als auch energieaufwändige Produktionsschritte vermieden werden können (Würfel 2006).

FSZ bestehen aus zwei parallelen, üblicherweise 3 mm starken Glasplatten als Substrat, die mit einem Abstand von 50 μm die einzelnen Elemente einfassen. Die übliche Paneelgröße liegt bei 0,6 m^2 . Die Innenseiten der Glasplatten sind mit einem transparenten, elektrisch leitfähigen Material (TCO, transparent conducting oxide) aus Zinndioxid (SnO_2) beschichtet (Abbildung 4-32). Eine Seite des TCO-beschichteten Glases, als Arbeitselektrode bezeichnet, trägt eine nanoporöse, mikrometerstarke Schicht Ti-

tandioxid (TiO_2) auf deren Oberfläche der Farbstoff adsorbiert ist. Auf der sog. Gegenelektrode ist eine katalytische Platinschicht (ca. $0,5 \mu\text{m}$) aufgebracht. Zwischen den beiden Elektroden befindet sich ein Elektrolyt, der für den Ladungstransport mittels Redoxionenpaaren (üblicherweise Iodid/Triiodid) zwischen Arbeits- und Gegenelektrode verantwortlich ist.

In der Zelle regt das eingestrahlte und durch den Farbstoffkomplex absorbierte Licht Elektronen an, die in das energetisch tiefer liegende Leitungsband des Titandioxids injiziert werden. Der nach diesem Vorgang oxidierte Farbstoff wird durch den Elektrolyten reduziert. Die Elektronen im Leitungsband des Titandioxids durchlaufen einen Stromkreis über die Elektroden der Zelle und einen "Verbraucher".

Abbildung 4-32: Schematischer Aufbau einer Farbstoffsolarzelle



Quelle: Fraunhofer-Institut Solare Energiesysteme

Farbstoffsolarzellen können z. B. durch einfache Siebdruck- und Glassintertechniken produziert werden und sind damit im Vergleich zu Silizium- und Dünnschichttechnologien in der Herstellung potenziell kostengünstiger. Einen wichtigen Kostenfaktor der Zelle stellt das seltene Metall Ruthenium dar. Die bisher verwendeten Farbstoffmengen wurden in verschiedenen Forschungseinrichtungen hergestellt, sind aber für eine Serienproduktion zu teuer. Eine industrielle Produktion von Farbstoffsolarzellen erfordert eine stabile Versorgungslage mit einer konstanten Rohstoffqualität (Beucker und Fichter, 2007). Derzeit befindet sich die Produktion noch in der Vorserienreife, jedoch sind Module bereits käuflich erhältlich.

Bezüglich des Energieverbrauchs in der Herstellung weisen Farbstoffsolarzellen weitere Vorzüge auf: Während für die Herstellung von 1 m^2 kristalliner Siliziumzellen rund 3250 MJ-eq als Primärenergieäquivalent (SENSE 2006) benötigt werden, können Farbstoffsolarzellen mit einem Primärenergieaufwand von $500 - 800 \text{ MJ-eq/m}^2$ produ-

ziert werden. Die energetische Amortisationszeit von Farbstoffsolarzellen ist abhängig von Ausrichtung und Einstrahlungsintensität und liegt zwischen 0,8 und 4 Jahren (zum Vergleich: die Amortisationszeit der Siliziumzellen beträgt 1,9 – 3,6 Jahre). Trotz des um einige Faktoren geringeren Energieaufwands in der Herstellung der Farbstoffsolarzellen sinkt die energetische Amortisationszeit nicht entsprechend ab. Dies ist hauptsächlich durch den geringeren Wirkungsgrad der Zellen zu begründen.

Die Oberfläche der Farbstoffsolarmodule bietet hinsichtlich der optischen Erscheinung in Form einer Musterung, der Farben und Transparenzen große Gestaltungsmöglichkeiten, ohne dass eine nennenswerte Änderung des Wirkungsgrads festzustellen ist (Abbildung 4-33). Es ergeben sich Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Architektur z. B. zur Fassadengestaltung (Beucker und Fichter 2007).

Abbildung 4-33: Prototyp einer Farbstoffsolarzelle



Quelle: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme

4.16.2 Rohstoffinhalt

Farbstoffsolarzellen bestehen neben Glasscheiben zur Abdeckung aus Zinndioxid Elektroden (Arbeits- und Gegenelektroden), zwischen denen Schichten aus nanoporösem Titandioxid (TiO_2) als Farbstoffträger, Zirkoniumdioxid (ZrO_2), einem Elektrolyten und Platin (Pt) als Katalysator lagern. Die Titandioxidschicht ist mit einem für die Lichtabsorption verantwortlichen metallorganischen Farbstoffkomplex (genaue Bezeichnung cis-di) auf der Basis von Ruthenium (Ru) beschichtet. Einzelne Elemente der Farbstoffsolarzelle werden mit Glaslot getrennt und versiegelt und über Silberstege (Ag) zu einem Panel elektrisch verbunden.

Tabelle 4-46: Massenbestandteile ausgewählter Rohstoffe in einer Farbstoffsolarzelle pro Quadratmeter

Rohstoff	TiO ₂	Ru	Pt	Ag	SnO ₂ (TCO)
g/m ²	20-40	0,07	0,03	1	7

Quelle: Expertenbefragung

4.16.3 Foresight Industrielle Nutzung

Die zukünftige Entwicklung des Marktes für Farbstoffsolarzellen hängt neben der Entwicklung des Marktanteils am gesamten Photovoltaik-Markt unter anderem vom Wachstum des weltweiten PV-Marktes ab. Dieses wird wiederum beeinflusst von der Energienachfrage, den Bedingungen und Grad der Verfügbarkeit anderer Energieträger und erneuerbarer Energien, der Technologieförderung und den Vergütungsbedingungen (z. B. Nitsch 2007 und Krewitt 2005).

Der Markt für Photovoltaik hat sich in den letzten Jahren dynamisch entwickelt. Im Jahr 2007 ist der weltweite Solarstrommarkt um 40 % mit 2,3 GWp (GW Spitze) zusätzlich installierter Leistung gewachsen. Es wird erwartet, dass dieses jährliche Wachstum bis 2010 beibehalten werden kann. Im Zeitraum von 2010 bis 2020 wird ein jährliches Wachstum von 19 % und im Zeitraum 2020 – 2030 ein jährliches Wachstum von 14 % angenommen, so dass 2020 eine installierte Leistung von ca. 150 GWp und 2030 eine installierte Leistung von ca. 850 GWp erreicht wird (siehe Technologie-Synopse Dünnschichtsolarzellen). Die Bandbreite von Entwicklungsszenarien in der Literatur ist bezüglich der weltweit installierten Leistung sehr breit und die obere und untere Schranke unterscheiden sich im Faktor 10, so dass abgeleitete Prognosen mit einer großen Unsicherheit behaftet sind.

Die Nutzung der Farbstofftechnologie bis zum Jahr 2030 wird auf zwei verschiedene Weisen abgeschätzt:

- (1) Mit Hilfe der potenziell zur Verfügung stehenden solarwirksamen Fläche (Dächer und Wände mit geeigneter Ausrichtung) für gebäudeintegrierte PV (GIPV-Fläche) und der Entwicklung des Marktanteils von Farbstoffsolarzellen am Gesamt-PV-Markt wird die Gesamtfläche der in 2030 verbauten Farbstoffsolarmodule berechnet. Die potenzielle GIPV-Fläche für 14 ausgewählte Länder wird in einer Studie der Internationalen Energie Agentur (IEA, 2002) mit ca. 22.000 km² berechnet (darunter USA, Deutschland, Japan, Großbritannien und Italien). In einem hier angenommenen Nutzungsszenario wird diese Fläche im Jahr 2010 zu 2 %, im Jahr 2020 zu 5 % und im Jahr 2030 zu 8 % photovoltaisch genutzt. Der Anteil der Farbstoffsolartechnik am gesamten Photovoltaikmarkt wird nach Exper-

tenschätzungen im Jahr 2010 mit 0,01 %, im Jahr 2020 mit 0,2 % und im Jahr 2030 mit 0,4 % angenommen. Es ergibt sich daraus im Jahr 2030 für die 14 betrachteten Länder der IEA-Studie eine Gesamtfläche von ca. 7 km² für Farbstoffsolar-technik. Anhand der Länderanteile am Weltinlandsprodukt wird dieser Wert mit Gültigkeit für die 14 IEA-Länder mit dem Faktor 2 auf die gesamte Welt extrapoliert, so dass für die FSZ eine Gesamtfläche von 14 km² abgeschätzt wird (Tabelle 4-47).

- (2) Ausgehend von einer im Jahr 2030 weltweit installierten PV-Leistung von 850 GWp und einem Anteil von 0,2 % der FSZ an der PV-Gesamtleistung (entspricht einem dem mit dem Wirkungsgrad gewichteten oben angenommenen Flächenanteil der FSZ von 0,4 %), erhält man bei einer Leistungsdichte von 120 Watt pro m² eine notwendige Fläche von 14 km². Die Daten für 2010 und 2020 sind analog berechnet und in der Tabelle 4-46 aufgeführt.

Tabelle 4-47: Marktpotenzial der Farbstoffsolarzellen

Jahr	Installierte PV Leistung [GWp]	GIPV-Fläche (genutzt) [km ²]	FSZ-Anteil an genutzter GIPV-Fläche [%]	FSZ-Anteil weltweit installierte Leistung [%]	FSZ-Anwendungsfläche [km ²]
2010	10	900	0,01	0,005	0,1 – 0,2
2020	200	2.200	0,20	0,100	3,3 – 4,40
2030	850	3.500	0,40	0,200	14

Quelle: eigene Berechnungen

4.16.4 Foresight Rohstoffbedarf

Das seltene Metall Ruthenium ist ein essenzieller Bestandteil der Farbstoffsolarzelle. Es gehört zur Gruppe der Platinmetalle, die in der Natur nur in geringen Konzentrationen auftreten. Es wird als Koppelprodukt bei der Platinförderung abgebaut. Bezüglich der Zusammensetzung des Farbstoffkomplexes bestehen Alternativen z. B. auf der Basis von Zink oder auch in vollständig metallfreien organischen Verbindungen. Jedoch ist derzeit der Rutheniumfarbstoffkomplex aus Gründen der Beständigkeit am Besten geeignet.

Verschiedene Verfahren zur Wiederaufbereitung der Farbstoffsolarzellen und Wiedergewinnung der zahlreichen verwendeten Stoffe sind möglich. Ökonomische und ökologische Abwägungen müssen zeigen, welche Rohstoffe zurückgewonnen werden können (Lutz et al. 2007a). Nach Expertenmeinung ist eine Recycling-Quote von ca. 50 % des Farbstoffes und des Titandioxids möglich.

Tabelle 4-48: Globaler Rohstoffbedarf für die Farbstoffsolarzelle in t

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030
Platin	221	0	0,8
Ruthenium	29	0	1,0
Silber	20.200	0	14,0
Silizium	302.000	0	76,0
Titan	201.000	0	108,0

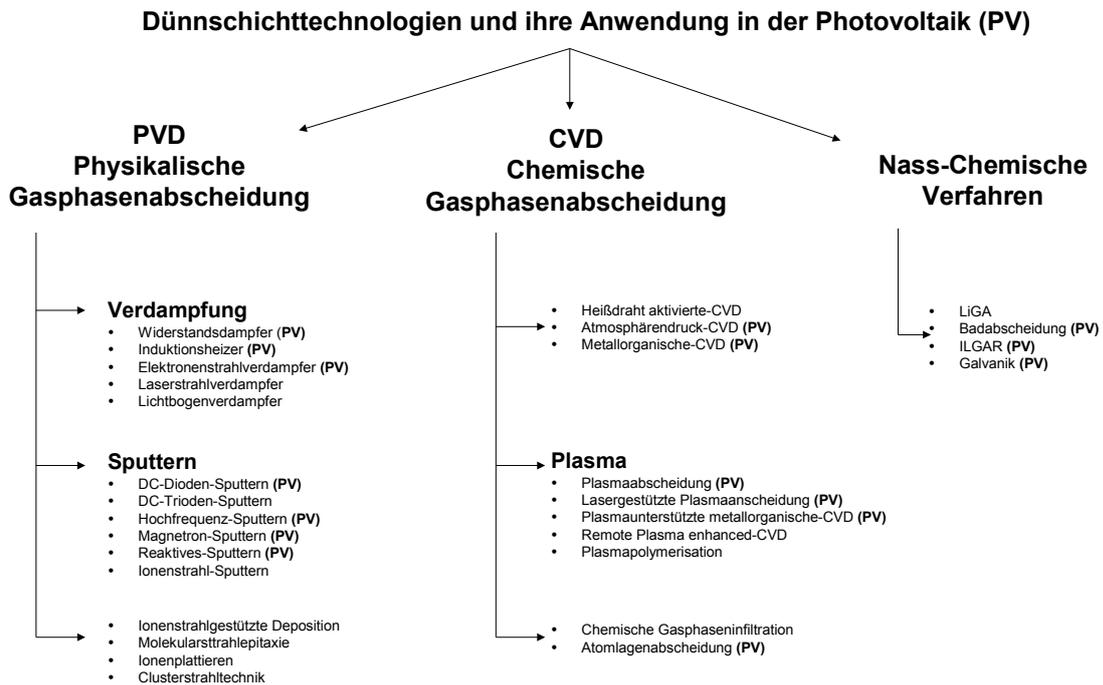
4.17 Dünnschicht-Photovoltaik

4.17.1 Technologiebeschreibung

Unter Dünnschichttechnologie wird das Auftragen von festen Stoffen im Mikro- bzw. Nanometerbereich bis hin zu monomolekularen Schichten verstanden, die ein physikalisches Verhalten (Festigkeit, optische Eigenschaften, elektrische Leitfähigkeit usw.) aufweisen, das von dem massiver Körper aus demselben Material abweicht. Die Dünnschichttechnologie umfasst nicht nur das Auftragungsverfahren 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. Die folgende Abbildung gibt einen groben Überblick über die Differenzierung der verschiedenen Dünnschichttechnologien und ihre beispielhafte Anwendung in der Photovoltaik (PV).

Abbildung 4-34: Überblick über die verschiedenen Dünnschichttechnologien



Quellen und Anmerkungen: eigene Darstellung basierend auf Chen 1996 und Kamalasanan 1996; PV – die bekanntesten in der Photovoltaik eingesetzten Dünnschichttechnologien

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 Di-

cke 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 Heteroübergänge³⁸ zwischen den verschiedenen Halbleitern. Folgende Varianten lassen sich unterscheiden³⁹:

- ▶ 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,
- ▶ CuInSe₂ mit Heteroübergang zu CdS (CIS)⁴⁰ und
- ▶ GaAs mit p-n-Übergang oder mit Heteroübergang.

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. Weitere Vorteile sind die relativ beliebigen Zellgrößen⁴¹ und Substratmaterialien bis hin zu Roll-to-Roll Verfahren sowie die Herstellung transparenter Zellen, die besonders für die Gebäudeintegration geeignet sind. Die Dünnschicht-Zelltypen haben einen Marktanteil am gesamten PV-Markt von zusammen rund 10,4 %.

Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die Marktanteile der wesentlichen Typen von Dünnschicht-Zellen im Jahr 2007:

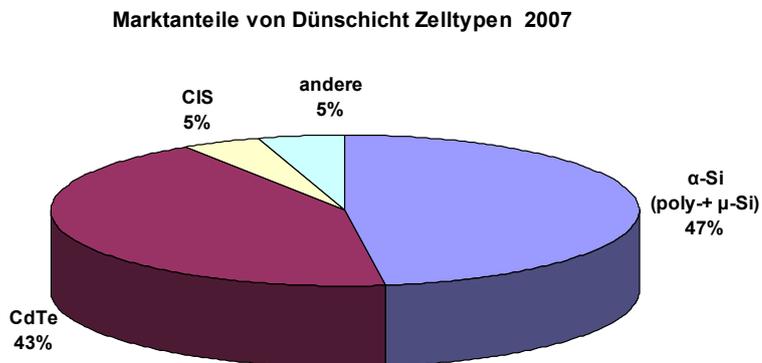
38 Als Heteroübergang (auch *Heterostruktur*, engl. Heterojunction) wird die Grenzschicht zweier unterschiedlicher nicht ideal leitender Materialien (Halbleitermaterialien) bezeichnet. Anders als bei einem p-n-Übergang ist hier nicht die Dotierungsart, sondern die Materialart verschieden. Die Halbleiter besitzen deshalb i. A. eine unterschiedliche Energie der Bandlücke. Heteroübergänge finden sich bei III-V-Halbleitern oder bei II-VI-Halbleitern.

39 Daneben sind noch niedermolekulare organische Farbstoffe mit Übergang zu TiO₂ (Grätzel-Zelle) sowie leitfähige Polymere mit Übergang zu TiO_x prinzipiell PV-Zellen, welche den Dünnschicht-Zellen zuzurechnen sind, die aber hier nicht weiter behandelt werden.

40 Indium (In) wird z. T. durch Gallium (Ga) und Selen (Se) durch Schwefel (S) ersetzt.

41 Während man bei Massivzellen bei der Größe auf die Wafergröße und damit auf ca. 20 cm beschränkt ist, hat man bei Dünnschichtsolarzellen die Möglichkeit zur großflächigen Herstellung, die nur durch die Größe der Beschichtungseinrichtung limitiert ist.

Abbildung 4-35: Marktanteil der verschiedenen Dünnschicht-Zelltypen 2007



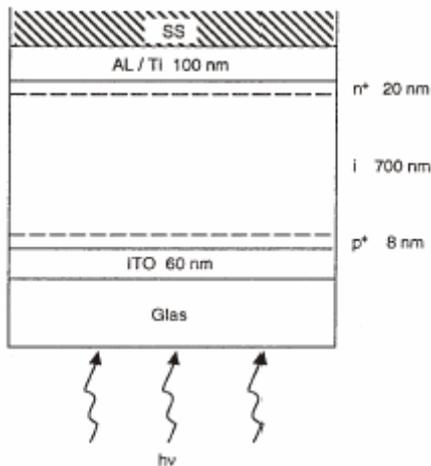
Quelle: Photon 2008

Im Folgenden werden die Technologien im Einzelnen beschrieben.

4.17.1.1 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 zwischengeschaltet 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. Die folgende Abbildung zeigt den Aufbau einer a-Si Zelle.

Abbildung 4-36: Aufbau einer Solarzelle aus amorphem Silizium



Quelle: Falk 2006

Eine wesentliche Eigenart von a-Si Zellen ist die Degradation unter Lichteinfluss ("Staebler-Wronski-Effekt"). Dem zufolge 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.

4.17.1.2 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 aufweisen⁴². 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 werden⁴³. 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.

4.17.1.3 Galliumarsenid-Zellen (GaAs)

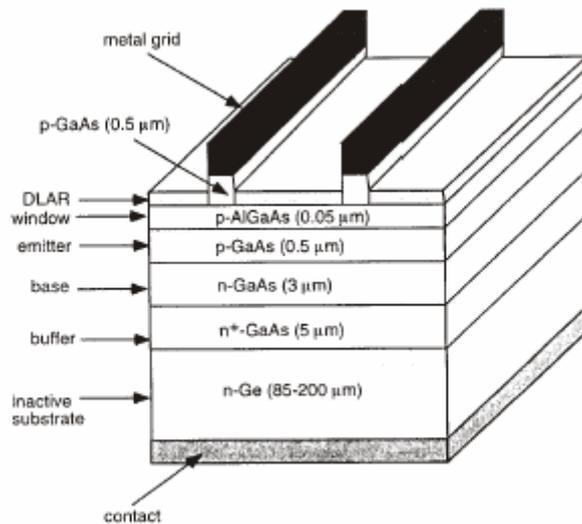
Galliumarsenid ist ein ideales Material für Solarzellen. Seine Energielücke ist optimal für Sonnenlicht und als direkter Halbleiter absorbiert GaAs das Licht schon in wenigen μm Schichtdicken vollständig. Allerdings ist die Kristallzucht insbesondere aufgrund der hohen Temperatur von 1.240°C so teuer, 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 auf einkristallinem Germanium-Wafern, wo aufgrund der ähnlichen Gitterkonstanten Epitaxie möglich ist. Als Abscheidungsverfahren 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.

⁴² 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.

⁴³ Erfolgreich erprobt wurde auch die hot-wire-CVD sowie die Ionen-unterstützte Verdampfung (IAD).

Abbildung 4-37: Aufbau einer GaAs-Zelle



Quelle und Anmerkung: Falk 2006. DLAR – Double Layer Anti Reflection⁴⁴

Neben den hier genannten Varianten gibt es noch zahlreiche weitere Kombinationen wie Galliumindiumphosphid, (Ga, In), P/Galliumarsenid oder GaAs/Germanium.

4.17.1.4 Cadmiumtellurid-Zellen (CdTe)

Cadmiumtellurid ist ein direkter Halbleiter mit einer günstigen Bandlücke und einem hohen Absorptionskoeffizienten, der eine geringe Schichtdicke von ca. 5 μm ermöglicht. 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 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)⁴⁵. Auf einer Indiumdotierung der TCO muss an der CdS-Schicht verzichtet werden, da Indium die CdS-Schicht stört.

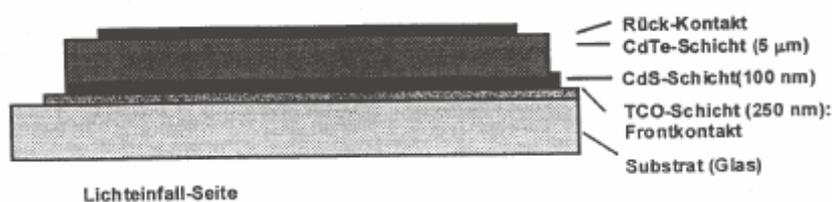
⁴⁴ Double Layer Anti Reflection – DLAR sind Anti-Reflexionsschichten, die bei hocheffizienter multi-junction GaAs-Technologie zum Einsatz kommen, z. B. auf Basis von $\text{TiO}_2/\text{MgF}_2$ oder ZnS/MgF_2 .

⁴⁵ 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.

Für die Akzeptanz der CdTe-Zellen ist der Cadmiumgehalt ungünstig. Aufgrund der Toxizität von Cadmium ist dessen Substitution Gegenstand intensiver Forschung. Allerdings ist das Schwermetall Cadmium in einer CdTe-Zellen relativ immobil. Gleichwohl ist die Mobilisierung von Cadmium bei extrem-Situationen wie Gebäudebrand möglich. Ferner liegen toxische Risiken bei der Modul-Herstellung und bei der Behandlung von Altmodulen. Der Wirkungsgrad liegt im Labor bei ca. 17 % und bei industrieller Fertigung zwischen 7 % und 9 %. Der Vorteil der CdTe-Zellen besteht in ihrer geringeren Temperaturempfindlichkeit sowie in ihrer hohen Empfindlichkeit gegenüber diffuser Solarstrahlung.

Eine typische CdTe-Solarzelle besteht aus fünf Einzelschichten: einer ca. 8 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. Die folgende Abbildung stellt den Aufbau einer CdTe-Zelle schematisch dar:

Abbildung 4-38: Aufbau einer CdTe-Zelle

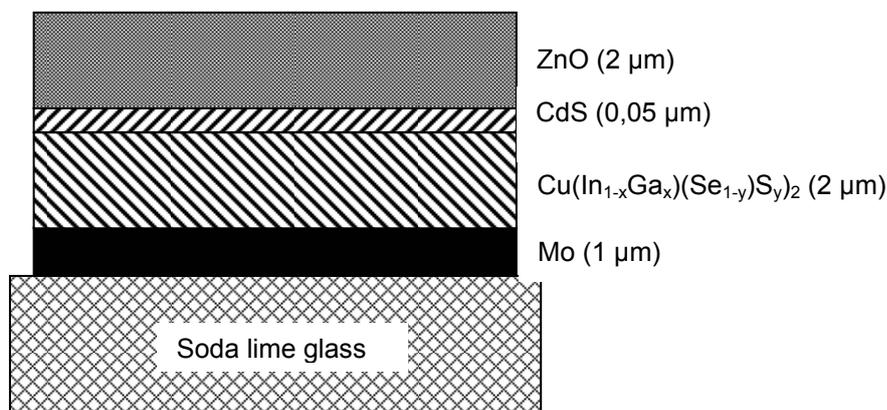


Quelle: Falk 2006

4.17.1.5 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 Verbindungshalbleitern ($\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})(\text{Se}, \text{S})_2$). Der prinzipielle Aufbau einer klassischen CIS-Solarzelle wird in der folgenden Abbildung gezeigt.

Abbildung 4-39: Aufbau einer CIS-Solarzelle (Falk 2006, eigene Darstellung)



In der Regel erfolgt der Zellaufbau auf Molybdän beschichteten Glassubstraten. Die Molybdänschicht übernimmt dabei die Funktion des Rückkontaktes. Molybdän wird entweder durch Sputtern oder durch Elektronenstrahlverdampfen auf das Glas aufgebracht. Auf der Molybdänschicht wird eine 1-4 μm dicke Absorberschicht aus p-leitendem $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ oder CuInS_2 erzeugt.

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 Kathodenzerstäubungsverfahren (Sputtern) abgeschieden.

Für die Herstellung der photoaktiven Halbleiterschicht existieren verschiedene Prozessvarianten: Durchlaufverfahren ("In-Line") mittels Koverdampfung, Kathodenzerstäubung und anschließende 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 %.

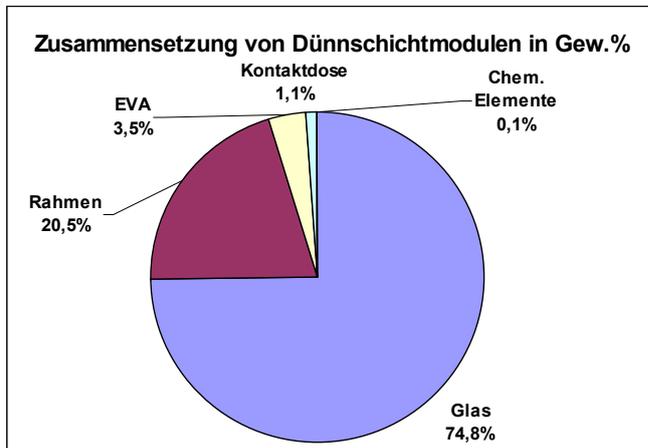
4.17.1.6 Sonstige Dünnschichtzellen

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.

4.17.2 Rohstoffinhalt

Die grobe Zusammensetzung von Dünnschichtmodulen stellt sich folgendermaßen dar:

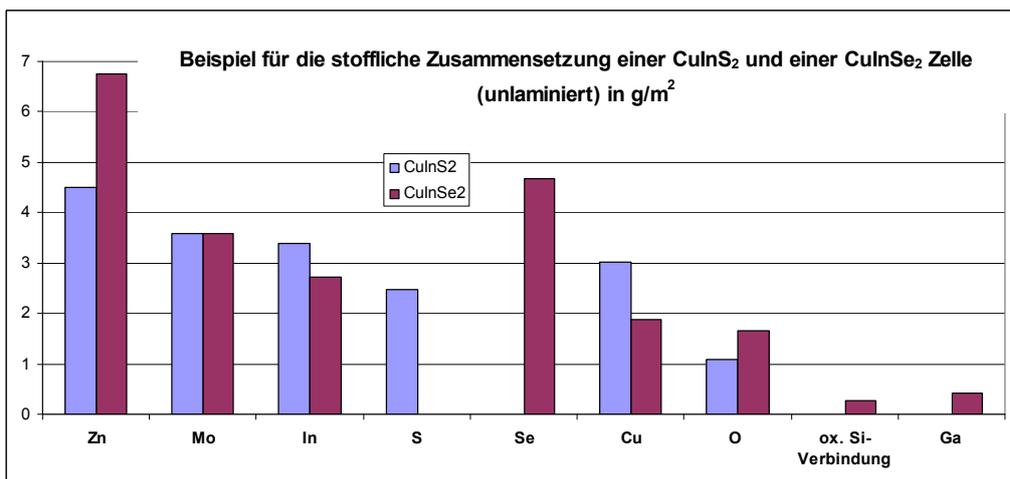
Abbildung 4-40: Zusammensetzung eines Dünnschicht PV-Moduls



Quelle: Ökopool 2004

Die Abbildung veranschaulicht die Dominanz von Glas und Rahmenkonstruktion. Der Gehalt an Halbleitermaterialien, die unter "chemische Elemente" subsumiert wurden, ist dagegen relativ gering. Die Zusammensetzung von CIS-PV Zellen ohne Glas, Rahmen und Laminatmaterial EVA (Ethylen-Vinyl-Acetat), stellt sich folgendermaßen dar:

Abbildung 4-41: Stoffliche Zusammensetzung einer CuInS_2 bzw. CuInSe_2 Zelle



Quelle: Naujoks 2000

Die Angaben beziehen sich auf eine Schichtdicke der Absorberbeschichtung von $1,5 \mu\text{m}$ (CuInS_2) bzw. $1,74 \mu\text{m}$ (CuInSe_2).

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 das bei einigen PV-Zellen die Frontelektrode statt aus ZnO als ITO-Schicht ausgeführt wird, was in diesen Fällen eine weitere indiumverbrauchende Komponente darstellt.

Die Daten in Abbildung 4-41 ergeben sich aus der beispielhaften Betrachtung eines aktuellen Produktionsprozesses für marktgängige CIS-Module. Sie liegen jedoch in der gleichen Größenordnung wie die Ergebnisse aus Berechnungen der molaren Massen und Dichten der Absorberbeschichtung wie sie in vergleichbaren Literaturangaben zu finden sind. Auch hier bleiben jedoch Indiumlote, Schichtstrukturierungen und geringe Materialausbeuten der indiumverbrauchenden Beschichtungsprozesse unberücksichtigt. Zu beachten ist jedoch, dass sich die Materialausbeuten je nach Beschichtungsverfahren unterscheiden. So kann eine nasschemische Elektrodeposition Materialausbeuten nahe 100 % erreichen. Bei Sputterprozessen ist die Frage, ob ein planares oder eine rotierendes Target genutzt wird, entscheidend für die Höhe der Materialausbeute. Für die spezifischen Rohstoffbedarfe an Halbleitermaterialien werden folgende Angaben gemacht:

Tabelle 4-49: Zellspezifische Rohstoffbedarfe (Quellen: Kautsch 2005, Falk 2006)

Zelltyp	Rohstoff	g/kWp
<i>CIS-Zelle</i>	Indium	50
	Selen	29
	Gallium	44
<i>GaAs-Zelle</i>	Arsen	40
	Germanium	37
<i>CdTe-Zelle</i>	Tellur	31
	Cadmium	100

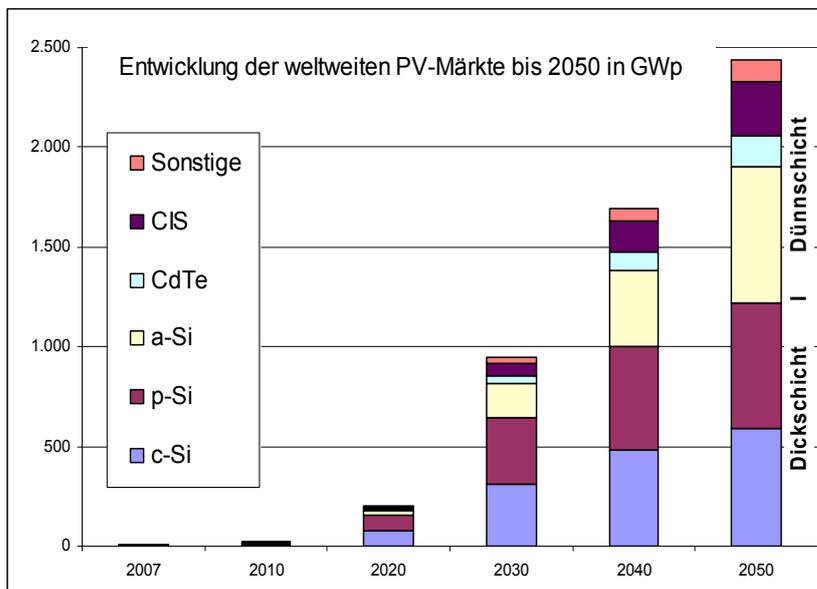
Insgesamt unterliegen die zellspezifischen Gehalte an Halbleitermaterialien erheblichen Unsicherheiten. Schichtdicken und Beschichtungsverfahren haben einen wesentlichen Einfluss auf den tatsächlichen Verbrauch von Halbleitermaterial und variieren von Hersteller zu Hersteller. Ferner unterscheiden sie sich erheblich zwischen Labormaßstab und Pilotanlagen und ändern sich auch während der anschließenden Prozessausweitung hin zur Massenfertigung.

4.17.3 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. Da der PV-Markt weiterhin durch die waferbasierten Siliziumtechnologien dominiert wird, stellt die Verfügbarkeit von hochreinem Solarsilizium einen wesentlich limitierenden Faktor beim weiteren Marktwachstum dar. In den letzten Jahren war der Markt für Solarsilizium durch einen Nachfrageüberhang gekennzeichnet. Diese Siliziumknappheit ist jedoch nur temporär, da mit dem Ausbau von Produktionskapazitäten sowie mit dem Einsatz neuer Produktionsverfahren begonnen wurde. In der Vergangenheit ist das Dünnschichtsegment überdurchschnittlich gewachsen. Die folgende Abbildung veranschaulicht die Schätzung über die zukünftige Marktentwicklung der PV-Märkte bis 2050⁴⁶:

⁴⁶ Für die Gesamtentwicklung des PV-Marktes liegen nachvollziehbare Schätzungen vor, die zumindest Bandbreiten der zukünftigen Entwicklungen angeben. Für die spezifische Entwicklung der einzelnen photovoltaischen Teilmärkte liegen nur rudimentäre Schätzungen vor. Die vorliegende Schätzung dient nur als erste grobe Skizzierung einer möglichen Entwicklung. Ihr liegen folgende Annahmen zugrunde. Die Entwicklung des PV Gesamtmarktes wurde (Nitsch 2005) entnommen, der sich dabei im Mittelfeld einer ganzen Reihe von möglichen Entwicklungen verortet, die sich teilweise um den Faktor 10 von einander unterscheiden. Die Entwicklung des Dünnschichtmarktes wurde (Sarazin 2007) entnommen. Dabei wurde allerdings angenommen, dass der dort bereits für das Jahr 2010 erreichte Marktanteil der Dünnschichttechnologien von 23 % erst im Jahr 2020 erreicht wird. In ähnlicher Weise wurde der von (PVNET 2002) bereits für das Jahr 2020 erreichte Dünnschichtanteil in Höhe von 50 % erst für das Jahr 2050 prognostiziert. Für spezifische Entwicklungen der einzelnen Dünnschichttechnologien wurden aufgrund der erheblichen Unsicherheiten die Marktanteile aus (Sarazin 2007) für das Jahr 2010 genommen und bis 2050 unverändert fortgeschrieben. Das Verhältnis von monokristallinen Silizium-Zellen und polykristallinen Silizium-Zellen wurde (Photon 4/08) entnommen und bis 2050 konstant gehalten.

Abbildung 4-42: Schätzung der Entwicklung der PV-Märkte bis 2050



Quelle: Sarazin 2007, Nitsch 2005, Prometheus 2007, PVNET 2002 und eigene Berechnungen

Im Jahr 2007 betrug die weltweite Solarzellenproduktion 4,3 GWp. Bis 2010 wird von einem jährlichen Wachstum von 40 % ausgegangen. Für 2010 bis 2020 wird nur noch von einem jährlichen Wachstum von 19 %, bis 2030 von 14 %, bis 2040 von 6 % und bis 2050 von 4 % ausgegangen. Insgesamt ist festzuhalten, dass die Dünnschichttechnologie⁴⁷ im PV-Markt zunehmend Marktanteile gewinnt. In einzelnen Marktsegmenten beherrscht die Dünnschicht-PV sogar der Markt. So basieren 60 % der photovoltaischen Freiflächenanlagen auf Dünnschicht-Zellen.

Folgende Tabelle fasst die weltweit installierte Leistung von PV und den Zubau für die vertieft untersuchten Dünnschicht-PV Zelltypen CIS und CdTe zusammen, wohingegen für den Ausbau der GaAs-Zellen, insbesondere auf Germanium, keine sinnvollen Projektionen vorgenommen werden können:

⁴⁷ Innerhalb der Dünnschichttechnologie besitzt CdTe mit 1,0 bis 1,25 US\$/W momentan die geringsten Produktionskosten. Die a-Si Technologie liegt jedoch mit 1,2 bis 1,5 US\$/W nur knapp dahinter. Durch Prozessverbesserungen, angetrieben von großen Anlagenherstellern (Applied Material, Oerlikon), besteht hier jedoch noch ein großes Kostenreduktionspotenzial. Die geringsten Produktionskosten können jedoch von der CI(G)S Technologie mit seinem kontinuierlichen Verfahren (roll-to-roll), höheren Wirkungsgraden und dünnen, flexiblen Substraten erwartet werden. Verschiedene Dünnschichttechnologien sind jedoch aufgrund ihrer Unausgereiftheit und unvorhersehbaren Hürden bei der Ausweitung der Produktionskapazitäten noch sehr schwierig zu prognostizieren.

Tabelle 4-50: Entwicklung des Zubaus an Dünnschicht-PV bis 2050

Jahr	Installierte PV Leistung [GWp]			Zubau [GWp/a]	
	Weltweit	davon CIS	davon CdTe	nur CIS	nur CdTe
2007	4,3	0,02	0,2	0,02	0,2
2010	21,1	0,6	0,4	0,2	0,1
2020	200,0	10,0	6,0	1,0	0,6
2030	947,0	67,0	40,0	5,7	3,4
2040	1.693,0	153,0	91,0	8,6	5,1
2050	2.440,0	269,0	159,0	11,6	6,9

Quelle: eigene Berechnungen

4.17.4 Foresight Rohstoffbedarf

Durch Multiplikation des zellspezifischen Rohstoffbedarfs (Tabelle 4-49) mit dem jährlichen Zubau (Tabelle 4-50) erhält man den zukünftigen Rohstoffbedarf.

Tabelle 4-51: Entwicklung der Rohstoffnachfrage für Dünnschicht-PV (t/a)

Jahr	Indium	Selen	Gallium	Cadmium	Tellur
	für CIS	für CIS	für CIS	für CdTe	für CdTe
2007	1	1	1	20	9
2010	10	6	9	5	2
2020	50	29	44	57	25
2030	285	165	251	336	148
2040	430	249	378	511	225
2050	580	336	510	687	302

Quelle: eigene Berechnungen

Bis wenigstens zum Jahr 2010 wird der Bedarf an Indium für die Produktion von CIS-Modulen auch bei einem sehr raschen Aufbau von Produktionskapazitäten ohne Einfluss auf den Indiummarkt bleiben. Im Bezugsjahr 2030 wird mit 285 t knapp die Hälfte der Jahresproduktion an Indium im Jahr 2006 alleine für die CIS-PV gebraucht. 2050 erreicht der Indiumbedarf für die CIS PV die Jahresproduktion an Indium im Jahr 2006 - vorausgesetzt, dass PV einen merklichen Anteil am Strommarkt und CIS-Module einen merklichen Anteil am PV-Markt haben.

Der durch die CIS-PV ausgelösten Nachfragesteigerung nach Indium in Halbleiterqualität wird nicht vollständig durch Angebotserhöhung begegnet werden können. Zudem werden durch die dynamisch wachsende Flachbildschirmindustrie zusätzliche Nachfra-

gesteigerungen ausgelöst werden (Technologiesynopse ITO auf Displays, Kapitel 4.8). Die Reinheitsanforderungen an Indium in Solarzellen sind höher als bei der Verwendung in ITO-Material. Die Preise für hochreines Indium liegen heute zwischen 1.000 und 3.000 US\$. Die Indium-Verteuerung bei hoher Nachfragesteigerung kann die Entwicklung der CIS-Technologie behindern.

Die Raffinerieproduktion von Selen betrug im Jahr 2006 weltweit ca. 1.540 t. Im Jahr 2030 beträgt der Selenbedarf für CIS-PV mit 165 t über 10 % der heutigen Weltproduktion. Auch wenn zurzeit die Selenproduktion schon in der Nähe der maximal möglichen Produktion von ca. 2.500 t liegt, sind ausreichend Reserven vorhanden, um die durch die CIS-Photovoltaik ausgelöste Bedarfssteigerung zu erfüllen.

Die Produktionsmenge an Gallium lag im Jahr 2006 weltweit bei 99 t. Damit liegt die im Jahr 2030 durch die CIS-PV ausgelöste kumulierte Nachfragesteigerung bei dem Zweieinhalbfachen der derzeitigen Produktionsmenge. Allerdings wird Gallium als Begleitelement bei der Zink-, Kupfer und Aluminiumgewinnung in großen Mengen mit gefördert, so dass der Nachfragesteigerung durch die CIS-Solarzellen vermutlich elastisch begegnet werden kann. Gleichwohl sind erhebliche Preissteigerungen, insbesondere bei hochreinem Gallium, zu erwarten.

Cadmium liegt mit einer Raffinationsproduktion im Jahr 2006 von knapp 20.000 t um Größenordnungen über den Daten für andere Halbleitermaterialien. Bei derzeit wirtschaftlich abbaubaren Reserven in Höhe von 490.000 t und einem gleichzeitigen Bedarfsrückgang in traditionellen Anwendungsfeldern dürften die Verfügbarkeiten von Cadmium für CdTe-Zellen mittel- und langfristig ausreichend sein.

Die Produktionsmenge an Tellur lag im Jahr 2006 weltweit bei 132 t (ohne USA). Damit übersteigt die bis zum Jahre 2030 durch die Herstellung von CdTe-Zellen nachgefragte Tellurmenge die heutige weltweite Jahresproduktion. Die mittel- und langfristige Verfügbarkeit dürfte damit ernsthaft gefährdet sein, sofern PV einen merklichen Anteil am Strommarkt und CdTe-Module einen merklichen Anteil am PV-Markt haben. Daher ist auch bei Tellur in Zukunft mit erheblichen Preissteigerungen zu rechnen.

Nicht gelungen ist die Quantifizierung des Germaniumbedarfs. Für Zellen, die Germanium als Absorbermaterial benutzen, wie GaAs-Ge und GaInP-GaAs, existieren keine verlässlichen Werte hinsichtlich ihrer Marktanteile. Es ist jedoch anzunehmen, dass es sich um sehr kleine Nischenmärkte für besondere Hochleistungsanwendungen wie die Raumfahrt handelt. Relevante Nachfrageeffekte dürften von GaAs-Dünnschichten auf einkristallinen Germanium-Wafern ausgehen. Allerdings sind auch deren Marktanteile nicht belastbar zu prognostizieren. Da Germanium nur in relativ geringen Mengen produziert wird – im Jahr 2006 waren es gerade einmal 90 t – ist nicht auszuschließen,

dass sich die Nachfragesteigerungen insbesondere nach hochreinem Germanium durch Dünnschicht-PV deutlich bemerkbar machen werden. Germanium in Halbleiterqualität ist sehr teuer, und der Preis schwankt je nach Nachfrage und Reinheit zwischen 400 und 2.000 US\$. Da der Markt hierfür noch klein ist, lässt sich schwer abschätzen, wie weit der Preis bei einer verstärkten Nachfrage steigen wird und ob Germanium für Solarzellenanwendungen kostengünstig genug angeboten werden kann, um das Wachstum der Dünnschicht-Photovoltaik nicht zu bremsen.

Folgende Tabelle fasst den Verbrauch für 2006 (vereinfacht den Werten von 2007 gleichgesetzt) und die Bedarfsvorschau 2030 zusammen:

Tabelle 4-52: Globaler Rohstoffbedarf für Dünnschicht PV in t

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030	
			kumuliert	Jahresbedarf
Indium	580	1	3.335	285
Selen	1.541	1	1.934	165
Gallium	99	1	2.935	251
Tellur	132	9	1.742	148
Cadmium	19.300	20	3.960	687

Quelle: eigene Berechnungen

Der zunehmende Einsatz von Dünnschichtsolarzellen wird die Nachfrage nach Halbleitermaterialien erheblich erhöhen. Insbesondere der Teilmarkt der hochreinen Rohstoffe in Halbleiterqualität wird in den meisten Fällen um eine bis zwei Größenordnungen wachsen. Bei einer massenhaften Etablierung von CIS-, CdTe- oder GaAs-Ge-Dünnschicht-PV am Markt werden mittel- bis langfristig Versorgungsfragen eine große Rolle spielen:

- ▶ Versorgungsengpässe zeichnen sich am ehesten beim Indium für CIS ab, dessen Reserven im Besonderen limitiert und dessen Nachfrage auch durch den wachsenden Markt der Flachbildschirme angeheizt wird.
- ▶ Problematisch dürfte die mittel- und langfristige Verfügbarkeit auch bei Tellur werden, sofern sich CdTe-Zellen am Markt behaupten.
- ▶ Sollten sich GaAs-Dünnschichten auf einkristallinen Germanium-Wafern durchsetzen, so könnte auch die Germanium-Verfügbarkeit zum limitierenden Faktor des Dünnschicht-PV-Ausbaus werden.

Die stark wachsende Rohstoffnachfrage durch Dünnschicht-PV wird erheblichen Einfluss auf die Preise haben. Hierbei spielt es sicherlich eine wichtige Rolle, inwieweit andere konkurrierende Märkte, insbesondere der Mikroelektronik, den Preis für die einzelnen Rohstoffe mitbestimmen und resistenter gegen Preiselastizitäten sind als die Dünnschicht-Photovoltaik. Bis 2030 sollte die Produktion von Dünnschichtmodulen den Schritt zur Massenfertigung vollzogen und die damit verbundenen Kostensenkungspotenziale ausgeschöpft haben.

Eine große Unsicherheit für die zukünftige Nachfrage nach Halbleitermaterial durch die Dünnschicht-PV ist durch deren spezifischen Rohstoffbedarf bestimmt. Dieser wird geprägt durch den technologischen Fortschritt hinsichtlich der zu realisierenden Schichtdicken und den Anstrengungen zur Kreislaufführung. Die Recyclingaktivitäten bei Dünnschicht-PV beschränken sich bisher auf stückige Reststoffe, zum Beispiel Sputtertargets. Ein Recycling von PV-Modulen ist bisher erst in der Entwicklung, wird aber umweltpolitisch drängender⁴⁸. Dem stehen jedoch geringe Massenanteile an Halbleitermaterial in den Beschichtungen und damit fehlende ökonomische Anreize als Recyclinghemmnisse gegenüber.

⁴⁸ Während sich die thermische Öffnung der Module als robustes und flexibles Verfahren durchzusetzen scheint, ist die Ablösung der Halbleitermaterialien und ihre Integration in bestehende metallurgische Recyclingverfahren noch ungeklärt. Ebenfalls ungeklärt ist die Rückgewinnung von Halbleitermaterial aus den Beschichtungsaggregaten und den Strukturierungsprozessen der Halbleiterschichten.

4.18 Solarthermische Kraftwerke

4.18.1 Technologiebeschreibung

Ähnlich wie bei einem konventionellen Kraftwerk besteht ein solarthermisches Kraftwerk (Concentrating Solar Power – CSP) aus einer wärmeerzeugenden Einheit (Solarboiler) und ein Wärmekraftmaschine, die die thermische Energie über mechanische in elektrische Energie umwandelt. Für die Konversion wird eine Turbine benötigt. Die Wärme wird über die Bündelung des Sonnenlichts erzeugt. Hierbei kommen sowohl Dampfturbinen, als auch kombinierte Gas- und Dampfturbinen zum Einsatz, die aus der konventionelle Kraftwerkstechnologie stammen (Ragwitz 2007).

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. Die wesentlichen technologischen Innovationen konzentrieren sich bei solarthermischen Kraftwerken auf den solaren Anteil der Anlage. Sowohl das Kostensenkungspotenzial, als auch die Option zur Effizienzsteigerung sind in diesem Bereich signifikant (Ragwitz 2007).

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Hauptkonzepte Parabolrinne, Fresnel-Kollektor, Solarturm- und Parabolschüsselsystem vorgestellt:

Parabolspiegel Röhrensystem – Parabolrinne

Die Parabolrinne ist derzeit die am weitesten verbreitete Technologie zur solarthermischen Stromerzeugung. Das Sonnenlicht wird durch parabolartig geformte Spiegel auf eine Receiveröhre, die sich in der Brennnlinie befindet, fokussiert. Ein in der Röhre befindliches Wärmeträgermedium wird erhitzt. Als thermisches Transportmedium werden synthetische Öle eingesetzt. Die Bestrebungen gehen jedoch dahin, die Dampferzeugung direkt in den absorbierenden Röhren des Kollektors zu realisieren, da auf diesem Weg eine Kostenreduktion erreicht werden kann (Ragwitz 2007).

Abbildung 4-43: Parabolrinnen zur solarthermischen Stromerzeugung



Quelle: Ragwitz 2007

Fresnel-Kollektoren

Bei Fresnel-Kollektoren wird die Form eines Parabolspiegels durch viele kleine Spiegel angenähert. Dadurch entstehen Wirkungsgradverluste, denen jedoch Kosteneinsparung durch einfache Produktionsverfahren entgegenstehen (Ragwitz 2007).

Bei beiden Technologien ist angestrebt, den Materialbedarf für die Ständerkonstruktion weiter zu senken. Dabei wird für Fresnel-Kollektoren deutlich weniger Material verbraucht.

Tabelle 4-53: Materialverbrauch für die Ständerkonstruktion solarthermischer Kraftwerke (Parabolrinnen und Fresnel-Kollektoren)

Materialeinsatz	kg/m ² Spiegelfläche	kg/MW
Parabolrinnen	134,8	99
Fresnel	27,7	29

Quelle: Hautmann 2008

Solarturm-Systeme

Beim Solarturm-System sitzt der Receiver an der Spitze eines zentralen Turmes, der von Hunderten von Spiegeln (Heliostaten) umgeben ist, die der Bewegung der Sonne folgen, das Licht umlenken und auf den Receiver fokussieren. Als thermisches Transportmedium werden geschmolzene Salze, Luft und auch Wasser eingesetzt. Die Wärme kann in Dampfkraftanlagen und zukünftig auch in Gasturbinen eingesetzt werden (ECN 2007, Ragwitz 2007).

Parabolschüsselsysteme

Parabolschüsselsysteme sind im Vergleich zu anderen Kollektorsystemen relativ kleine Einheiten. In ihrem Brennpunkt befindet sich ein Stirlingmotor oder eine kleine Gasturbine. Der Durchmesser beträgt typischerweise 5 – 15 m bei einer Leistung von 5 – 25 kW. Aufgrund Ihrer Größe eignen sich Parabolschüsselsysteme besonders für die dezentrale Energieversorgung (Ragwitz 2007).

4.18.2 Rohstoffinhalt

Der Spiegelhersteller Flabeg, dessen für den kommerziellen Einsatz produzierte Parabolrinnenkraftwerke derzeit alle mit Solarspiegeln ausgestattet sind, gibt den Silbergehalt pro m² Spiegelfläche mit 0,7 bis 1 Gramm an (Knebel 2008). Die Menge pro Fläche ist bei allen Technologien (Heliostaten, Parabolspiegel, Fresnelspiegel) gleich. Nur die Auslegung der Kraftwerke, also die Fläche pro MW, ändert sich. Die Auslegung des Beispielkraftwerks wird hier für alle Kraftwerke dieser Technologie angenommen. Sie hängt jedoch sehr von der lokalen solaren Einstrahlung ab. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über den benötigten Silberbedarf.

Tabelle 4-54: Silberinhalt von Solarspiegeln (Silberbeschichtung)

	kg/MW	kg/m ²	Apertur [m ²]	Leistung [MW]
Fresnel	13,75	0,001	696.000	80
Parabolrinne	3,75	0,001	412.020	80
Turm	7,57	0,001	151.400	20

Quellen und Anmerkungen: Knebel 2008; Die Auslegungen des Fresnel- und Parabolrinnenkraftwerkes stammen von Viebahn (2004), die des Turmkraftwerkes entsprechen dem Solar Power PS20 der Firma Abengoa Geyer (2008)

4.18.3 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. Aufgrund 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 (2008) sind weltweit 532 MW solarthermische Kraftwerke am Netz. In diesem Jahr sind Kraftwerke mit einer Leistung von 102 MW (50 MW Parabol, 32 MW Fresnel und 20 MW Turm) ans Netz gegangen. Da die Technologielinien noch hinsichtlich ihrer

Wirtschaftlichkeit untersucht werden, ist derzeit nicht klar, welche sich in Zukunft durchsetzen werden.

Weltweit sind bis 2012 6.288 MW Kraftwerksleistung geplant. Spanien, in dem derzeit ein Drittel aller Projekte geplant sind, sieht für solarthermische Kraftwerke aktuell eine Limitierung der Förderung (Einspeisevergütung) auf 500 MW installierte Leistung bis 2010 vor. In den USA verpflichten sich Energieversorger, bis 2020 10.000 MW solarthermische Kraftwerke zu installieren. Die Energieversorger schließen hierfür Abnahmeverträge für einen Garantipreis pro kWh mit den Herstellern und Betreibern (Ausra, Solar Millenium, Solel Inc.) ab (Clinton Global Initiative 2007; Hautmann 2008; Nitsch 2008).

Zwei Projektionen sollen die möglichen Entwicklungen abbilden:

- ▶ In Projektion A "business as usual" wird der Durchschnitt von 1572 MW jährlich installierter Leistung bis zum Jahr 2030 fortgesetzt.
- ▶ In Projektion B nimmt die jährlich zusätzlich installierte Leistung ab dem Jahr 2012 bis 2017 um 10 %, von 2017 bis 2022 um 7,5 % und 2022 bis 2030 um 5 % zu.

In Projektion A beträgt die kumulierte installierte Kraftwerkskapazität im Jahr 2030 35 GW. In Projektion B sind es im Jahr 2030 62 GW. In beiden Szenarien wird angenommen, dass im Jahr 2030 der Marktanteil der Parabolrinnen- und Turmkraftwerke je 40 % und der Fresnelkraftwerke 20 % beträgt.

Tabelle 4-55: Neu installierte Leistung von Parabolrinnen-, Fresnel- und Turmkraftwerken im Jahr 2008 und 2030

Neu installierte Kapazität [MW]	2008		2030	
	Status Quo	Projektion A	Projektion B	
Parabolrinne	50	629	2.050	
Fresnel	32	314	1.025	
Turm	20	629	2.050	
Summe	102	1.572	5.126	
Kumulierte installierte Kapazität [MW]	532	35.116	62.224	

Quellen: Geyer 2008; Hautmann 2008; Nitsch 2008

4.18.4 Foresight Rohstoffbedarf

Vereinfacht werden für 2006 die näherungsweise bekannten Ausgangswerte für das Jahr 2008 angesetzt.

Tabelle 4-56: Globaler Rohstoffbedarf für solarthermische Kraftwerke in t

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030
Silber	20.200	0,8	11,0 – 43,6

Im Jahr 2008 wurden für die Silberbeschichtung von Solarspiegeln 0,8 t Silber benötigt, was hier näherungsweise auch für 2006 angenommen wird. Im Jahr 2030 werden in Projektion A 11 t, in Projektion B knapp 44 t Silber benötigt. Im Vergleich zu der weltweiten Silberproduktion von 20.200 t im Jahr 2006 sind selbst die 43,6 t Bedarf im Jahr 2030 relativ wenig.

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.

Für die Firma Flabeg gibt es derzeit keine Alternative zu Silberbeschichtung, andere Hersteller wie Alanod stellen Spiegel aus eloxiertem Aluminium her (Knebel 2008). Es ist nicht klar, wie groß der Marktanteil von Aluminium- und Silberspiegeln jeweils sein wird.

4.19 Stationäre Brennstoffzellen – SOFC

4.19.1 Technologiebeschreibung

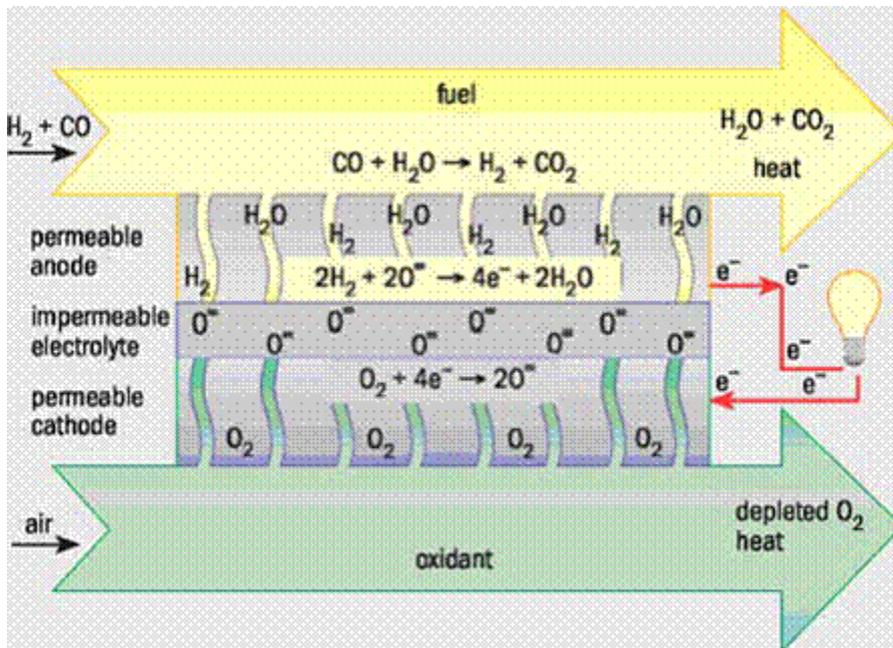
Feststoffoxidbrennstoffzellen (Solid Oxide Fuel Cell – SOFC) erzeugen sehr effizient elektrochemisch Strom, da der Wirkungsgrad nicht wie bei konventionellen Wärmemaschinen durch den Carnot'schen Wirkungsgrad beschränkt ist. Brennstoffzellen besitzen einige Vorteile gegenüber traditionellen Energieumwandlungssystemen: der hohe Wirkungsgrad, die Verlässlichkeit, die Modularität, die Möglichkeit der Nutzung unterschiedlicher Treibstoffe, niedrige Emissionen und Geräuscharmheit.

Kraft-Wärme-Kopplungssysteme, die mit SOFCs funktionieren, befinden sich im Demonstrationsstadium. Die meisten Systeme arbeiten mit Erdgas. Verschiedene Hersteller entwickeln derzeit SOFC-Systeme als stationäre Kraft-Wärme-Kopplungsanlage mit einer Leistung über 100 kW_{el} – darunter u. a. Siemens Power Generation, Mitsubishi Heavy Industries, GE Energy, Rolls Royce und Ztek. Auch für kleine KWK-Systeme im Haus (<10 kW_{el}) gibt es unterschiedliche Hersteller wie Hexis, Acumentrics, Ceramic Fuel Cells und Fuel Cell Technologies (Primas 2007).

Eine SOFC besteht aus zwei porösen Elektroden, zwischen denen ein dichtes ionenleitendes Elektrolyt liegt. Die Arbeitsweise einer Zelle ist in Abbildung 4-44 illustriert. Der an der Kathode zugeführte Sauerstoff reagiert mit den von dem externen Stromkreis kommenden Elektronen zu Oxidionen (O⁻), die zur Anode (Treibstoffelektrode) durch das ionenleitende Elektrolyt wandern. In der Anode rekombinieren die Oxidionen 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.

In den letzten Jahren wurden die Arbeitstemperaturen von 900 – 1000 °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 Materialien für die Zellkomponenten werden nach ihren elektrischen Leiteigenschaften ausgewählt, die für die einzelnen Komponenten von Bedeutung sind.

Abbildung 4-44: Funktionsweise einer Feststoffoxidbrennstoffzelle



Quelle: Electrochemistry Encyclopedia 2008

Yttriumdotiertes Zirkoniumdioxid (YSZ) bleibt weiterhin das meist benutzte Material für das Elektrolyt wegen der ausreichenden ionischen Leitfähigkeit, der chemischen Stabilität und der mechanischen Festigkeit. 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 andere Materialien wurden erprobt. Scandiumdotiertes Zirkoniumdioxid (ScSZ) besitzt eine hohe Ionenleitfähigkeit, aber die hohen Kosten machen den Einsatz von Scandium derzeit unattraktiv. Dennoch plant derzeit die Hexis AG auf ScSZ umzustellen (Electrochemistry Encyclopedia 2008; Schuler 2008)

Gadolinium- oder Samariumdotiertes Zeroxid haben eine höhere Ionenleitfähigkeit als zirkoniumbasiertes Material. Zeroxidbasierte Materialien werden 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).

4.19.2 Rohstoffinhalt

Der Materialverbrauch hängt von der Bauweise der SOFC ab. Scandium als Dotierung von Zirkoniumdioxid wird nur in elektrolytgetragenen Brennstoffzellen eingesetzt, da der Effekt der höheren Leitfähigkeit nur bei einer Dicke der Elektrolytsschicht von 100 - 200 μm und hohen Temperaturen zum Tragen kommt. Der Effekt der höheren Leitfähigkeit geht bei anodengetragenen Brennstoffzellen, bei denen die Elektrolytschicht lediglich 7 – 10 μm dick ist, verloren (Jörissen 2008; Schuler 2008; Steinberger-Wilckens 2008).

Die poröse Anode wird meistens aus Nickel-YSZ bzw. Nickel-ScSZ hergestellt, je nachdem mit welchem Material das Elektrolyt dotiert ist. Dabei besteht nur ca. ein Viertel des Volumens aus YSZ 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 Flächenleistungsdichte beträgt bei SOFC, die auf Langlebigkeit ausgelegt sind, 0,3 – 0,4 W/cm^2 . Der Scandiumdotierungsgrad liegt bei 5 – 10 Mol-%, der Yttriumdotierungsgrad bei 3 – 10 Mol-%. Die Dichte⁴⁹ von YSZ ist 6,6 g/cm^3 . Wird von einem Produktionsausschuss von 50 % ausgegangen, werden von allen Werten die Mittelwerte genommen und die Molprozent in Gewichtsprozent umgerechnet, so kommt man auf die in Tabelle 4-57 angegebenen Materialbedarfe für Scandium, Yttrium und Zirkonium für SOFCs.

Tabelle 4-57: Yttrium-, Scandium- und Zirkoniumdioxidverbrauch in SOFC

Verbrauch (ScSZ)	[g/W]
Scandium	0,01
Zirkonium	0,40
Verbrauch (YSZ)	[g/W]
Yttrium	0,01
Zirkonium	0,30

Quelle: Buchkremer 2008; Schuler 2008; Wikipedia 2008i

4.19.3 Foresight industrielle Nutzung

Hier werden die Produktionszahlen in MW der "EU Deployment Strategy" für Brennstoffzellen im stationären Bereich angenommen. Ab dem Jahr 2015 sollen mehr als

⁴⁹ Hier wird davon ausgegangen, dass die Dichte von ScSZ gleich hoch ist.

1 GW Brennstoffzellen in Betrieb sein. Davon sollen 80.000 1-bis-10-kW-Systeme für den Hausgebrauch, 2.600 10-kW-bis-1-MW-Systeme und 50 Systeme mit 1 MW und mehr für den industriellen Gebrauch installiert sein. Wird für kleine Systeme ein Durchschnittswert von 5 kW und für den industriellen Gebrauch von 250 kW bzw. 1 MW angenommen, kommt man auf eine Verteilung von 36 % (400 MW) für Kleinanlagen (< 10 kW) und 59 % bzw. 5 % für industrielle Anlagen (650 MW bzw. 50 MW). Es wird angenommen, dass im Jahr 2015 ein Neuntel der Gesamtleistung von 1,1 GW, also 122 MW, installiert wird. Die in der Europäischen Union neu installierte Leistung im Jahr 2015 von 122 MW wird mit 2,7 multipliziert, um so auf die weltweit neu installierte Leistung zu kommen (355 MW)⁵⁰.

Es wird angenommen, dass in einem von Hemmnissen dominierten SOFC-Markt ab dem Jahr 2015 der Weltmarkt jährlich um 5 %, ab 2020 um 3 % und ab 2025 um 1 % wächst. In der wahrscheinlicheren Projektion B liegt das jährliche Wachstum nach 2015 bei 7,5 %, ab 2020 bei 10 % und ab 2025 bei 12,5 %.

Im Jahr 2030 bleibt die prozentuale Verteilung der Leistungsklassen gleich. Außerdem wird davon ausgegangen, dass etwa 25 % der Kleinanlagen elektrolytgestützte ScSZ-SOFC und 25 % anodengestütztes YSZ-SOFC sind. Die restlichen 50 % sind Polymerelektrolytbrennstoffzellen. 50 % der industriellen Anlagen im Jahr 2030 sind YSZ anodengestützte SOFC, die restliche Hälfte sind Schmelzkarbonatbrennstoffzellen.

Tabelle 4-58 gibt die neu installierte Leistung von stationären Brennstoffzellen im Allgemeinen und SOFC im Speziellen an.

Im Jahr 2005 wurden ca. 5 Tonnen Scandiumdioxid auf den Weltmarkt gebracht, davon ca. 2 t aus der Minenproduktion und 3 t aus Altbeständen (Eaglefield 2005). Die 0,5 – 3 t Scandium, die im Jahr 2030 als Scandiumbedarf für SOFC abgeschätzt wurden, entsprechen einer Scandiumproduktionsmenge, die mit der heutigen Kapazität nicht bereitgestellt werden kann.

Der Yttrium- bzw. Zirkoniumbedarf fällt in Projektion A mit seinem Bedarf im Jahr 2030 von 2 t Yttrium bzw. 80 t Zirkon im Vergleich zur Produktion im Jahr 2006 wenig ins Gewicht. Bei Zirkon könnten bei stärkerem Wachstum in Projektion B bis 2030 relevante Nachfrageeffekte eintreten.

⁵⁰ Der Anteil des Europäischen GDPs an der Summe der GDPs der entwickelten Staaten und Saudi-Arabien beträgt ca 36 % (IMF 2008).

Tabelle 4-58: Neu installierte Leistung an stationären Brennstoffzellen

	2006	2030		2030	
	[MW]	Projektion A [MW]	Marktanteil Kleinanlagen [%]	Projektion B [MW]	Marktanteil Kleinanlagen [%]
Kleinanlagen (<10 kW): ScSZ- SOFC	k.A	47	9	38	9
Kleinanlagen (<10 kW): YSZ- SOFC	k.A	47	9	38	9
industrielle Anlagen (10kw-1 MW): YSZ- SOFC	k.A	140	28	115	28
industrielle Anlagen (> 1 MW): YSZ- SOFC	k.A	16	3	13	3
neu installierte Ka- pazität SOFC	k.A	250	50	205	50
neu installierte Ka- pazität stationäre Brennstoffzellen	k.A	501	100	410	100

Quell und Anmerkung: eigene Berechnungen, basierend auf ECN 2007

4.19.4 Foresight Rohstoffbedarf

Aus den Rohstoffangaben und den Marktzahlen ist in folgender Tabelle der Rohstoffbedarf für SOFC-Systeme berechnet worden.

Tabelle 4-59: Globaler Rohstoffbedarf für stationäre SOFC Systeme in t

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030
Sc	1,3	k. A.	0,5 – 3
Y	7.008	k. A.	2 – 12
Zr	1.180	k. A.	80 – 480

Quelle und Anmerkungen: eigene Berechnungen, auch des Metallgehalts aus den Produktionsangaben für die Oxide in USGS 2007 und USGS 2008

Der hohe Preis von Scandium (ja nach Reinheitsgrad zwischen 700 und 2.100 \$/kg (USGS 2007a) scheint derzeit noch eine Hürde für den Einsatz von Scandium als Dotermaterial in Brennstoffzellen zu sein. Es ist relativ teuer, Scandium aus den Mineralien zu extrahieren. Preis und Verfügbarkeit von Scandium waren für das Forschungszentrum Jülich ein Argument für die weniger materialabhängige yttriumdotierte anodengestützte Brennstoffzellenbauform (Buchkremer 2008). Anscheinend reicht die Nachfrage nach Scandium derzeit nicht aus, die verfügbaren Scandiumressourcen zu

erschließen. Dies könnte sich durch die Erschließung auch anderer Zukunftstechnologien wie Al-Sc-Legierungen in der Flugzeugkonstruktion perspektivisch ändern.

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. Der Marktanteil von scandiumgestützten SOFCs ist deshalb schwer abzuschätzen. Derzeit plant in Deutschland nur die Hexis AG, auf scandiumgestützte SOFCs umzustellen.

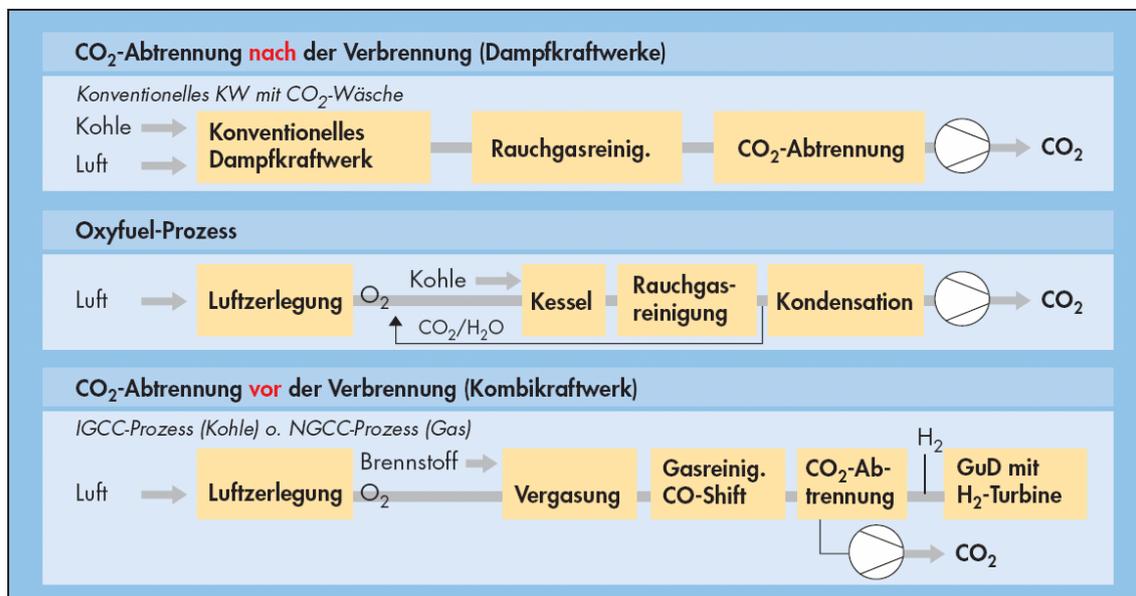
4.20 CCS – Carbon Capture and Storage

4.20.1 Technologiebeschreibung

Carbon Capture and Storage (CCS) bedeutet Abtrennung und die geologische Speicherung von CO_2 . CCS-Technologien sollen künftig das bei Verbrennungsprozessen frei werdende CO_2 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 CO_2 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 CO_2 den Druck erhöhen (Enhanced Oil Recovery).

Das Konzept der CO_2 -Abscheidung bei Kraftwerken basiert darauf, das CO_2 durch technische Verfahren teilweise oder vollständig in einem modifizierten Umwandlungsprozess abzutrennen. Man unterscheidet grob zwischen drei Verfahren: Post-Combustion Capture, Oxy-Fuel und Pre Combustion.

Abbildung 4-45: Schematische Darstellung der drei Carbon-Capture-Verfahren



Quelle: BINE 2007

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 CO_2 aus dem Rauchgas entfernt wird. Bei einem chemischen Verfahren wird in einem Reaktorgefäß das Rauchgas im Gegenstrom mit einem Lösungsmittel – Aminlösungen wie Monoethanolamin oder Diethanolamin – in Kontakt gebracht und so weitgehend von CO_2 befreit. Unter Zufuhr von Wärme wird das CO_2 in einem zweiten Reaktor gelöst. 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 (H_2S , COS , HCN , NH_3) 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 CO_2 und zusätzlichem Wasserstoff umgewandelt wird. Es entsteht ein Synthesegas aus den Hauptbestandteilen Wasserstoff und CO_2 . Der hohe CO_2 -Partialdruck ermöglicht eine Abtrennung des CO_2 aus dem H_2/CO_2 -Gemisch mittels physikalischer Wäsche. Hierbei wird das CO_2 physikalisch in einer Waschlösung wie z. B. Methanol gelöst. In Zukunft kommt auch die Membrantechnik (Wasserstoffmembranen) zur CO_2 -Abtrennung in Frage, deren Vorteil in einer Reduzierung des Energieverbrauchs zu sehen ist.

Oxifuel

Das Oxifuel-Konzept beruht auf dem Prinzip, mit Verbrennung von Kohlen- oder Kohlenwasserstoffen mit reinem Sauerstoff ein Rauchgas entstehen zu lassen, das im Wesentlichen aus CO_2 (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 Energieverbrauch deutlich senken. Diese spezielle Polymermembranen sind jedoch noch nicht Stand der Technik (Cremer 2007; Mieritz 2007; Wuppertal Institut 2007).

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.

Als Zeitpunkt der kommerziellen Verfügbarkeit von CCS im Kraftwerksmaßstab wird in Roadmaps das Zieljahr 2020 genannt. Es wird jedoch nicht immer präzise beschrieben, was genau zu diesem Jahr erreicht werden soll. In Fachkreisen wird das Jahr 2020 als sehr ambitioniert eingeschätzt. 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). Tabelle 4-60 gibt einen Überblick über begonnene oder geplante Projekte:

Tabelle 4-60: Begonnene und geplante CCS-Projekte (Auswahl)

Wann?	Was?	Wo?	Wer?
2008	30 MWth Oxyfuel Kraftwerk (Inbetriebnahme)	Schwarze Pumpe (D)	Vattenfall
2010	475 MW Erdgaskraftwerk mit CO ₂ Abscheidung für EOR	Peterhead/GB	BP
2011	860 MW Erdgaskraftwerk mit CO ₂ Abscheidung für EOR	Halten, Norwegen	Shell, Statoil
2011	IGCC mit CO ₂ Abscheidung und Lagerung in der südlichen Nordsee	GB	E.ON UK
2014	450 MW IGCC mit CO ₂ Abscheidung und Lagerung in salinem Aquifer	D	RWE
2014	275 MW IGCC mit CO ₂ -Abscheidung und Lagerung im saline, Aquifer	USA	"Future-Gen" Projekt

Quelle und Anmerkungen: Grünwald 2007, EOR: Enhanced Oil Recovery, IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle

Rohstoffinhalt

In der Oxyfuel-Pilotanlage beim Vattenfall Kraftwerk "Schwarze Pumpe" werden derzeit bei der Luftzerlegung sowie bei der CO₂-Abtrennungsanlage konventionelle Techniken angewandt. Hier werden hochlegierte Stähle benutzt. Erst in der nächsten Bauphase (Demonstrationsanlage) werden neue Werkstoffe und Stähle ausprobiert (Burchhardt 2008).

Die Tendenz geht zum 700 °C Kraftwerk (Frischdampfeintrittstemperatur in die Turbine). Die Siemens AG bietet diese 700 °C Kraftwerkstechnologie kommerziell an. Vattenfall entschied sich auch deshalb für das Oxifuel-Verfahren, da die Parameter (Druck, Temperatur etc.) des in der Entwicklung befindlichen 700°C-Kraftwerks und die dort eingesetzten Werkstoffe für die Oxyfuel Anlage übernommen werden können (Burchhardt 2008).

Für diese Kraftwerke mit einem Wirkungsgrad bis zu 50 % liegen die Dampfprozess-temperaturen zwischen 650 und 700 °C. Die Dampfdrücke betragen 300 – 375 bar. Dabei ist der Einsatz von Nickelbasislegierungen wie etwa NiCr23Co12Mo in der Brennkammer, Austrittssammler und Überhitzerrohre notwendig (VGB 2008a). In einer Komponententestanlage werden außerdem Materialien wie T 24, HCM 12, TP 310 N, HR 3 C, Alloy 174, Alloy 617 and Alloy 740 für Überhitzerheizflächen, Hochdruck-sammler, Frischdampfleitung, Hochdruck-Umleitventil und ein Sicherheitsventil untersucht (COMTES700 2008).

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 %-Punkten 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 2008b).

Derzeit kann keine 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).

4.20.2 Foresight industrielle Nutzung

Nach einer Modellierung vom Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung wird in Europa Erdgas in der Zeit von 2010 bis 2020 zum wichtigsten Energieträger in der Stromerzeugung. Ab der Verfügbarkeit von CCS-Technologien im Jahr 2020 erreicht diese innerhalb eines Jahrzehnts einen Anteil von 60 % an der Stromerzeugung. Für diesen hohen Anteil an der Stromerzeugung müsste eine Kapazität von über 40 GW installiert werden. Es müssten also nach dieser Modellrechnung 2020 und 2021 je acht bis zehn Großkraftwerke mit CCS ans Netz gehen und in den folgenden Jahren zwischen drei und sechs solcher Anlagen. Die in diesem Szenario jährlich zu speichernde CO₂-Menge würde jedoch schnell die Größenordnung von mehreren Millionen Tonnen pro Jahr annehmen. Damit würden in kürzester Zeit sehr große Lagerstätten für CO₂ benötigt, ohne dass Langzeiterfahrungen mit der Speicherung vorliegen (Grünwald 2007).

Im Raum Asien/Pazifik ist der Verbrauch von Kohle in der Zeit von 1996 bis 2006 um mehr als 60 % gestiegen. Hierfür war vor allem die Ausweitung der Kohleverstromung in China und zu einem kleinen Teil auch in Indien verantwortlich. Allein in China wurde in der Zeit von 1996 bis 2002 etwa 100.000 MW fossile Kraftwerksleistung (hauptsächlich Kohle) installiert. Es wird erwartet, dass der Verbrauch der Kohle stark ansteigen wird. Der Anteil am Primärenergieverbrauch wird hoch bleiben, im Jahr 2030 bei 63 %. Um die Nachfrage zu decken, muss China mehr als 1.300 GW zur Elektrizitätserzeugung zusätzlich installieren. Der wachsende Verbrauch fossiler Rohstoffe würde die CO₂-Emissionen von derzeit 5,1 Gigatonnen auf 11,4 Gigatonnen bis 2030 erhöhen. Um diese erheblichen Potenziale in China, Indien und anderen Schwellenländern auszunutzen, müsste die CCS-Technologien erfolgreich weiter entwickelt und erprobt werden. Ein breite Einführung von CO₂-Abscheidung und -Lagerung ist wegen fehlender Rahmenbedingungen und kaum gesicherter Informationen über Speicherkapazitäten kurz bis mittelfristig eher unwahrscheinlich (Grünwald 2007; IEA 2007).

4.20.3 Foresight Rohstoffbedarf

Verlässliche Annahmen zur Berechnung des Rohstoffbedarfs sind bei derzeitigem Stand der Technik (Pilotanlagen) 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 ersetzen. 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.

4.21 Lithium-Ionen-Hochleistungs-Elektrizitätsspeicher

4.21.1 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 auf die elektrische Leistung an, also die kurzzeitig verfügbare Arbeitstromstärke.

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.

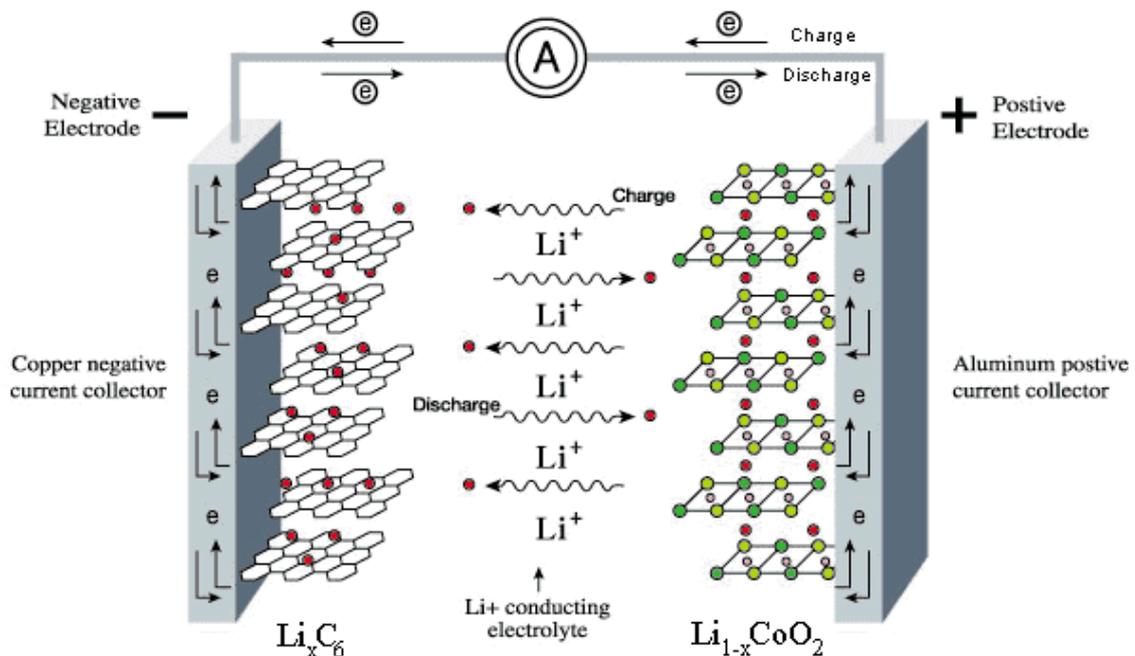
Das aus heutiger Sicht aussichtsreichste Batteriesystem zur Erfüllung dieser Anforderungen ist die Lithium-Ionen-Zelle. In diesem System besteht die positive Elektrode, sie wird bei wiederaufladbaren Batterien als Kathode bezeichnet, aus einem Metalloxid, in das reversibel Lithium-Ionen eingelagert werden können. Als negative Elektrode (Anode) wird Graphit genutzt, der ebenfalls reversibel Lithium-Ionen aufzunehmen vermag. Pro 6 Kohlenstoffatomen 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 (Abbildung 4-46). Bei jedem Lade- und Entladevorgang werden abhängig vom Kathodensystem 50 – 90 % des Lithiums ausgetauscht (Döring 2008; ICT 2007:2).

Je nach den Anforderungen an die Kapazität beziehungsweise die verfügbare Stromstärke werden unterschiedliche Metalloxide genutzt (CDI 2008a:50). Für hohe Kapazität werden Kobaltkathoden in Form von LiCoO_2 bevorzugt. Mit Mangankathoden,

LiMn_2O_4 und Eisenphosphatkathoden, LiFePO_4 , lassen sich hohe Arbeitsstromstärken erzielen. Auch mit Nickeloxiden und Mischungen verschiedener Metalloxide wird experimentiert, bspw. $\text{LiCo}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{Ni}_{0,33}\text{O}_2$. Tabelle 4-61 vergleicht die Leistungsmerkmale der Kobalt, Mangan- und Phosphatsysteme. Die Leistungsfähigkeit der Lithium-Ionen-Systeme ist noch nicht ausgereizt und die Forschung und Technologieentwicklung noch stark im Fluss. Sie erhielt in jüngerer Zeit vom Automobilbau neue Impulse. Es wird erwartet, dass Toyota das Hybridmodell PRIUS mit einem Lithium-Ionen-Akkumulator ausrüstet. Die Daimler AG hat angekündigt, 2009 einen Mercedes S 400 als Hybrid mit einer Lithium-Ionen-Batterie auf den Markt zu bringen.

Welches Lithiumsystem sich für Elektrofahrzeuge durchsetzen wird, ist noch nicht absehbar. Die Anforderungen hohe 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.

Abbildung 4-46: Funktionsprinzip des Lithium-Ionen-Systems



Quelle: Fraunhofer ICT

Tabelle 4-61: Leistungsmerkmale von Lithium-Ionen-Akkumulatoren (Buchmann 2006a:2)

	Energiedichte (Kapazität) [Wh/kg]	Zulässige Stromstärke [C] ⁵¹
Kobaltelektrode	150 – 190	< 1
Manganelektrode	100 – 135	< 10
Eisenphosphatelektrode	90 – 120	< 10

4.21.2 Rohstoffinhalt

Lithium-Ionen-Akkumulatoren enthalten, wie zuvor erwähnt, Metalloxide, bspw. Kobalt, Kohlenstoff als Graphit, Lithium, das den Elektrizitätstransport im Zelleninneren in Form von Ionen zwischen den Elektroden im Inneren der Batterie bewerkstelligt, ein wasserfreies organisches Lösemittel, das mit Leitsalzen versetzt ist, Kupfer und Aluminium für die Elektroden und weitere Stoffe, die zum Teil von den Herstellern als Betriebsgeheimnis gehütet werden.

Kobaltelektroden von Lithium-Ionen-Akkumulatoren enthalten 60 % Kobalt und verursachen 50 % des Gesamtgewichts der positiven Elektrode. Der Kobaltverbrauch für wiederaufladbare Batterien hat weltweit zwischen 1995 und 2000 von 700 t/a auf 5.000 t/a zugenommen und erreicht in Zwischenzeit etwa 12.000 t/a, das sind 25 % des Weltkobaltverbrauchs. Diese Menge schließt auch den Kobaltverbrauch für andere Akkumulatorensysteme ein. So enthält beispielsweise die Nickelelektrode der Nickel-Cadmium und Nickel-Metallhydridsysteme mit 5 – 15 % geringe Mengen an Kobalt (CDI 2008a:50). Bezogen auf das Gesamtgewicht der Akkuzelle finden sich in der Literatur die in Tabelle 4-62 zusammengestellten Anteile an Kobalt und Nickel für die verschiedenen Batteriesysteme (CDI 2004c:9).

Tabelle 4-62: Anteile ausgewählter Wertstoffe am Gesamtgewicht wiederaufladbarer Batteriesysteme in %

	Ni-Cd	Ni-MH	Li-Ion-LiCoO _x	Li-Ion-LiNiO _x
Kobalt	1,3	2,4	22,0	
Nickel	22,0	40,0		22,0

Die Angaben zum Lithiumgehalt der Batteriesysteme schwanken stark. Sie reichen von 50 g Li/kWh (DGS 2008:3), über 83 g Li/kWh (Buchmann 2006b:3) bis zu 300 g Li/kWh

⁵¹ Ein Akkumulator mit einer Kapazität von bspw. 2400 mAh (2,4 Ah) der mit 1 C geladen oder entladen wird, hat einen Lade- bzw. Arbeitsstrom von 2,4 A, bei 10 C 24 A.

(Thail 2006:6). 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 Tabelle 4-63 zusammengestellten Werte. 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.

Tabelle 4-63: Lithiumgehalt von Li-Ionen-Akkusystemen

Kathodensystem	Spannung [V]	Ladungstransport [%]	Lithium-Gehalt [g Li/kWh]
Kobaltoxid, Kobalt-Mischoxide	3,6	50	180
Eisenphosphat	3,2	90	120

2006 wurden weltweit 1,7 Mrd. Lithium-Akkumulatoren produziert (Frost & Sullivan 2005a:2–12; Frost & Sullivan 2005b:2-10), weit überwiegend Kobaltsysteme. Legt man als Referenz die Standardrundzelle 18650 mit einer Kapazität von 2.400 mAh und der Spannung von 3,6 V zugrunde, errechnet sich eine kumulierte Zellenkapazität in 2006 von 14,7 Mio. kWh. Mit dem spezifischen Lithiumgehalt von 180 g Li/kWh ergibt sich ein jährlicher Lithiumverbrauch für die Akkumulatorenfertigung von 2.600 t. Das ist noch wenig bedeutsam im Vergleich zur Weltlithiumproduktion von 21.100 t in 2006.

In der öffentlich zugänglichen Kurzfassung der Roskill Studie "The Economics of Lithium", die in der Reihe "Metals and Minerals Reports" im Juli 2007 vorgelegt wurde, wird der Lithiumcarbonat-Verbrauch (Li_2CO_3) in 2005 mit 80.000 t angegeben (Roskill 2007a:1). Das entspricht einem Lithiumgehalt von rund 15.100 t. Es heißt weiter, dass in 2005 20 % des Lithiums für die Batterieproduktion verwendet wurde, also rund 3.000 t/a. Dies stimmt gut mit der obigen Abschätzung überein.

4.21.3 Foresight industrielle Nutzung

Die Lithiumsysteme sind aus heutiger Sicht die Akkumulatoren mit der höchsten Energiedichte. Sie werden deshalb mit Recht als Hochleistungs-Akkumulatoren bezeichnet. Es wurde schon erwähnt, dass Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet noch stark im Fluss ist und deshalb künftig mit einer weiteren Steigerung der Leistungsfähigkeit zu rechnen ist. Aufgrund der überlegenen 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. In diesen Produktbereichen werden überdurchschnittliche Wachstumsraten erwartet.

4.21.3.1 Projektion 1: Lithium-Ionen-Akkumulatoren

Marktanalysten gehen davon aus, dass der Markt für Lithium-Akkumulatoren bis 2010 mit 6 – 7 %/a wächst (Frost & Sullivan 2005a; Frost & Sullivan 2005b; Powerelectronics 2008). Geht man für die Zeit danach von einer leichten Abschwächung der Wachstumsrate auf 5 %/a aus, errechnet sich bis 2030 ein Marktvolumen für Lithium-Akkumulatoren das um das 3,4-fache über dem von 2006 liegt.

4.21.3.2 Projektion 2: Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeuge

Marktanalysen von Roland Berger, die sich auf Unternehmensbefragungen stützen, gehen davon aus, dass sich das Weltmarktvolumen für Hybridfahrzeuge von 370.000 in 2005, über 1,5 Mio. in 2010 auf 8 Mio. Fahrzeuge im Jahr 2020 steigen wird (Berger 2007:50). Dies entspricht einer mittleren jährlichen Wachstumsrate zwischen 2005 und 2010 von 32,3 %, und zwischen 2010 und 2020 von 18,2 %. Geht man davon aus, dass die Wachstumsrate zwischen 2020 und 2030 auf 7 %/a zurückgeht, würden 2030 weltweit 16 Mio. Hybridfahrzeuge genutzt. Mit großer Sicherheit dürfte schon vor 2030 die Brennstoffzelle für mobile Anwendungen in Fahrzeugen marktreif sein. Das heißt, Brennstoffzellenfahrzeuge werden Hybridfahrzeuge ablösen. Auch das Brennstoffzellenfahrzeug benötigt einen Akkumulator für den Antrieb.

Geht man von einer Akkukapazität von 1,3 kWh pro Hybrid- oder Brennstoffzellenfahrzeug aus (SUBAT 2005:26; FHA 2006:34), entspricht dies der Kapazität von 150 Standard Li-Ionen Rundzellen vom Typ 18560 der Kapazität 2.400 mAh. 16 Mio. solcher Fahrzeuge benötigen demgemäß ein Äquivalent von 2,4 Mrd. dieser Standardzellen.

Mit dem in Projektion 1 ermittelten Wachstum werden 2030 weltweit $1,7 \times 3,4 = 5,8$ Mrd. Li-Ionen Zellen genutzt. Über 40 % davon für Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeuge.

4.21.4 Foresight Rohstoffbedarf

Mit dem Akkumulatorenmarkt wächst auch der Rohstoffbedarf für ihre Herstellung. Eine Steigerung des Marktvolumens bis 2030 um das 3,4-fache, wie im Kapitel 4.21.3.1 abgeschätzt, würde den Lithiumbedarf für Batterien auf 7.500 t/a steigen lassen. Das sind immerhin schon 35 % der heutigen globalen Lithium Produktion. Dabei wurde unterstellt, dass durch die zunehmende Nutzung von Phospatelektroden der mittlere spezifische Lithiumgehalt bis 2030 auf 150 g Li/kWh sinkt.

Die Schätzung des künftigen Kobaltbedarfs ist mit Unsicherheiten behaftet, weil mehrere Elektrodenmetalle als potenzielle Substitute in Frage kommen. Der Kobleinsatz für die Akkumulatoren wurde oben mit 12.000 t/a angegeben. Eine Steigerung des Marktvolumens um den Faktor 3,4 würde – grob gerechnet – den Kobaltbedarf bis 2030 auf 40.800 t/a erhöhen, wenn ausschließlich Kobalt als Kathodenmetall genutzt würde. Das sind 60 % der heutigen Kobaltproduktion. Geht man davon aus, dass bis 2030 die Hälfte der abgesetzten Lithium-Ionen-Akkus kobaltfreie Phosphatsysteme sind, verbleibt immer noch ein Kobaltbedarf von 20.400 t/a.

Tabelle 4-64: Globaler Rohstoffbedarf für Lithium-Akkumulatoren in t pro Jahr

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030
Kobalt	67.500	12.000	20.400 – 40.800
Lithium	21.100	2.600	7.500

Die Zusammenstellung in Tabelle 4-64 zeigt, dass der Kobaltbedarf die kritische Größe bei der künftigen Nutzung der Lithium-Ionen-Technologie ist. Die Nachfragesteigerung nimmt enorme Werte an, wenn der Bedarf an der oberen Grenze liegt. Der Weltbedarf an Kobalt wird durch die künftige Entwicklung dieses Marktes und dem Umfang der Nutzung des Metalls für die Fertigung der positiven Elektrode massiv beeinflusst. Selbst wenn Kobaltsubstitute künftig eine größere Rolle spielen sollten, bleiben Lithium-Akkumulatoren ein wesentliches Nachfrage- und Wachstumssegment für den Kobaltmarkt.

Der abgeschätzte Rohstoffbedarf muss nicht notwendig aus geologischen Lagerstätten entnommen werden, wenn das Recycling gebrauchter Batterien ausgebaut wird. Heute sind die Recyclingkapazitäten für Lithium-Ionen-Akkumulatoren noch unbedeutend. Weltweit können zurzeit gut 300 Mio. Zellen aufgearbeitet werden (CDI 2004b:10). In der Europäischen Union wurden 2003 knapp 8 % des mit wiederaufladbaren Batterien vermarkteten Kobalts durch Recycling zurückgewonnen (CDI 2004a:9). Nach den Aussagen eines Kobaltrecyclers decken die Erlöse aus der Metallrückgewinnung in den meisten Fällen die Sammel- und Aufarbeitungskosten von Lithium-Ionen-Akkus (CDI 2004b:9). Dies sind gute Voraussetzungen für den Ausbau des Batterierecyclings. Gesetzgeberische Initiativen wie die Europäische Batterierichtlinie 2006/66/EC, die WEEE Richtlinie 2002/96/EC und die nationalen Rücknahme- und Verwertungsregelungen werden mittelfristig zum Ausbau des Recyclings führen. Die geforderten Recyclingquoten sind allerdings nicht allzu anspruchsvoll. Bis 2012 sollen für Lithium-Ionen-Batterien 12,5 % und bis 2016 22,5 % der vermarkteten Menge als Sekundärrohstoffe zurückgewonnen werden.

4.22 Redox-Flow Elektrizitätsspeicher

4.22.1 Technologiebeschreibung

Redox-Flow-Batterien wurden in den 1970er Jahren entwickelt. Sie speichern elektrische 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 Reaktions-einheit für den Lade- oder Entladeprozess abhängt. Die Tanks können einfach und manuell befüllt und die Batterie damit geladen werden. Die Tankgröße bestimmt den Energieinhalt der Batterie, die Lade-/Entladeeinheit die Leistung der Batterie. Da die Löslichkeit der Salze in den Elektrolyten typischerweise nicht sehr hoch ist, werden Energiedichten im Bereich der Bleibatterie erreicht (ISEA 2008)

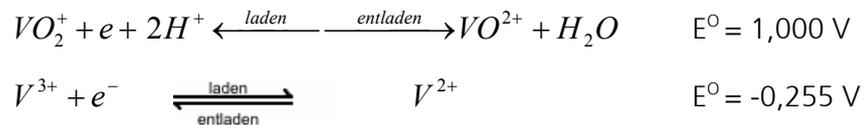
4.22.2 Rohstoffinhalt

In den 70er 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 Salzsyste-men 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 (Gar-che 2006). Darüber hinaus wurden in letzter Zeit die Systeme Vanadium-Bromid und Zink-Bromid weiterentwickelt. Einen Überblick über die verschiedenen Systeme gibt Tabelle 4-65.

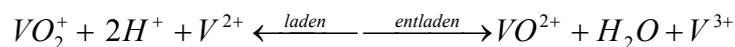
Tabelle 4-65: Kennzahlen unterschiedlicher Redox-Flow-Batterien

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

Vanadium-Redox-Batterien (VRB) sind relativ weit entwickelt, 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 reduziert, an der negativen Elektrode wird zweiwertiges Vanadium zu dreiwertigem oxidiert:



Die Gesamtreaktion lautet dementsprechend:



Die elektrische Ausbeute dieser Systeme ist relativ hoch (liegt etwa bei 90 %), unter Berücksichtigung der Verluste durch die dazugehörigen Aggregate werden (netto) 70 bis 80 % erreicht. Durch materialtechnische Verbesserungen, z. B. mit Elektroden aus Kohlenfasern, deren feine Kanäle dem Elektrolyten weniger Widerstand bieten, und neue Membranen, könnten zukünftig Nettowirkungsgrade nahe 90 % möglich sein (INT 2006).

4.22.3 Foresight Industrielle Nutzung

Das Vanadium/Vanadium System ist inzwischen marktreif. Hauptideengeber sind dabei nach wie vor die ursprünglichen Entwickler dieses Systems der University of New South Wales (UNSW) in Sydney, das sich inzwischen international etabliert hat. Als Ausgründung dieser Universität beschäftigt sich VFuel Pty Ltd. derzeit mit der Optimierung und Überführung dieser ersten Generation (G1) von Vanadium/Vanadium-Batterien in Vanadium/Bromid-Batterien. Das Feld von Anbietern für diese Energiespeichersysteme gestaltete sich patentrechtlich übersichtlich: Neben VRB Power Systems Inc. (Kanada) und Cellenium Company Ltd. (Thailand) haben sich nur Sumitomo Electric Industries (Japan) und die österreichische Cellstrom GmbH am Markt positioniert.

Die Vanadium-Redox-Batterien arbeiten automatisch und weitgehend wartungsfrei. So sind die beispielsweise die Anlagen der Cellstrom GmbH für eine Betriebsdauer von 20 Jahren ausgelegt. Der Hersteller gibt an, dass die Pumpen durch den korrosiven Angriff alle 5 Jahre, die Zellstacks alle 10 Jahre ausgetauscht werden müssen und sonst keine vorhersehbaren Reparaturen zu erwarten sind.

4.22.4 Foresight Rohstoffbedarf

Wird unterstellt, dass weltweit bis zum Jahre 2030 ca. 215 GWh Speicherkapazität als Redox-Flow-Batterien gebaut werden (dass entspricht der heutigen Speicherkapazität durch Pumpspeicherwerke u. a. in Deutschland), dann ergeben sich die in Tabelle 4-66 dargestellten stöchiometrischen Rohstoffbedarfe.

Tabelle 4-66: 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
Rohstoffbedarf für 215 GWh [1000 t]	62	67	79		158		74
Weltweite Produktion 2006 [1000 t]	1.170.000	9.010	59		10.500		59

Daraus lässt sich ein globaler Vanadiumbedarf im Jahr 2030 für Redox-Flow Stromspeicher von 74.000 hochrechnen (Tabelle 4-67). Dies entspricht dem 1,3-fachen der gesamten globalen Vanadiumproduktion im Jahr 2006. Bei der Nutzung von Redox-Flow Stromspeichern sind beträchtliche Impulse auf die Vanadiumnachfrage zu erwarten.

Tabelle 4-67: Globaler Rohstoffbedarf für Vanadium-Redox-Batterien in t

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030
Vanadium	55.700	1	74.000

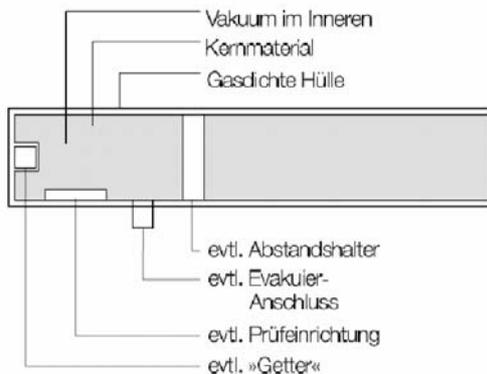
4.23 Vakuumisolation

4.23.1 Technologiebeschreibung

Das Prinzip der Vakuumisolation ist seit Jahrzehnten bekannt und findet z. B. fast ebenso lange in der Thermoisolationsskanne (der sog. Thermoskanne) Anwendung. Im Baubereich gehören Vakuum-Isolationssysteme derzeit dennoch zu den innovativen Bauelementen (Cremers 2005). Vakuum-Isolatoren verfügen über bemerkenswerte Wärmedämmeigenschaften. Ihre Wärmeleitfähigkeit ist um den Faktor 8 – 10 geringer als bei derzeit üblichen konventionellen Dämmstoffen und folglich lassen sich um den Faktor 8 bis 10 dünnere Dämmstärken bei gleichem Wärmedurchlasswiderstand erreichen (siehe Abbildung 4-48; Institut für Energie, 2003). Die Wärmedämmung eines Baustoffes wird durch seine Wärmeleitfähigkeit λ bestimmt. Diese gibt das Vermögen eines Festkörpers an, Wärme zu leiten, so dass eine geringere Wärmeleitfähigkeit eine bessere Dämmwirkung bedeutet.

In herkömmlichen Dämmstoffen setzt sich der Wärmetransport aus 20 – 30 % Wärmestrahlung, 5 – 10 % Wärmeleitung über das Gerüstmaterial und ca. 65 – 75 % aus Wärmeleitung über das eingeschlossene Gasvolumen zusammen (Cremers, 2005). Die Vakuum-Dämmtechnik setzt am Hauptwärmeübertragungsweg, dem Mechanismus der Wärmeleitung, an und erreicht durch Evakuierung des Innenraumes eine Verminderung der Gaswärmeleitung und damit eine Minimierung der effektiven Gesamtwärmeleitung. Zur Isolation von Gebäudefassaden wird das Wirkungsprinzip entweder in so genannten Vakuum-Isolation-Paneelen (VIP) oder in Vakuum-Isolations-Sandwichs (VIS) realisiert. Typische Bauteilgrößen liegen im Bereich von 0,5 m x 0,5 m und 1,0 m x 1,0 m, einer Dicke zwischen 10 und 50 mm (typisch 20 mm) und einer durchschnittlichen Dichte von 150 – 190 kg/m³ (ZAE-Bayern 2008, Cremers 2005; VARIOTEC Technisches Datenblatt 2008). VIPs und VISs bestehen aus einem druckstabilen Kernmaterial, das unter Vakuum in eine gasdichte Hülle eingeschweißt wird (siehe Abbildung 4-47). Im Fall eines VIPs besteht die Hülle i. A. aus Kunststofffolien oder Kunststoffverbundfolien und im Fall eines VIS aus dünnen Edelstahlblechen. Die innere Oberfläche der Hülle kann mit zusätzlichen, chemisch reaktiven Materialien, so genannten Gettern beschichtet werden, die dazu dienen, das Vakuum möglichst lange aufrecht zu erhalten. Dabei gehen im Innenraum vorhandene Gasmoleküle an der Oberfläche mit Atomen des Getters chemische Verbindungen ein und werden so durch Sorptionsprozesse gebunden (Kleinhempel 2005).

Abbildung 4-47: Schematischer Aufbau eines Vakuum-Isolations-Paneels



Quelle: Cremers, 2005

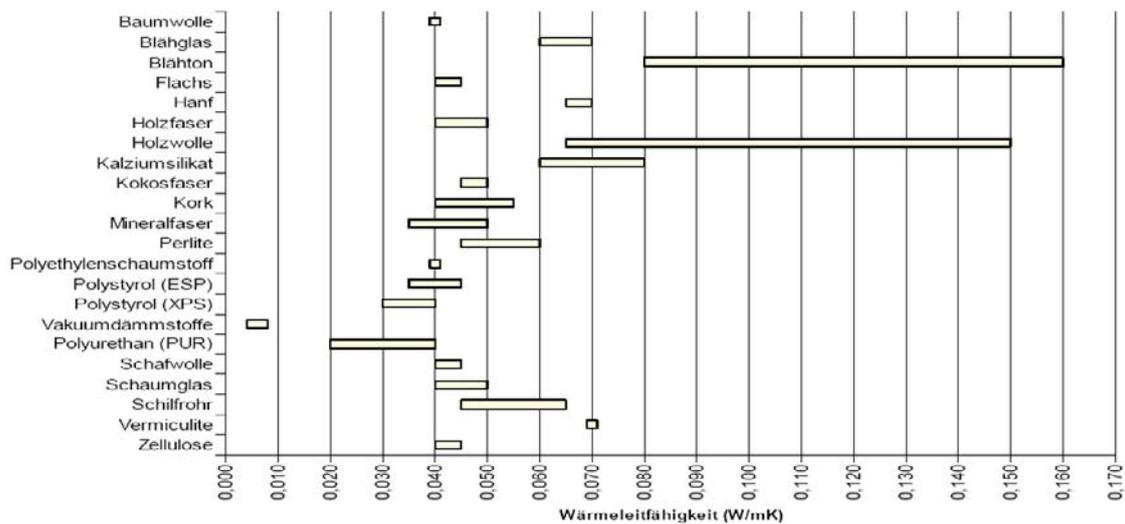
Das verwendete Kernmaterial muss hohen Druckbelastungen widerstehen können und gleichzeitig offenzellig sein, um eine Evakuierung zu ermöglichen (Heinemann 2007). Im deutschen Raum wird derzeit hauptsächlich auf Materialien auf Silicatbasis (SiO_2) gesetzt.

Es handelt sich um mikroporöse Materialien, die durch eine hohe Porosität und gleichzeitig geringe Porengröße schon bei Atmosphärendruck sehr geringe Gasleitungseffekte und resultierend eine geringe Wärmeleitfähigkeit (ca. $0,018 \text{ W/mK}$) aufweisen. Bei der Evakuierung sinkt die Wärmeleitfähigkeit weiter ab und erreicht im Fall der mikroporösen Materialien schon bei ca. 10 mbar ein Minimum von ca. $0,004 \text{ W/mK}$. Ein solches Vakuum wird als Grobvakuum bezeichnet und stellt handhabbare Anforderungen an den Herstellungsprozess und die Qualität der Hülle bezüglich der Gaspenetrationsraten dar. Die Gaspenetrationsrate ist eine der wichtigsten determinierenden Größen der Paneellebensdauer. Wird ein maximaler Innendruck von 100 mbar zugelassen, erhält man bei einer Gaspenetrationsrate von 2 mbar/Jahr eine rechnerische Lebensdauer von 50 Jahren. Damit können Lebensdauern, wie sie bei Bauelementen der Gebäudefassade üblich sind, zumindest rechnerisch erreicht werden. Experimente unter realen Bedingungen zeigen, dass Penetrationsraten im Bereich 2 mbar/Jahr tendenziell realistisch sind (EMPA et al. 2005).

Neben Paneelen mit Kernmaterialien gibt es Varianten, die ohne ein solches auskommen. Allerdings sind diese deutlich weniger weit verbreitet, da höhere Anforderungen an die Konstruktion der Hülle bezüglich der Druckfestigkeit gestellt werden müssen. Außerdem haben diese den Nachteil, dass über die gesamte Lebensdauer eindringende Luft die Wärmeleitfähigkeit schneller ansteigen lässt als in Paneelen mit mikroporösem Kernmaterial, das selbst schon stark wärmeisolierend wirkt.

Im Bereich der Isolationspaneele und Kernmaterialien sind in Deutschland z. B. die Firmen Porextherm, (Kempten), va-Q-Tec (Würzburg) und Wacker (München) und international Microtherm und Saes Getters in Europa, Asien und den USA angesiedelt, wobei diese nicht ausschließlich bauliche relevante Produkte entwickeln und vertreiben, sondern auch in anderen Anwendungsbereichen wie z. B. der Kryogenik tätig sind.

Abbildung 4-48: Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Materialien



Quelle: Innovative Dämmstoffe im Bauwesen, Forschungsstand und Marktübersicht, Bremer Energieinstitut, 2005

Die Umsetzung der Dämmtechnik ist im Baubereich mit einer Reihe grundsätzlicher und praktischer Probleme konfrontiert:

- ▶ Der verwendete Baustoff im Kern muss ausreichend robust sein, um dem notwendigen Unterdruck widerstehen zu können (Atmosphärendruck ca. $10,3 \text{ t/m}^2$).
- ▶ Die äußere Hülle muss geeignet sein, dauerhaft (ca. 30 – 50 Jahre) das Vakuum zu erhalten.
- ▶ Die Paneele sind extrem empfindlich gegenüber Kratzern und Schrammen an der Hülle, da diese zu erhöhter Permeabilität für Gase und Wasserdampf und damit zu starker Beeinträchtigung der Wirksamkeit führen können.
- ▶ Wärmebrücken fallen bei Hochleistungsdämmstoffen stärker ins Gewicht als bei konventionellen Dämmstoffen und erfordern Optimierungen der Ränder und Fugen (verbundenes Problem: Kondensation an Wärmebrücken)

4.23.2 Rohstoffinhalt

Vakuum-Isolations-Paneele oder Sandwichs bestehen aus einem evakuierten Volumen, welches entweder durch ein Kernmaterial gefüllt ist, oder vollständig entleert bleibt, sowie einer gasdichten, hochfesten Hülle.

Hüllenmaterial

An die Paneelhülle werden Anforderungen bezüglich der Permeabilität für Gase (ca. $10 - 2 \text{ cm}^3$ pro m^2 und 24 h) und Wasserdampf (ca. $10 - 4 \text{ g}$ pro m^2 und 24 h) sowie an die mechanische Festigkeit gestellt (EMPA et al. 2005).

Verbundstoffe aus Metallfolie und Kunststoffen sind derzeit in VIPs am weitesten verbreitet. In solchen sog. Hochbarrierelaminaten werden bis zu drei 30 nm dicke Aluminiumschichten mit Kunststoffschichten aus Polyethylen, Polyamid oder Polyester verklebt (Kleinhempel 2005). In VIS kommen dünne Stahlbleche zum Bau der Hülle zum Einsatz.

Kernmaterialien

An das Kernmaterial werden Anforderungen bezüglich der inneren Stabilität und der Porenstruktur gestellt, um einerseits die Stabilität des evakuierten Paneels und andererseits eine gute Evakuierbarkeit zu ermöglichen. Es stehen derzeit eine Reihe von organischen (Kohlenstoffverbindungen) und anorganischen (mineralische Rohstoffe) Materialien für diesen Zweck zu Verfügung:

Tabelle 4-68: Verschiedene Kernmaterialien

Kernmaterialien	Hauptbestandteil
Pyrogene Kieselsäure	SiO_2 , SiC
SiO_2 -Aerogel	SiO_2 ,
Polyurethanhartschaum	Erdölprodukt
Polystyrenschaum	Erdölprodukt, transparenter, amorpher oder teilkristalliner Thermoplast
Glasfaser	Silikat

Quelle: Va-Q-tec, Datenblatt va-Q-vip, Institut für Energie FHBB et al. 2005

Zu den häufig verwendeten Werkstoffen, die offenzellig und gleichzeitig sehr belastbar sind, gehören SiO_2 -Aerogele und Platten aus gepresster pyrogener Kieselsäure. Die Massendichte ist in beiden Fällen auf Grund der hohen Porosität sehr gering (bis zu 95 % ihres Volumens ist Luft) und sie verfügen über eine große innere Oberfläche (Hüsing und Schubert 1998).

Pyrogene Kieselsäureplatten werden aus ca. 80 % aus Siliziumdioxid (SiO_2) und ca. 15 % Siliziumkarbid (SiC) hergestellt (technisches Datenblatt "Vakuumisolutionspaneele va-Q-vip B"). Siliziumkarbid hat die Funktion eines Trübungsmittels und trägt durch Abschirmung von Infrarotstrahlung zur Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften bei (Patent Wärmedämmplatte, DE2754956C2 26.11.1987). In der Herstellung von SiO_2 wird Siliziumtetrachlorid (STC) als Rohstoff benötigt, welches als Koppelprodukt in der Produktion von EG-Silizium zur Herstellung von Siliziumwafern hergestellt wird.

Als eine weitere Variante des Kernmaterials gelten offenporige Schäume auf Basis von Polyurethan (Erdölprodukt). Sie haben im Gegensatz zu anderen Kernmaterialien einen wesentlich größeren Porendurchmesser, so dass eine geringere Druckbelastbarkeit besteht. Aus diesem Grund benötigen die Polyurethan-Platten eine sehr dichte und feste Umhüllung wie z. B. Edelstahlbleche (Kleinhempel 2005). Die grobe Zusammensetzung eines Vakuum-Isolutions-Paneels stellt Tabelle 4-69 zusammen.

Tabelle 4-69: Massenbestandteile ausgewählter Rohstoffe in einem Vakuum-Isolutions-Paneel mit Kieselsäurekern pro Quadratmeter

Rohstoff	Masse [g]	Anteil am Gesamtgewicht [%]
SiO_2	ca. 3200	ca. 80
SiC	ca. 600	ca. 15
Al	ca. 0,5	ca 0,01
Andere	ca. 200	ca. 5

Quelle: Expertenbefragung

Die Angaben beziehen sich auf ein Paneel mit Kieselsäurekern der Stärke 20 mm.

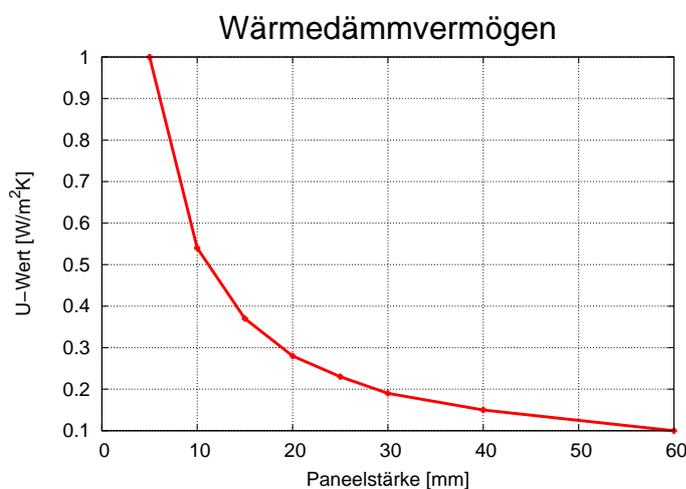
Die bezüglich des Materialaufwands größten Bestandteile des Paneels, wie Kieselsäurepulver- und Aerogelplatten, sind vollständig wiederverwendbar. Die bei der Umhüllung verwendete Verbundfolie ist nicht direkt wieder verwendbar, jedoch sind Bestandteile teilweise rezyklierbar.

4.23.3 Foresight industrielle Nutzung und Rohstoffbedarf

Die Technik der Vakuum-Isolation, die bisher besonders im Kühlanlagenbau und in der Fahrzeugtechnik Anwendung fand, hat durch intensive Weiterentwicklung im Baubereich Verbreitung gefunden. Stärkere Anforderungen an die Gebäudedämmung, resultierend aus schärferen gesetzlichen Vorgaben (EnEV), erhöhen in Zukunft die Nachfrage nach effizienteren Dämmstoffen (Kleinhempel 2005). Die Vakuum-Isolutions-Technik kann vor allem dazu beitragen, raumsparende Gebäudeisolationen zu realisieren. Auch mit herkömmlichen Dämmstoffen lassen sich ausreichend gute Wärmedäm-

mungen realisieren, jedoch sind dann Dämmstärken von 15 – 25 cm notwendig. Eine weitere Verstärkung der Dämmung bringt nur noch geringen Zusatznutzen, da die Wärmedurchlässigkeit eines Paneels exponentiell schnell mit der Dicke der Isolierschicht abfällt. Das bedeutet, dass die ersten cm der Dämmung die wirkungsvollsten sind und danach die Nutzensteigerung stark abnimmt (Beispiel: Darstellung des Zusammenhangs des Wärmedämmvermögens und der Paneelstärke eines VIPs in (Abbildung 4-49).

Abbildung 4-49: Wärmedämmvermögen eines Vakuum-Isolations-Paneels in Abhängigkeit der Paneelstärke



Quelle: ZAE-Bayern.de

Vakuumisolationssysteme befinden sich derzeit wegen höherem finanziellen Investitionsaufwand gegenüber konventionellen Dämmstoffen wettbewerbsmäßig im Nachteil. Sie werden deshalb vor allem in Bereichen eingesetzt, wo bei minimaler Dicke maximale Dämmeffizienz erzielt werden muss, wie z. B. in Lagen mit sehr teuren Nutzflächen (Rechenbeispiel: Bei einem viergeschossigen Bürogebäude lassen sich durch Vakuumdämmung rund 100 Quadratmeter Nutzfläche gewinnen, Willems und Schild 2004) oder an Gebäuden, deren Fassaden nicht verändert werden können und deshalb eine raumsparende Innendämmung notwendig wird. Derzeit hat die Produktion der Vakuum-Isolations-Paneele noch nicht die Serienreife erreicht, so dass zukünftig auf der Kostenseite ein Reduktionspotenzial erwartet werden kann. Außerdem wird bei der Anwendung pyrogener Kieselsäure als Kernmaterial zurzeit auf hochreine Kieselsäure zurückgegriffen, wie sie in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie verwendet wird. Im Baubereich bestehen weniger hohe Ansprüche an die Reinheit des Materials, so dass bereits ein weniger veredeltes Vorprodukt ausreicht. Dieses könnte schon bei der Herstellung von Rohsilizium ausgekoppelt werden und zu einer weiteren Kostenreduktion beitragen.

Grundsätzliche Probleme der Technik bestehen in der Anfälligkeit der Außenhaut und in der Lebensdauer der Paneele. Schon kleine Schrammen können das Vakuum zerstören und die Wärmeleitfähigkeit um den Faktor fünf bis zehn erhöhen. Die Einbettung der Paneele in vorgefertigte, schützende Fassadenelemente würde die Robustheit erhöhen, jedoch die Flexibilität gerade in der Altbausanierung senken. Neben dem Versagen der Isolationswirkung durch übermäßige Materialbeanspruchung ist die Sicherung der Lebensdauer der Paneele im Baubereich von entscheidender Bedeutung. Die Alterung von VIPs wird im Wesentlichen durch Eindringen von Gasen und Flüssigkeiten verursacht. Praktische Versuche in Modellprojekten in Deutschland und der Schweiz zeigen eine Drucksteigerung von ca. 2 mbar/Jahr und eine Feuchtigkeitsakkumulation von weniger als 0,2 %-Masse/Jahr. Daraus lässt sich eine rechnerische Lebensdauer von bis zu 50 Jahren ableiten, so dass die Anforderungen des Baubereichs erfüllt werden können.

Die Entwicklung von Fassadentechnik im Bereich von Wohn- und Nichtwohngebäuden wird im Wesentlichen aus energierelevanten Beweggründen vorangetrieben (Knaak 2007). Es werden Möglichkeiten der Dämmung gegen Kälte und Wärme, der Tageslichtführung, der Energiespeicherung sowie der Energieerzeugung untersucht. Ferner haben Gebäudefassaden eine gestalterisch künstlerische Funktion. Fassaden, die in der Lage sind, auf veränderliche Umgebungsbedingungen zu reagieren, werden als adaptive oder intelligente Fassaden bezeichnet. Sie nutzen Witterungsbedingungen für den Gebäudebetrieb aus und wirken positiv auf die Energieeffizienz des Gebäudes und die Behaglichkeit der Nutzer ein. In den genannten Anwendungsbereichen kann eine Vielzahl unterschiedlicher Materialien mit einer großen Bandbreite an Alternativen zum Einsatz kommen. Die Vakuum-Isolations-Technik kann auf Grund ihres überragenden Dämmwert-Dämmstärkenverhältnis einen Beitrag zur flexiblen Fassadengestaltung leisten.

Die heutige Nutzung (2007) der Vakuum-Isolations-Technik in Deutschland wird mit Absatzzahlen bei deutschen Herstellern von ca. 50.000 m² Bauteilfläche pro Jahr und stark steigender Tendenz beschrieben (ZAE Bayern, persönliche Kommunikation).

Tabelle 4-70: Rohstoffbedarf für in Deutschland im Jahr 2007 abgesetzte Vakuum-Isolations-Paneele (50.000 m²) in t

Rohstoff	Menge
SiO ₂	160
SiC	30
Al	0,025

Quelle: ZAE-Bayern

In Deutschland liegt bezüglich des energetischen und baulichen Zustandes der Gebäudestruktur ein Sanierungs- und Modernisierungstau vor (Jochem et. al 2008). Es wird in den nächsten Jahren eine deutliche Steigerung der Sanierungsaktivität auf Grund der Anstiege der Energiepreise, sowie verschiedener Marktanreize und verschärfter Regulierungen erwartet. Damit steigt das Marktpotenzial für Dämmstofftechnik an und es ist davon auszugehen, dass die Technik der Vakuum-Isolation davon profitieren kann, da gerade die energetische Sanierung des Gebäudebestands (auch Altbau) aus baulichen, wohnraumeffizienten und denkmalschutzrelevanten Umständen eine Minimierung der Dämmschichtdicken anstreben wird. Jedoch bleibt eine quantitative Prognose über die Marktpenetration äußerst schwierig, da zum einen viele Konkurrenzprodukte vorhanden sind und die Entwicklung der Marktanteile schwer vorhersehbar ist. Zum anderen ist derzeit unbekannt, wie Verbraucher Vor- und Nachteile der Technik abwägen.

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

4.24 Synthetische Kraftstoffe

4.24.1 Technologiebeschreibung

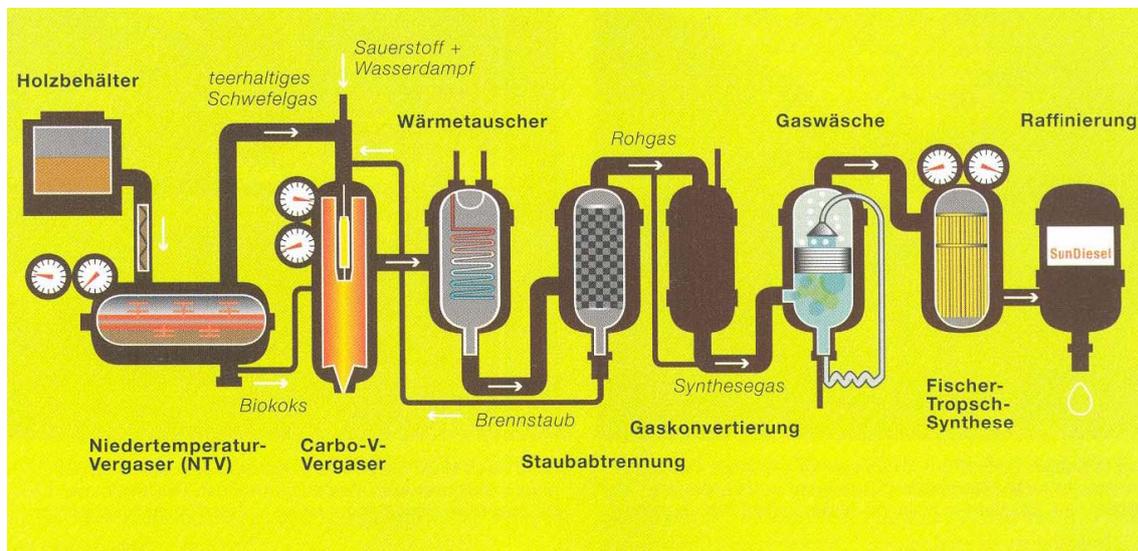
Die Abhängigkeit der Kraftstoffversorgung Europas von Erdöl bereitet Sorge. Die Entwicklung des Rohölpreises, der jüngst kurzzeitig die Marke von 145 US \$ pro Barrel erreichte, zeigt die Volatilität des Erdölmarkts und macht deutlich, dass die gegenwärtige Rohstoffbasis für die Kraftstoffversorgung nicht zukunftsfähig ist und einer Diversifizierung bedarf. Hierzu gibt es verschiedene Ansätze. Ein aussichtsreicher Ansatz zur Verbreiterung der Rohstoffbasis sind 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.

Die XtL-Technologien besitzen unterschiedliche technische Reifegrade. Die längste Historie besitzt die Kohleverflüssigung (CtL). Das zentrale Aggregat dieses Verfahrens, die Fischer-Tropsch (FT) Synthese, wurde 1925 am Kaiser-Willhelm-Institut für Kohleforschung in Mülheim an der Ruhr entwickelt und in der Kriegswirtschaft Deutschlands bis 1945 kommerziell zur Kraftstoffsynthese genutzt. Mit dem Aufschwung der Petrochemie als Folge des preisgünstigen Erdölangebots verlor es 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. Auch Shell gilt 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. Sie wird noch nicht in kommerziellen Großanlagen genutzt. 2009 wird in Freiberg, Sachsen, die Firma CHOREN die weltweit erste kommerzielle Pilotanlage in Betrieb nehmen. Sie ist auf eine Produktionskapazität von 15.000 t Dieselkraftstoff pro Jahr ausgelegt. Die besondere Herausforderung der BtL-Technologie liegt in der chemisch sehr heterogen zusammengesetzten Biomasse.

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 (H_2) und Kohlenmonoxid (CO). Nach der Gasreinigungsstufe wird das hochreine Synthesegas in der Fischer-Tropsch-Synthese zu Kraftstoff konfektioniert. Dabei kann die Synthese maßgeschneidert gefahren und ein breites Spektrum an Kraftstoffen (Diesel, Benzin) und Kraftstoffqualitäten hergestellt werden. Für die Zukunft besonders interessant sind Designerkraftstoffe für fortgeschrittene energieeffiziente und emissionsarme HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) Verbrennungsmotoren, an denen die großen Automobilbauer zurzeit arbeiten. Abbildung 4-50 zeigt das grundsätzliche Verfahrensschema der XtL-Verfahren am Beispiel des BtL-Prozesses der Firma CHOREN.

Abbildung 4-50: Das Carbo-V Verfahren der CHOREN INDUSTRIES GmbH



Quelle: CHOREN

Eine Alternative zu den konventionellen GtL-Verfahren mit Fischer-Tropsch-Synthese bietet seit kurzem die Firma SYN FUEL TECHNOLOGY Ltd. an. Es handelt sich um ein in Russland entwickeltes Hochtemperaturverfahren, das unter dem Namen "HTR Technology" beworben wird (SynFuel o.J.). Technische und nachvollziehbare wirtschaftliche Einzelheiten zum Prozess bietet das Unternehmen ebenso wenig an wie konkrete Betriebserfahrungen (<http://synfueltechnology.com/1.html>). Das Potenzial dieser Technologie und seine Marktchancen sind gegenwärtig nicht einschätzbar.

Rohstoffinhalt

Die für die Produktion von Xtl-Kraftstoffen benötigten Aggregate werden zu hoch komplexen Anlagen verschaltet und es dürfte kaum ein Element des Periodensystems geben, das sich nicht in diesen Einrichtungen finden lässt. In dieser Analyse gilt das Augenmerk dem Katalysator des Fischer-Tropsch-Aggregats. Als katalytisch aktives Material wird Kobalt genutzt. Darin sind geringe Mengen Rhenium oder ein Platinmetall, bspw. Platin, Ruthenium, Palladium oder Rhodium, als Promotoren eingelagert. Die Promotorenanteile betragen weniger als 1 %. In der genauen Zusammensetzung des Katalysators steckt das eigentliche Know-how, und sie wird von den Unternehmen als Betriebsgeheimnis gehütet. Tragendes Gerüst des aktiven Katalysatormaterials ist Aluminiumoxid. Der Kobaltanteil am gesamten Katalysatorgewicht wird mit 20 % angegeben (CDI 2007a:8).

Die Angaben zur benötigten spezifischen Katalysatormenge des FT-Aggregats schwanken. Bezogen auf eine Kapazität von 1 Mio. Barrels pro Tag (bpd) werden in (CDI 2006:34) 10.000 - 20.000 t Kobalt genannt, aus den Angaben in (CDI 2007b:5) errechnen sich 5.000 t Kobalt und aus (CDI 2004a:11) 3.800 t Kobalt. Die Katalysatoren sind etwa 4 Jahre im Einsatz und müssen dann ausgetauscht werden (CDI 2006:34). Sie werden aufgearbeitet, die Wertstoffe Kobalt und die Promotoren zu 90 % zurückgewonnen (CDI 2004a:10) und wieder eingesetzt. Es entsteht also lediglich bei der Erstausrüstung der FT-Anlage ein nennenswerter Bedarf an Katalysatormaterial. Die Lebensdauer von GtL-Anlagen wird mit 15 Jahren angegeben (Chedid 2007:4805).

4.24.2 Foresight industrielle Nutzung

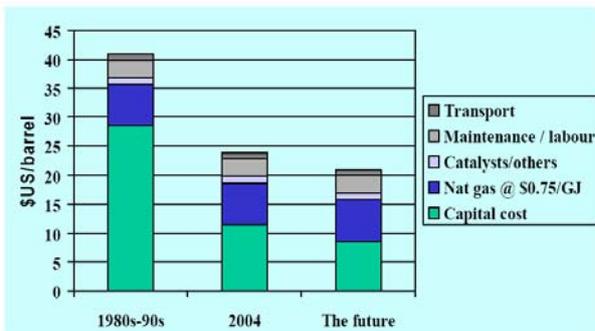
Anlagen zur Kohleverflüssigung (CtL) laufen in Südafrika. Mit den steigenden Ölpreisen hat aber insbesondere die GtL-Technologie weltweit einen Aufschwung erfahren. Mehrere Anlagen sind im Bau und in der Planung. Neben der schon erwähnten Anlage von Shell in Malaysia nahm 2006 in Dubai eine GtL-Großanlage den Betrieb auf. Im Emirat Qatar am Persischen Golf sind mehrere Anlagen in Bau und Planung. Analysten veranschlagen bis 2014 weltweit die Gesamtkapazität der GtL-Anlagen auf 525.000 Barrels Kraftstoff pro Tag (Chedid 2007:11).

Marktanalysten gehen davon aus, dass bei einem Rohölpreis, der dauerhaft über 60 US \$ pro Barrel liegt, die GtL-Kraftstoffsynthese aus Erdgas wirtschaftlich betrieben werden könne. Dieses Niveau wurde im August 2005 erstmals überschritten, im Januar und Februar 2007 lag der Preis kurzzeitig leicht darunter und seit März 2007 wieder darüber. Im Juli 2008 erreichte der Rohölpreis kurzzeitig sogar die 145 € Marke. Die Chancen für die GtL-Technologie stehen günstig, wenngleich zu beachten ist, dass mit

den Rohölpreisen auch die Erdgaspreise anziehen. Eine Wirtschaftlichkeitsrechnung für eine GtL-Anlage in Qatar, das über große eigene Erdgasvorräte verfügt, kommt bei einem Preis für den synthetischen GtL-Diesel von US \$ 23,5 pro Barrel (0,106 €/l) über die angenommene technische Lebensdauer der Anlage von 15 Jahren zu einer Internal Rate of Return (IRR) von 16,5 % (Chedid 2007:4804, 4810). Dies ist eine durchaus attraktive Verzinsung für die Investition.

Die Schätzung der Produktionskosten stimmt gut mit einer anderen Quelle überein, die von heute 24 und künftig von 21 US \$ pro Barrel ausgeht (Abbildung 4-51) (CDI 2007a:8). Abbildung 4-52 zeigt im Vergleich dazu Dieselpreise in Rotterdam, die 2006 über 70 US \$ pro Barrel lagen (BP 2007:17).

Abbildung 4-51: Produktionskosten von synthetischem GtL-Diesel



Quelle: Cobalt News 07/1

Abbildung 4-52: Großhandelspreise für Kraftstoff in Rotterdam in US \$ pro Barrel



Quelle BP

Weniger abhängig vom Erdölpreis ist der Rohstoff der BtL-Technologie, das ist Holz, Stroh und andere Biomasse. Der Weltmarktführer CHOREN geht davon aus, dass mit den Anlagen der nächsten Stufe das Upscalings, das sind Anlagen mit einer Kraftstoff-

kapazität von 200.000 t/a, Produktionskosten von 0,70 €/l synthetischen Diesel erreicht werden können (Angerer 2007:12). Bei voller Besteuerung dieses Biokraftstoffs der 2. Generation mit Mineralöl- und Mehrwertsteuer, würden bei einem Rohölpreis von etwa 130 US \$ pro Barrel die Produktionskosten von petrostämmigem Diesel erreicht. Bei der Befreiung des Biokraftstoffs von der Mineralölsteuer wäre schon unterhalb eines Rohölpreises von 50 US \$ pro Barrel die BtL-Technologie konkurrenzfähig. Eine erste BtL-Pilotanlage mit einer Kapazität von 15.000 t Diesel pro Jahr wird 2009 in Deutschland in Betrieb gehen.

Die Chancen der XtL-Technologien sind vor dem Hintergrund der weltweit stark steigenden Nachfrage nach Kraftstoffen zu sehen. Die Entwicklung der Schwellenländer, allen voran China, wird diesen Trend noch eine Weile anhalten lassen. Und es muss davon ausgegangen werden, dass auch die Entwicklungsländer, beispielsweise in Afrika, nicht auf ihrem Niveau verharren werden, während der Wohlstand im Rest der Welt kontinuierlich steigt. Mobilität ist offensichtlich ein essenzielles Bedürfnis des Menschen und ihre Inanspruchnahme und damit die Kraftstoffnachfrage nehmen mit dem Wohlstandsniveau zu.

Die Weltenergiestatistik von BP gibt den Verbrauch von Benzin und Mitteldestillaten in 2006 mit zusammen rund 56,4 Millionen Barrels pro Tag (bpd) an (BP 2007:14). Der Begriff "Benzin" umfasst darin Ottokraftstoffe und Flugbenzin. "Mitteldestillate" werden als Dieselmotorkraftstoff für Kraftfahrzeuge und Schiffsmotoren, Kerosin für Düsentriebwerke und Heizöl vermarktet.

Tabelle 4-71: Weltverbrauch von Benzin und Mitteldestillaten in Millionen Barrels⁵² pro Tag (BP 2007:14)

	1996	2000	2003	2006
Benzin	22,0	23,7	24,9	26,1
Mitteldestillate (Diesel etc.)	24,7	26,6	27,8	30,3
Kraftstoffverbrauch gesamt	46,7	50,3	52,7	56,4

In den 10 Jahren zwischen 1996 und 2006 stieg der globale Kraftstoffverbrauch im Mittel im jährlich 1,8 %. Seit 2003 hat sich die Steigerung auf 2,3 %/a beschleunigt.

Eine Studie der Royal Society, London, die im Januar 2008 veröffentlicht wurde, geht von einer Steigerung des Kraftstoffbedarfs bis 2030 von 1,3 % pro Jahr aus (RS 2008). Dies scheint angesichts des bestehenden Nachholbedarfs der Schwellen- und Entwick-

⁵² 1 Barrel sind 159 l, das entspricht 118 kg Benzin und 133 kg Diesel.

lungsländer vorsichtig geschätzt. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass der Kraftstoffbedarf der Fahrzeuge durch verbesserte Motorentechnik und Hybridfahrzeuge sinkt. Geht man davon aus, dass sich der Kraftstoffbedarf pro gefahrenen Kilometer bis 2030 halbiert⁵³, entspricht eine mittlere Kraftstoffbedarfssteigerung von 1,3 %/a einer globalen jährlichen Zunahme der Verkehrsleistung um 4,3 % und liegt damit im Bereich des erwarteten Weltwirtschaftswachstums. Shell gibt den heutigen weltweiten Fahrzeugbestand mit 630 Millionen an und geht davon aus, dass diese Zahl bis 2025 auf 1 Milliarde Fahrzeuge steigt. Das wäre eine mittlere jährliche Steigerungsrate des Fahrzeugbestands von 2,5 %.

Im Zeithorizont bis 2030 muss davon ausgegangen werden, dass wasserstoffgetriebene Brennstoffzellenfahrzeuge marktreif werden. Dies wird das Gesamtvolumen an benötigten Kraftstoffen nicht dramatisch verändern, sondern von Kohlenwasserstoffen zu Wasserstoff verlagern. Möglicherweise wird bis dahin ein Teil dieses Wasserstoffs solar hergestellt, der größere Teil dürfte jedoch thermochemisch mit XtL-Technologien erzeugt werden.

4.24.3 Foresight Rohstoffbedarf

Bei einer mittleren Steigerung des globalen Kraftstoffbedarfs von 1,3 %/a wird der Verbrauch von 56,4 Mio. Barrel pro Tag in 2006 auf 76,9 Mio. Barrel pro Tag im Jahr 2030 anwachsen. Welcher Teil davon synthetisch 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.

Die überwiegende Mehrheit der Marktanalysten glauben nicht an eine Rückkehr der Zeiten des billigen Erdöls. Die deutsche Chefprognostikerin, Claudia Kemfert vom DIW,

⁵³ McKinsey geht in seiner groß angelegten Studie "DRIVE - The Future of Automotive Power" von einer erreichbaren Kraftstoffeinsparung von 30 % für Ottomotoren und 20 % für Dieselmotoren bis 2020 aus (Erdmann 2006:2).

prophezeit für das Jahr 2013 sogar einen Rohölpreis von 150 und für 2018 von 200 US \$ pro Barrel (Spiegel Online 2008:1). Die Rahmenbedingungen für den Ausbau der Herstellung synthetischer Kraftstoffe mit XtL-Technologien sind günstig. Aus heutiger Sicht scheint im Jahr 2030 ein Anteil solcher Kraftstoffe von 25 % am gesamten Kraftstoffmarkt als untere Grenze. Das entspricht einer XtL-Kraftstoffmenge 19,2 Mio. bpd.

Bei einem Kobaltbedarf von 5.000 t/Mio. bpd ergibt sich ein Kobaltinventar in den FT-Aggregaten der XtL-Anlagen 2030 von 96.000 t. Der mittlere Kobaltbedarf für den Aufbau der Anlagenkapazität errechnet sich daraus zu 4.020 t pro Jahr. Das ist mit 6 % der Kobaltproduktion von 2006 nicht allzu dramatisch. Der Kobaltbedarf würde allerdings auf 12.020 t/a steigen, wenn 75 % der Kraftstoffe im Jahr 2030 mit XtL-Technologien hergestellt würde. Dies sind dann immerhin schon 18 % der Kobaltproduktion 2006. Tabelle 4-72 gibt den Kobaltbedarf bei unterschiedlichen Marktanteilen der XtL-Kraftstoffe im Jahr 2030 wieder. Da die Katalysatoren recycelt und das enthaltene Kobalt sehr weitgehend zurückgewonnen wird, entsteht *nach* dem Aufbau der Anlagenkapazität kein nennenswerter laufender Kobaltbedarf.

Tabelle 4-72: Kobaltbedarf 2030 bei unterschiedlichen Marktanteilen von XtL-Kraftstoffen

Marktanteil XtL-Kraftstoffe [%]	Menge XtL-Kraftstoffe [Mio. bpd]	Kobaltinventar der XtL-Anlagen [t]	Jährlicher Kobaltbedarf [t/a]
25	19,2	96.500	4.020
50	38,5	192.500	8.020
75	57,7	288.500	12.020
100	76,9	384.500	16.020

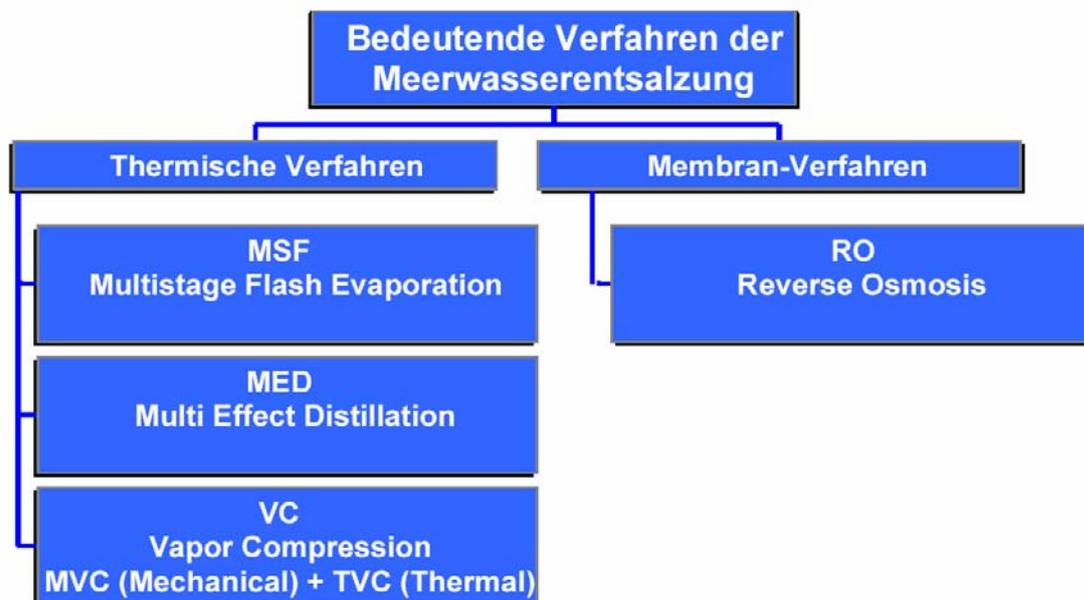
Bei einem angenommenen Promotorengehalt in den Katalysatoren von 0,5 % ergibt sich bei einem XtL-Marktanteil von 25 % ein Promotorenbedarf von 20 t/a. Das wären etwa 10 % der Produktion von Platin oder Palladium im Jahre 2006 und über 40 % der Rheniumproduktion im gleichen Jahr. In der Praxis werden sowohl Platinmetalle als auch Rhenium eingesetzt, der abgeschätzte Promotorenbedarf verteilt sich deshalb auf mehrere Metalle. Trotzdem, von den XtL-Technologien gehen erhebliche Nachfrageimpulse auf diese Metalle aus.

4.25 Meerwasserentsalzung

4.25.1 Technologiebeschreibung

Die Meerwasserentsalzung erfolgt im großtechnischen Maßstab mit ausgereiften Verfahren⁵⁴. Grundsätzlich wird zwischen thermischen und Membran-Verfahren unterschieden.

Abbildung 4-53: Bedeutende Verfahren zur Meerwasserentsalzung



Quelle: Deutsche Meerwasserentsalzung e. V. 2008

Zu den thermischen Verfahren zählt die direkte thermische Multi-Effekt-Destillation (MED), ebenso wie die Dampfkompresseion (VC) und die Multistage Flash Evaporation, die allerdings einen sehr hohen spezifischen Energiebedarf aufweist. Bei den Membranverfahren steigt mit der Umkehrosmose die Bedeutung eines vergleichsweise innovativen Verfahrens, das jedoch auch bereits seit Jahrzehnten erfolgreich zum Einsatz kommt (DLR 2007, Gebel und Yüce 2007).

⁵⁴ Die hier beschriebenen Verfahren werden nicht nur zur Meerwasserentsalzung eingesetzt, sondern auch z. B. zur Aufbereitung von Brackwasser.

Die Entsalzung mit Umkehrosmose verläuft nach folgendem Grundprinzip:

- ▶ Abpumpen von Meereswasser,
- ▶ Vorbehandlung des einfließenden Wassers (Beimischung von Koagulierungsmit-teln, Flockung, Sedimentierung und Filtration),
- ▶ Zwei-stufiger Umkehrosmose-Prozess (Beschickung der Membranen durch Hochdruckpumpen) und
- ▶ Einleitung von konzentrierter Salzlauge ("Brine") ins Meer

Die Meerwasserentsalzung sollte trotz ihres geringen Innovationsgrades aus zwei Hauptgründen als Zukunftstechnologie betrachtet werden:

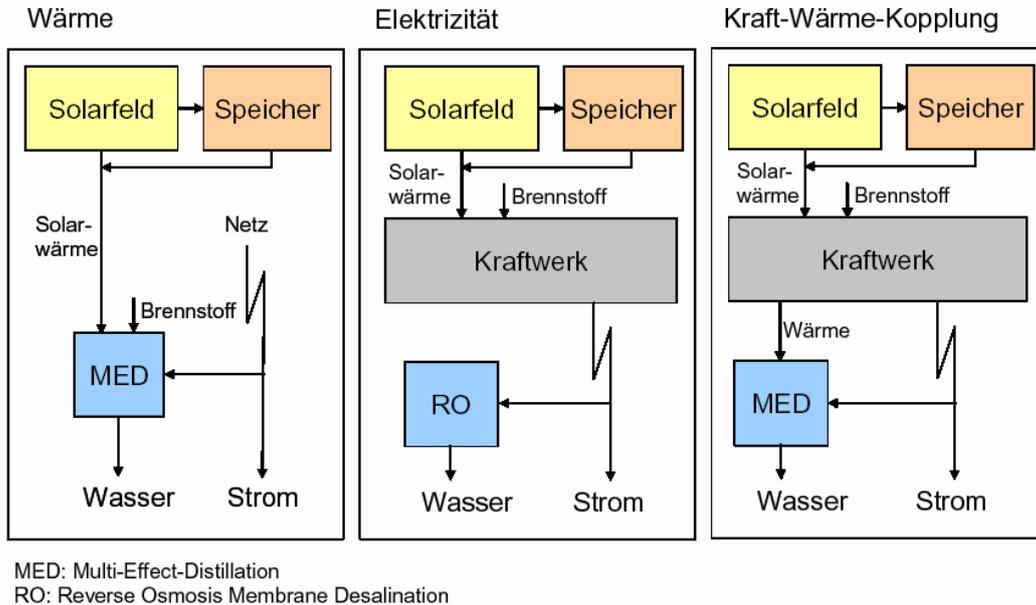
- ▶ Angesichts des hohen Bevölkerungswachstums in ariden Gebieten entsteht eine Deckungslücke in der Versorgung mit Süßwasser, die durch Entnahme fossilen Grundwassers nicht nachhaltig geschlossen werden kann⁵⁵. Nur die Meerwas-serentsalzung birgt in vielen ariden Regionen, darunter im Nahen Osten, in Nordafrika, Spanien und Nordchina, 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).

In Abbildung 4-54 ist die Meerwasserentsalzung im Systemverbund mit solarthermi-schen Kraftwerken (vgl. Technologiesynopse solarthermische Kraftwerke) dargestellt. Dieser intelligente Systemverbund trägt der Koinzidenz 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.

⁵⁵ Die Wasserbedarfsschätzungen gehen von einer Menge von 1000 l pro Kopf und Tag für Haushalte, Industrie und Landwirtschaft aus.

Abbildung 4-54: Meerwasserentsalzung im Systemverbund mit solarthermischen Kraftwerken



Quelle: DLR 2007

Über diese systemischen Grundfragen hinaus steht die Meerwasserentsalzungsbranche vor einer Reihe weiterer spezifischer Innovationsaufgaben, darunter:

- ▶ Reduzierung der Umweltschädlichkeit der konzentrierten Salzlauge,
- ▶ Lösungen gegen Fouling (Ablagerungen von Kolloiden, Mikroorganismen und Metalloxiden) und Scaling (Kristallbildung), insbesondere an Membranen,
- ▶ verbesserte korrosionsfeste Werkstoffe für Rohe, Leitungen und Komponenten in salz- und halogenhaltiger Lösung und
- ▶ Instrumentierung und Kontrollsysteme für die Meerwasserentsalzung, insbesondere im Systemverbund mit regenerativen Energiequellen.

Bei den thermischen Meerwasserentsalzungsverfahren dominieren derzeit französische und italienische Anlagenbauer, bei den Membranverfahren spanische Anlagenbauer. Deutschland ist zwar stark bei den Zulieferern (u. a. Pumpen und Chemikalien), derzeit gibt es aber keinen Deutschen Generalunternehmer.

4.25.2 Rohstoffinhalt

Der Rohstoffinhalt für die Meerwasserentsalzung lässt sich aus einer Fülle unterschiedlicher Einzelquellen qualifizieren⁵⁶. Hinsichtlich des Rohstoffbedarfs für die Meerwasserentsalzung sind folgende Gebiete von spezifischer Bedeutung für die Meerwasserentsalzung:

- ▶ korrosionsfeste Werkstoffe,
- ▶ Membranen (nur für Membranverfahren) und
- ▶ zahlreiche Wasserchemikalien (Anti-Fouling, Anti-Scaling, Korrosionskontrolle).

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 (Informationsstelle Edelstahl Rostfrei 2006). Der Anlagenbauer Outokumpu setzt beispielsweise auf die Qualität 254 SMO™, in letzter Zeit auch stärker auf SAF 2507®. Auch die ThyssenKrupp Stainless AG bietet korrosionsfeste Stähle für Meerwasserentsalzungsanlagen an. 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 Palladium-legierte Titanwerkstoffe nicht der Spaltenkorrosion. Die Preise für die wesentlichen Werkstoffe für die Meerwasserentsalzung sind stark gestiegen. 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. Die Al Hidd Meerwasserentsalzungsanlage in Bahrain benötigte 2.200 t Duplex Stainless Steel von Outokumpu. Bei der MARAFIQ-Anlage 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 Jahr mit MED-Technologie (Outokumpu 2008).

⁵⁶ Eine umfassende spanische Ökobilanz zu Wasserproduktionstechnologien ist kostenpflichtig erhältlich, wurde aber nicht angeschafft. Life Cycle Assessment of Water Production Technologies - Part 1: Life Cycle Assessment of Different Commercial Desalination Technologies (MSF, MED, RO) (9 pp). Zeitschrift. The International Journal of Life Cycle Assessment.

Tabelle 4-73: Zusammensetzung von korrosionsfesten Werkstoffen [Gew.-%]

Rohstoffe	SAF 2507®	254 SMO®	SAF 2304®	2205	NIROSTA®	Allegheny Ludlum Grade 5	Allegheny Ludlum Grade 7
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

Die Membranen für Umkehrosmose bestehen in der Regel aus Zelluloseacetat, was vom Standpunkt des Ressourcenverbrauchs weitgehend unkritisch ist. Der Chemikalienbedarf für eine Entsalzungsanlage mit 10.000 Acre-Feet kann einer Ökobilanz entnommen werden und ist in Tabelle 4-74 zusammengestellt (University of California 2005).

Hinsichtlich des Ressourcenbedarfs ist Zink-Orthophosphat als Korrosionsschutzmittel von Interesse. Bei den geheim gehaltenen Chemikalien handelt es sich womöglich um die Scaling-Inhibitoren Natriumhexametaphosphat (NaHMP) und Polyacrylsäure. Durch eine Vorbehandlungsstufe mit Flockungsfiltration oder Ultrafiltration lässt sich Fouling verringern.

Tabelle 4-74: Chemikalienbedarf einer 10.000 Acre-Feet Meerwasserentsalzungsanlage pro Jahr

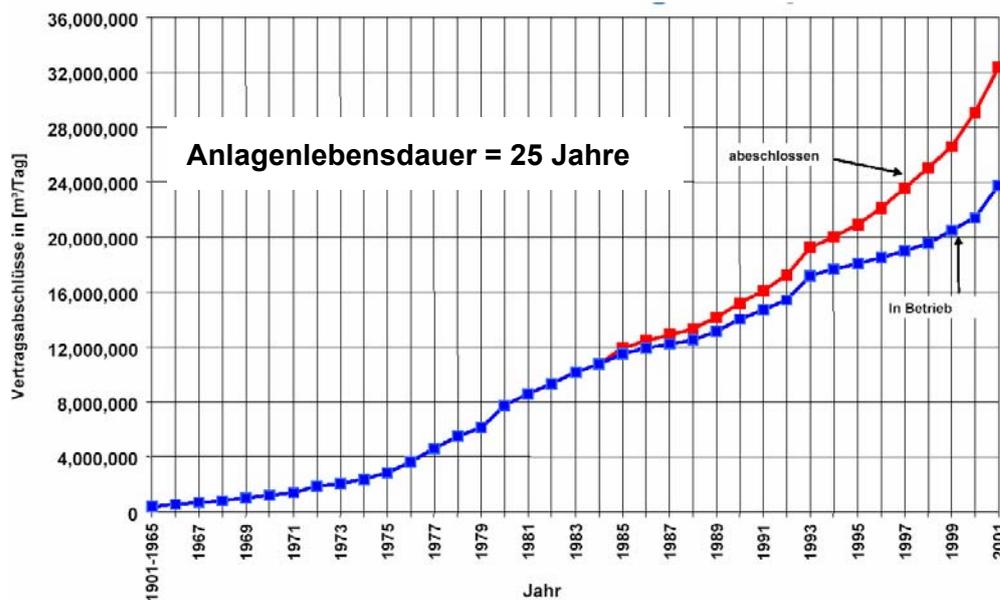
Chemikalie	Gebrauch	Verbrauch [lb/a]
Eisenchlorid	Koagulant	610.000
Polymer	Koagulant	6.100
Schwefelsäure	pH-Einstellung	1.220.000
Polyelektrolyt	Filtrationshilfsmittel	15.000
(Betriebsgeheimnis)	Scaling Inhibitor	244.000
Zink-Orthophosphat	Korrosionsschutz	36.600
Fluorosilikatsäure	Fluoridierung	2.500
Natrium-Hypochlorit	Desinfektion	30.000
wässriges Ammonium	Desinfektion	126.000
Natrium-Hypochlorit	Reinigung	2.000
Calciumcarbonat	pH-Einstellung	365.000

Quelle und Anmerkungen: University of California 2005; 1 Acre foot = 1,2333 m³; 1 lb = 0,45359 kg

4.25.3 Foresight industrielle Nutzung

Abbildung 4-55 zeigt das starke Wachstum der weltweiten Meerwasserentsalzungskapazität seit 1965.

Abbildung 4-55: Entwicklung der globalen Meerwasserentsalzungskapazität seit 1965 (Quelle: Deutsche Meerwasserentsalzung e. V. 2008)



Die Wachstumsrate für Meerwasserentsalzungsanlagen ist exponentiell (ThyssenKrupp Stainless 2008). Es besteht ein weitgehender Expertenkonsens, dass von 2007 bis zum Jahr 2015 eine Verdopplung der Meerwasserentsalzungskapazität von 40 Mio. m³/d auf 80 Mio. m³/d erforderlich ist. Alleine in Saudi-Arabien, den Vereinigten Arabischen Emiraten (VAE) und Libyen müssten dafür jährlich Anlagen mit einer Tageskapazität von 3,5 Mio. m³ errichtet werden. Dies entspricht zehn Großanlagen vom Typ Al Taweelah B in den VAE (Gebel, Yüce 2007).

Angesichts einer Verdopplung der Kapazität in acht Jahren bis 2015 ist eine weitere Vervierfachung bis 2030 vor dem Hintergrund der Erschöpfung fossiler Grundwasserreserven und des Bevölkerungswachstums wohl eher eine konservative Annahme. Nach Frost & Sullivan soll die Wachstumsrate für Meerwasserentsalzungsanlagen zwischen 2015 und 2020 bei 15 % pro Jahr liegen.

- ▶ In Projektion A wird ein jährlicher Zubau von 5 Mio. m³/d bis 2030 angenommen. Dies entspricht den Materialverbräuchen in 2006.
- ▶ In Projektion B wird von 2007 – 2015 ebenfalls ein jährlicher Zubau in Höhe von 5 Mio. m³/d angenommen, von 2016 – 2020 eine Steigerung von 15 %/a, von 2021 – 2025 10 %/a und von 2026 bis 2030 ein Wachstum um weitere 5 %/a zugrunde gelegt.

Der jährliche Zubau beträgt in Projektion A also 5 Mio. m³/d, in Projektion B ist er bis 2030 auf 18,8 Mio. m³/d gewachsen. Die installierte Anlagenkapazität entwickelt sich von heute 40 Mio. m³/d in Projektion A bis 2030 auf 155 Mio. m³/d und in Projektion B bis 2030 auf 220,5 m³/d.

4.25.4 Foresight Rohstoffbedarf

Der gesamte Materialbedarf in 2030 wird anhand der zukünftig erwarteten Gesamtkapazität für die beiden Projektionen abgeschätzt. Die Hälfte des Bedarfs entspricht der Nachfrageverteilung gemäß der MARAFIQ-Anlage in Saudi-Arabien. Jeweils zu einem Viertel sind der hochlegierte NIROSTA Stahl und die zwei Allegheny Ludlum Titanlegierungen anteilig angesetzt worden. Des Weiteren ist der Zinkbedarf aus der Referenzanlage mit 10.000 Acre foot auf die zukünftige installierte Kapazität hochgerechnet worden.

Tabelle 4-75: Globaler Rohstoffbedarf für Meerwasserentsalzung in t

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030
Eisen	1.170.000.000	29.700	112.000
Titan	201.000	14.700	55.300
Chrom	9.010.000	10.900	40.900
Nickel	1.580.000	4.210	15.900
Molybdän	184.000	933	3.510
Mangan	11.900.000	781	2.940
Aluminium	33.700.000	469	1.760
Vanadium	55.700	313	1.180
Palladium	224	15,6	58,8
Zink	10.000.000	22.100	85.700 – 122.000

Die Projektionen A (Fortsetzung des Verbrauchs 2006) und B unterscheiden sich um knapp einen Faktor 4. Von entscheidender Bedeutung für den zukünftigen Materialbedarf ist zum einen die Frage, ob in der Meerwasserentsalzung Stahl oder Titan eingesetzt werden, zum anderen die jeweiligen Legierungen:

- ▶ In der dynamischen Bedarfsvorschau beträgt der Eisenbedarf mit 112.000 t nur den Bruchteil eines Promilles der heutigen Eisenproduktion. Bei Titan wird mit rund 55.300 t Titan-Metall immerhin rund ein Viertel der heutigen Titan-Metallproduktion erreicht.
- ▶ Die Legierungselemente Chrom, Nickel, Molybdän, Mangan, Aluminium und Vanadium erreichen auch in der dynamischen Bedarfsvorausschau keine kritischen Werte. Der Molybdän-Bedarf könnte rund 5 % der heutigen Produktion erreichen, wenn nahezu ausschließlich molybdän-legierte Stähle verwendet würden. Analog gilt für Vanadium, dass nur bei einer etwa zweieinhalb-fachen Erhöhung des Anteils der Grade-5 Titanlegierung der Anteil auf etwa 5 % steigen würde.
- ▶ Der Palladiumbedarf in Höhe von 58,8 t in der dynamischen Bedarfsvorschau erreicht über ein Viertel der heutigen Jahresproduktion in Höhe von 224 t. Auch in der moderateren Bedarfsvorschau wären die 15,6 t Palladiumbedarf für den gesamten Palladiummarkt relevant.
- ▶ Der Zinkbedarf für Korrosionsschutz liegt in den beiden Projektionen zwischen 85.700 t und 122.000 t – eine Größenordnung, die angesichts einer Weltproduktion von 10.000.000 t mit rund 1 % nur wenig ins Gewicht fällt.

Insgesamt liegt der zukünftige spezifische Ressourcenbedarf für die Meerwasserentsalzung in einer vertretbaren Größenordnung. Der gesamte zukünftige Bedarf nach

korrosionsfesten Werkstoffen kann in dieser punktuellen Abschätzung allerdings nicht ermittelt werden. Sie sind auch für etablierte marine Techniken wie Schiffe, Bohrinnseln, Hafenanlagen, Unterwasserpipelines und so weiter erforderlich.

Da bei Titan-Metall und Palladium merkliche Nachfrageimpulse auf die Rohstoffmärkte wahrscheinlich sind, stellt sich auch die Substitutionsfrage. Korrosionsschutz für Meerwasserentsalzungsanlagen 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. Aufgrund der hohen Wachstumsraten bei der Installation und rund 25 Jahren Anlagenlebensdauer entlastet das Recycling die Primärrohstoffmärkte nur mit einem hohen Zeitverzug.

4.26 Festkörper-Laser für die industrielle Fertigung

4.26.1 Technologiebeschreibung

Laser (Light Amplification by Stimulated Emission) bezeichnet eine Technologie zur Generierung eines starken, gebündelten Lichtstrahls. Das optisch aktive Material liegt zwischen zwei Spiegeln, von denen einer halbdurchlässig ist. Eine stehende Welle läuft zwischen den beiden Spiegeln hin und her. Das kohärente Laser-Licht ist parallel und kann durch Linsen auf kleinste Flächen fokussiert werden, so dass sehr hohe Energiedichten entstehen.

Der eigentliche Laser besteht aus einem Wirtsmaterial und dem Lasermaterial. Zu den Wirtsmaterialien gehören insbesondere Glas und Granate ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ – YAG), Saphire, Rubin und Alexandrit, Vanadate (YVO_4) und Fluoride (YLiF_4 – YLF). Zu den Lasermaterialien zählen insbesondere Seltene Erden – Ionen (Nd, Er, Ho, Tm, Yb, Ce, Dy) und auch Titan in Saphir sowie Chrom in Rubin (Roth, o.J.).

Folgende Abbildung zeigt einen typischen Nd:YAG Laser-Kristall, wie er für leistungsfähige Industrie-Laser meist mit der Czochralsky-Methode gezüchtet wird.

Abbildung 4-56: Nd:YAG Laser-Kristall



Quelle: Roth, o.J.

Zu den Bearbeitungsverfahren von Materialien mit Lasern, insbesondere von Metallen, gehören das Schneiden, das Verbinden, die Oberflächenbehandlung, die Formgebung und das Prototyping. Drei Laser-Haupttypen kommen zur industriellen Materialbearbeitung zum Einsatz (Sepold und Grupp 2002):

- ▶ CO₂-Laser erreichen eine Leistung bis zu 4 kW. Durch neue Resonatorkonzepte wurde eine Verbesserung der Strahlqualität erzielt, was neue Einsatzgebiete wie Hochgeschwindigkeitsschneiden und kontaktlosen Schweißen öffnete.
- ▶ Seit den frühen 1990ern stehen lampen-gepumpte Festkörper-Laser, vorwiegend aus Nd:YAG, im kW-Bereich zur Verfügung. Aufgrund der Strahlführung durch Fasern für drei-dimensionale Bearbeitung sind Nd:YAG-Laser inzwischen ein Standard in der Karosserieherstellung von Kraftfahrzeugen.
- ▶ Seit dem Jahr 2000 gibt es die ersten dioden-gepumpten Hochleistungs-Laser (HPDL)⁵⁷. Das Diodenpumpen führt zu besserer Strahlqualität, höherer Leistungsstabilität, längeren Wartungsintervallen und höherer Effizienz. HPDL werden vorwiegend in der Oberflächenbehandlung, beim Löten und beim Wärmeleitungs-Schweißen zum Einsatz kommen.

Die Technologie ist durch die Entwicklung von Hochleistungs-Lasern in hoher Qualität inzwischen in zahlreichen Industriebranchen etabliert. Haupteinsatzgebiete sind die Automobilindustrie und auch neue Anwendungsgebiete wie in Schiffswerften, im Flugzeugbau und in der Stahlindustrie.

Das Potenzial ist jedoch noch nicht ausgeschöpft. Führende Hersteller von Schneidsystemen sagen voraus, dass der Markt für 3D-Bearbeitung in wenigen Jahren 80 % aller Schneid-Anwendungen erreichen wird. Das Schweißen und Löten mit Lasern ist ein schnell wachsender Markt, insbesondere bei Aluminiumkarosserien, im Schiffsbau und bei Leichtbau-Konstruktionen in der Flugzeugproduktion. Am schnellsten wächst der Bereich des Zusammenschweißens von Blechen aus unterschiedlichen Materialien ("tailored blanks"). In der Oberflächenbehandlung im Motorblockbau hat der Wechsel von Gusseisen zu Aluminium für Kraftfahrzeuge hier ein neues Einsatzgebiet eröffnet.

Entwicklungsrichtungen für die Materialbearbeitung mit Lasern sind ökonomische Produktionsprozesse, hohe Bearbeitungsqualität, höchste Bearbeitungsgeschwindigkeit und neue Designs. Auch die Integration in Werkzeugmaschinen wird angestrebt (Sepold und Grupp 2002).

⁵⁷ Hier kommt z. B. Nd:YVO₄ zum Einsatz, da es optimale spektroskopische Eigenschaften für das Pumpen mit Laserdioden hat. Seit der Entwicklung von InGaAs Laserdioden ist auch Yb:YAG ein wichtiges Lasermaterial (Roth, o.J.).

Deutschland verfügt über einen leistungsfähigen Maschinen-, Anlagenbau- und Fahrzeugbau. Auch Deutsche Hersteller von Hochleistungs-Lasern haben eine führende Rolle auf dem Weltmarkt (z. B. II-VI Deutschland GmbH). Das Forschungsinstitut für Mineralische und Metallische Werkstoffe – Edelsteine/Edelmetalle in Idar-Oberstein wird als Nr. 1 in Europa bei der Kristallzüchtung angesehen.

4.26.2 Rohstoffinhalt

Dominierendes Material bei Festkörper-Lasern ist Neodym-gedoptes Yttrium-Aluminium-Granat (Nd:YAG). Neodym ersetzt dabei Yttrium zu typischerweise 0,8 bis 1,1 Atom-%. im Kristallgitter.

Folgende Tabelle fasst einige wesentliche Materialeigenschaften eines Nd:YAG-Kristalls zusammen:

Tabelle 4-76: Materialeigenschaften eines Nd:YAG-Kristalls

Physikalische Eigenschaft	Angabe
Chemische Formel	$Y_{2,97}Nd_{0,03}Al_5O_{12}$
Molgewicht	595,3 g/mol
Dichte	4,55 g/cm ³
Oberer Laser-Zustand	4F3/2 (4-Niveau-System)
Fluoreszenzdauer	230 µs
Hauptpumpbänder	0,75 µm und 0,81 µm

Quelle: Laser Materials Corporation 2008

Die Abmessungen der Laser-Stäbe variieren beträchtlich. Sie betragen z. B. bei der Laser Materials Corporation zwischen 50 und 250 mm Länge und 3 bis 10 mm Durchmesser (Laser Materials Corporation 2008), aber auch dünnere und kürzere Exemplare sind kommerziell erhältlich. Die größten Querschnitte liegen bei ca. 16 mm Durchmesser (Roth, o.J.).

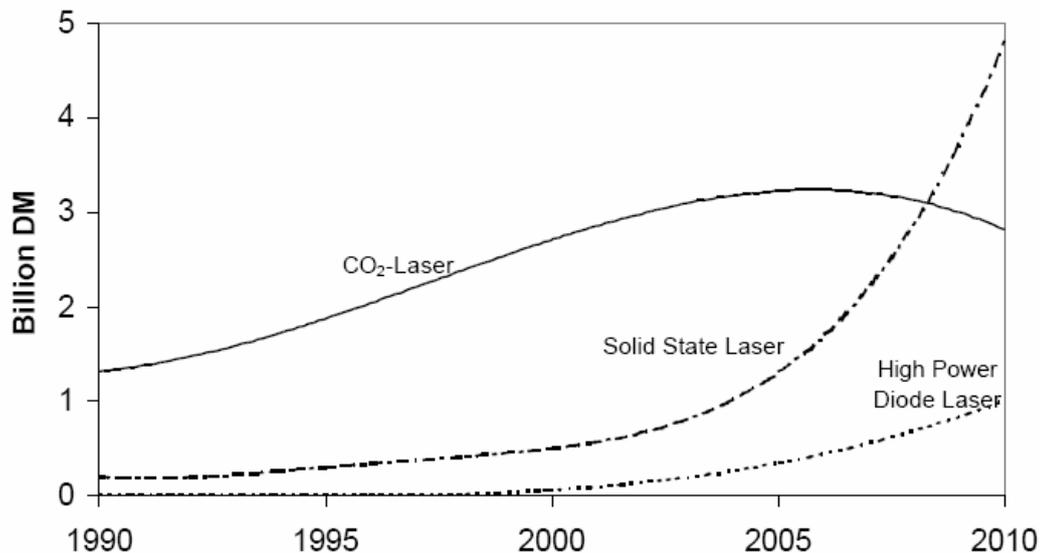
4.26.3 Foresight industrielle Nutzung

Seit mehr als zehn Jahren liegen die Wachstumsraten für das Bearbeiten von Materialien mit Lasern in Deutschland im zweistelligen Bereich.

Von den weltweit produzierten 14.000 diodengepumpten Lasersystemen gingen im Jahr 2004 etwa 3.400 Stück in die Materialbearbeitung (Smandek und Maßmann 2004). Die anderen Einsatzgebiete sind vor allem in Medizin und Forschung.

Folgende Abbildung zeigt die Weltmarktentwicklung für Laser-Systeme zur Materialbearbeitung seit 1990 mit einer Projektion bis 2010:

Abbildung 4-57: Weltmarkt für Laser zur Materialbearbeitung



Quelle: Sepold und Grupp 2002

Während der Umsatz mit CO₂-Lasern tendenziell sinkt, steigt er für Festkörper-Laser exponentiell und, deutlich schwächer, auch für Hochleistungsdioden-Laser. Auch wenn diese Angaben in Form von Umsatz und nicht von Stückzahlen sind, kann dennoch von einem kräftigen Wachstum des Weltmarktes für Feststoff-Laser zur Materialbearbeitung ausgegangen werden, wovon ein wesentlicher Anteil auf Nd:YAG-Lasermaterial entfallen wird.

Geht man von der vereinfachten Annahme davon aus, dass die produzierte Zahl an Festkörperlasern im Jahr 2006 gemäß obiger Abbildung etwa dem dreifachen der Zahl an Dioden-gepumpten Lasern (knapp 4.000 im Jahr 2004) entspricht und addiert diese aufgrund der hauptsächlichlichen Verwendung von Nd:YAG-Kristallen hinzu, so wurden im Jahr 2006 geschätzte knapp 20.000 Lasersysteme für Materialbearbeitung mit Nd:YAG-Kristallen hergestellt. Die zukünftigen Produktionsmengen lassen sich in einer moderaten Projektion mit rund 10 % jährlichem Wachstum bis 2015 und 7,5 %/a Wachstum bis 2030 abschätzen (ca. 140.000 Stück in 2030).

In einer weit reichenderen Projektion liegt die Zahl der Festkörperlaser aufgrund des geringeren Stückpreises nicht um einen Faktor drei, sondern um einen Faktor neun über der Zahl der Dioden-gepumpten Laser (knapp 4.000 im Jahr 2004). Die Ausgangsbasis für 2006 sind in dieser Abschätzung 45.000 Lasersysteme auf Festkörper-

basis im Jahr 2006. In dieser weit reichenden Projektion beträgt die jährliche Wachstumsrate bis 2015 rund 15 % und danach 10 %/a (ca. 660.000 Stück in 2030).

4.26.4 Foresight Rohstoffbedarf

Legt man die gesamte Produktion an Nd:YAG-Kristallen (6mm Durchmesser bei 125 mm Länge) in Verbindung mit den Molmassenanteilen der einzelnen Elemente bei einem Neodymdotierung des Yttriumanteils in Höhe von 1 % (entsprechend 2 Gew.-% im Gesamtkristall) zugrunde, so erhält man folgende Bedarfsvorschau für die beiden Projektionen:

Tabelle 4-77: Projektion des globalen Rohstoffverbrauchs für die Herstellung von Nd:YAG-Kristallen zur Laser-Materialbearbeitung

Rohstoff	Weltproduktion 2006 [t]	Verbrauch 2006 [kg]	Bedarfsvorschau 2030 [kg]
Neodym	7.300	15	45 – 215
Yttrium	7.008	552	1.710 – 8.110
Aluminium	33.700.000	85	264 – 1.250

Quelle: eigene Berechnungen; Weltproduktion von Yttrium als Elementgehalt der Produktionsmenge des Oxids

Die Projektionen des globalen Rohstoffverbrauchs für die Herstellung von Nd:YAG-Kristallen für die Laser-Materialbearbeitung zeigt, dass der Effekt auf die Rohstoffnachfrage für Neodym, Yttrium und Aluminium durchgängig zu vernachlässigen ist. Die obere Projektion ist ein wenig wahrscheinlicher als die untere.

Die Lage ist so eindeutig, dass nur bei extremen Annahmen, sowie bei deutlich höheren Wachstumsraten und Berücksichtigung weiterer Einsatzgebiete von Nd:YAG-Lasern in Medizin und Forschung nennenswerten Effekte auf die Rohstoffnachfrage zu erwarten sind. Laserkristalle werden zudem auch gebraucht gehandelt, was hier nicht berücksichtigt ist.

4.27 Nanosilber

4.27.1 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 Zweiten werden sie wie essentielle 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.

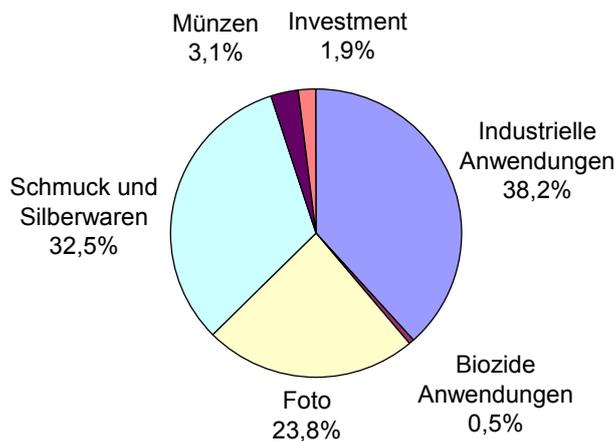
Während Silber beim Einsatz als wasserlösliches Salz als Ion vorliegt und somit verfügbar ist, liegen bei nanopartikulärem Silber komplexere Verhältnisse vor. Es müssen die Verfügbarkeit der Partikel sowie auch die Bildung von Silberionen berücksichtigt werden. Von Morones et al. (2005) wurden für gramnegative Mikroorganismen drei Wirkmechanismen für freie Silber-Nanopartikel identifiziert: (I) Bindung an und Einlagerung in die Zellwand, wodurch wichtige Funktionen, wie beispielsweise die Permeabilität gestört wird; (II) Bindung an Schwefel- und Phosphat-haltige Moleküle im Zellinneren (z. B. DNA, S-haltige Enzyme) und Störung von deren Funktion; (III) Freisetzung von Ag-Ionen, die wiederum antibakteriell wirken. In der Untersuchung von Morones et al. (2005) zeigte sich, dass für die untersuchten gramnegativen Bakterien nur Partikel bis 10 nm toxisch waren.

4.27.2 Rohstoffinhalt

Die wesentlichen Einsatzbereiche der weltweit etwa 28.000 t konsumierten Silbers sind in Abbildung 4-58 dargestellt. Zusätzlich zur Minenproduktion finden im erheblichen Umfang eine Nutzung von Silberschrotten (2006: ca. 5.800 t) und ein Verkauf durch Regierungen statt (2006: 2.400 t). 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 Oxi-

dationsbeständigkeit) 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 Biozid macht ca. 0,5 % aus, das sind 150 t.

Abbildung 4-58: Verbrauch von Silber weltweit



(Winnacker-Küchler, 2006; ergänzt)

Die fungiziden, bakteriziden und herbiziden Wirkungen des Silbers sind schon seit dem Mittelalter bekannt. Vor allem im asiatischen Markt sind 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 und auch als Schutz vor Infektionen mit Methicillin-resistenten *Staphylococcus aureus* (MRSA). In Asien wird Nanosilber in großer Breite, vom Reisanbau bis zum Einweben von nonosilberhaltigen Fasern in Socken oder Unterwäsche genutzt. 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 den Produkten gehören Kühlschränke, Lichtschalter, Zahnbürsten, Badezimmermöbel oder Kücheneinrichtungen. Zum Teil wird Nanosilber aber auch nur aus Werbegründen eingesetzt (Hund-Rinke et al., 2008).

Die Silberkonzentration in Additiven, die zur Einstellung antibakterieller Eigenschaften in Produkten eingesetzt werden, liegen deutlich unter 2 %⁵⁸. 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.

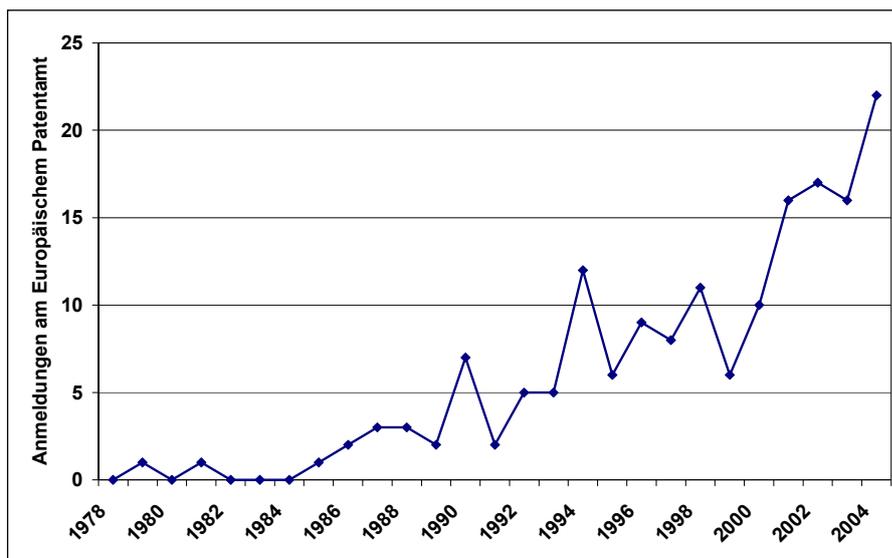
⁵⁸ <http://www.scorecard.org>.

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).

4.27.3 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: So sollen laut Angaben eines Herstellers (HeiQ) im Jahr 2010 auf dem Europäischen Markt 17,5 Tonnen Silber für textile Anwendungen und 175 Tonnen zur Kunststoffproduktion genutzt werden (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 Abbildung 4-59.

Abbildung 4-59: Anmeldungen beim Europäischen Patentamt für "Silber Biozide"



4.27.4 Foresight Rohstoffbedarf

Die Abschätzung des Rohstoffbedarfs ist schwierig, da es schon für die heute verwendeten Mengen keine Marktübersicht gibt. Das liegt teilweise an dem noch sehr wettbewerbsgetriebenen Markt, andererseits aber auch an den sehr unterschiedlichen Märkten: während der deutsche Markt auf 8 – 10 t silberhaltige Additive (= ca. 200 kg Silber, davon einige Kilogramm Nanosilber) beziffert wird, soll das japanische Marktvolumen für Additive bei jährlich 500 t liegen (Hund-Rinke et al., 2008). Diese positive Einstellung biozidem Silber gegenüber wird im gesamten asiatischen Raum geteilt, dennoch ist der in Tabelle 4-78 genannte Verbrauch von 30 t Nanosilber für 2006 eher als eine obere Abschätzung zu sehen.

Tabelle 4-78: Globaler Rohstoffbedarf für Nanosilber in t

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030
Silber	20.200	30	250

Die Abschätzung des weltweiten Einsatzes an Nanosilber für 2030 ist aus denselben Gründen wie für 2006 sehr unsicher. Inwieweit die derzeit in Westeuropa und den USA geführte kritische Diskussion 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 toxische organische Biozide zu substituieren. Rechnet man sehr grob die Einsatzmengen des asiatischen Raumes weltweit hoch, so lässt sich ein Bedarf von ca. 250 t für das Jahr 2030 abschätzen.

Medizintechnik

4.28 Orthopädische Implantate

4.28.1 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 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), Glasauge, 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.

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. Sie besitzen technologisches Zukunftspotenzial, sind von großer wirtschaftlicher Bedeutung, lassen in der alternden Bevölkerung steigende Fallzahlen erwarten und ihre Herstellung benötigt im Vergleich zu anderen medizinischen Implantaten eine vergleichsweise hohe Werkstoffmenge. Das wichtigste orthopädische Implantat ist die Hüftgelenksprothese, gefolgt vom Kniegelenkersatz. Auch für das Schultergelenk, das Sprunggelenk, Handgelenk, die Fingergelenke und andere stehen Endoprothesen zur Verfügung.

Abbildung 4-60 zeigt die Teile eines künstlichen Hüftgelenks. Es besteht 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. Dies wird durch die Wahl hoch verschleißfester Werkstoffe erreicht. Der Preis für ein Hüftimplantat liegt bei 3.000 US \$ (AAOS 1998:2).

Abbildung 4-60: Komponenten eines künstlichen Hüftgelenks



Quelle: Werkbild Stryker

4.28.2 Rohstoffinhalt

Bevorzugtes Metall für tragende Teile von Prothesen ist Titan. Das Metall ist mit einem spezifischen Gewicht von $4,5 \text{ g/cm}^3$ sehr leicht, besitzt trotzdem hohe Bruchfestigkeit, ist korrosionsbeständig und biokompatibel, eine für Implantate beinahe ideale Kombination von Eigenschaften. Titan ist allerdings wenig verschleißfest und eignet sich deshalb nicht als Werkstoff für Gleitpaarungen. Als alternative Werkstoffe kommen Kobalt-Chrom-Molybdän-Legierungen (CoCrMo) und Keramiken zum Einsatz. Früher genutzte Superlegierungen auf Nickelbasis wurden wegen häufiger Komplikationen durch Nickelallergien verdrängt.

Verschleißfeste und biokompatible Werkstoffe für Gleitpaarungen sind (TÜV 2006:20):

- ▶ CoCrMo / UHMWPE
- ▶ Keramik / UHMWPE
- ▶ CoCrMo / CoCrMo
- ▶ Keramik / Keramik

Die Verschleißrate nimmt in der Aufzählung von oben nach unten zu.

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 Nickel freien 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.

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 Gelenkpfanneneinsatz, in welchem der CoCrMo-Gelenkkopf gleitet.

Für ein modernes, Nickel freies, künstliches Hüftgelenk mit einem CoCrMo Gelenkkopfdurchmesser von 36 mm, mit Schaft und Gelenkpfanne aus Titan wurden die in Tabelle 4-79 zusammengestellten Richtwerte für den Metallgehalt abgeschätzt. Legierungsmetalle im Titan sind dabei vernachlässigt. Das Gewicht des UHMWPE Kunststoffs in der Titanpfanne kommt hinzu.

Tabelle 4-79: Metallgehalt eines modernen Hüftgelenks

Metall	Gewicht [g]
Kobalt	136
Chrom	58
Molybdän	12
Titan	87
Summe Metallgewicht	293

4.28.3 Foresight industrielle Nutzung

In Deutschland werden jährlich etwa 150.000 Hüftgelenke implantiert. Weltweit zählt die WHO 2006 3 Mio. Hüftoperationen (Stama 2006:82). Im Vereinigten Königreich werden jährlich über 62.000 Hüft- und fast 62.000 Kniegelenke ersetzt (Stama 2006; NHS 2008). Legt man dieses Verhältnis zugrunde, dürften heute weltweit etwa 6 Mio. künstliche Hüft- und Kniegelenke eingesetzt werden. Das globale Marktpotenzial für (alle) Implantate wird von DePuy Orthopaedics, einem führenden US Unternehmen, für 2004 mit 21,4 Mrd. US \$ angegeben (CDI 2005:5). Der US amerikanische Markt für künstliche Hüft- und Kniegelenke ist nach der gleichen Quelle zwischen 1992 und 2000 jährlich um 7,25 % und zwischen 2000 und 2004, dem Basisjahr des Berichts, jährlich mit 4,75 % gewachsen. Der Autor geht davon aus, dass das zuletzt genannte Wachstum bis 2012 anhält.

In Deutschland stagniert seit 2000 nach Angaben des Statistischen Bundesamtes die Medizintechnik-Produktion, die in der Warengruppe WZ 33.1 zusammengefasst wird (DSV 2007:7). Sie schließt neben Prothesen auch bildgebende Diagnoseverfahren, medizinische Geräte und Instrumente sowie zahntechnische Erzeugnisse ein. Den deutschen Herstellern ist es auch im Export nicht gelungen, das Geschäft auszuweiten.

Die alternde Bevölkerung und die steigende Lebenserwartung in den entwickelten Industrienationen lässt den Bedarf nach prothetischen Hilfsmitteln wachsen. Jeder Zweite über sechzig soll an Gelenksbeschwerden leiden. Ein Schweizer Hersteller von Werkzeugmaschinen für die Fertigung von künstlichen Hüftgelenken rechnet als Folge der demografischen Entwicklung in den Industrieländern in den kommenden Jahren mit einem drastischen Anstieg an Hüftgelenksoperationen (Stama 2006:82).

Auf der anderen Seite kann die ungebrochene Steigerung der Kosten des Gesundheitswesens, mit dem die Leistungserbringer finanziert werden, sich nicht unbegrenzt fortsetzen, ohne Versicherte und Wirtschaft zu überfordern. Wie eine wirksame Kostendämpfung allerdings erreicht werden kann, ist nach wie vor völlig offen.

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 diesem Geflecht von treibenden und hemmenden Faktoren ist die Abschätzung der globalen Nachfrageentwicklung nach orthopädischen Implantaten bis 2030 hoch spekulativ. Zur Abschätzung der Bedeutung dieser Zukunftstechnologie soll eine Wachstumsprojektion von 4,75 %/a bis 2030 zugrunde gelegt werden. Dies dürfte eher an der Obergrenze der tatsächlich eintretenden Entwicklung liegen. Mit diesem Wachstum erreicht 2030 das globale Marktvolumen für künstliche Hüft- und Kniegelenke 18 Mio. Stück.

4.28.4 Foresight Rohstoffbedarf

Legt man die in Tabelle 4-79 zusammengestellten Richtwerte für den Metallgehalt als Referenz zugrunde, dann ergibt sich bei einer Produktion von 18 Mio. Stück künstlicher Gelenke in 2030 der in Tabelle 4-80 zusammengestellte Werkstoffbedarf. Spalte zwei der Tabelle enthält die globale Gesamtproduktion des jeweiligen Rohstoffs im Jahr 2006, Spalte drei den Verbrauch für orthopädische Implantate im gleichen Jahr und die letzte Spalte die Nachfrageprojektion für 2030.

Tabelle 4-80: Projektion des globalen Rohstoffverbrauchs für die Herstellung orthopädischer Implantate in t

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030
Kobalt	57.500	820	2.400
Chrom	19.600.000	350	1.000
Molybdän	184.000	70	220
Titan ⁵⁹	121.000	520	1.600

Die Projektion zeigt, dass die Impulse, die von der zu erwartenden Nutzung künstlicher Gelenkimplantate auf die künftige Nachfrage nach Metallen ausgehen, nicht ausgeprägt sind. Auch hier ist der Kobaltbedarf der kritische Pfad, hält sich aber mit gut 4 % der heutigen Weltproduktion in Grenzen. Bei Titanmetall erreicht der projektierte Bedarf für 2030 1,3 % der heutigen Produktion, bei den übrigen Metallen ist er 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. Dies muss für die wertmäßigen Erlöse nicht gelten, weil in dieser Anwendung höchste Qualitätsanforderungen gestellt werden und enorme Margen erzielt werden dürften.

⁵⁹ Metall, ohne Titandioxid.

4.29 Medizinische Tomographie

4.29.1 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).

Abbildung 4-61: Dreidimensionale Rekonstruktion der Schnittbilder eines Computertomographen.



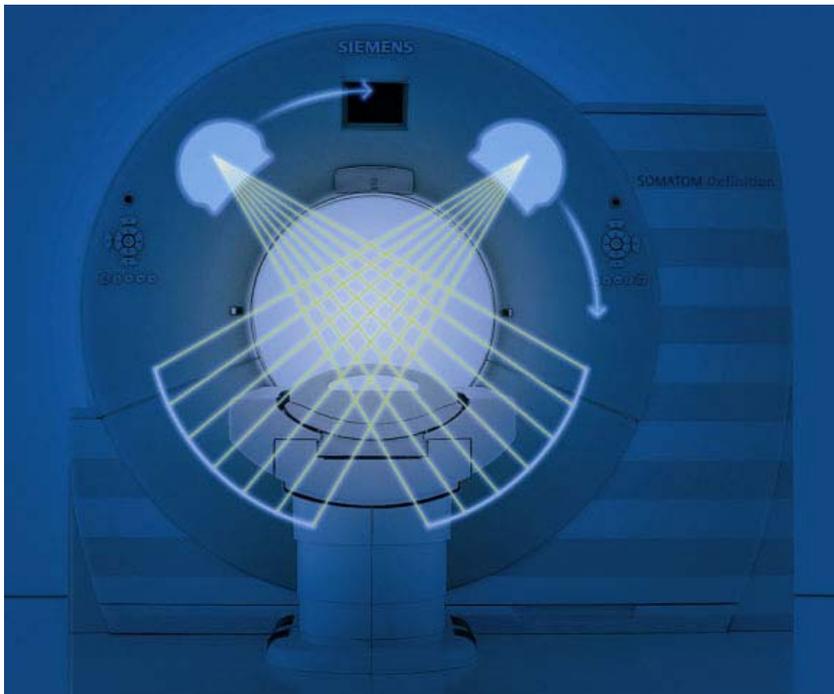
Quelle: SIEMENS Healthcare

Bei der CT 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 Röntgen-

quelle 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 2008:1) synchron in einem Ring, der Gantry, um die Liege mit dem Patienten im Zentrum (Abbildung 4-62). Die Liege wird senkrecht zur Gantry schrittweise verschoben und so Schnitt für Schnitt 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 (Abbildung 4-62). In alternativen Konstruktionen sind die Detektoren an der Gantry fest eingebaut und rotieren nicht mit der Röntgenröhre.

Abbildung 4-62: CT mit zwei Röntgenstrahlern und Detektoren



Quelle: SIEMENS Healthcare

Das Kernstück von Computertomographen ist der Röntgendetektor. Er ist als Szintillator ausgebildet und wandelt die Röntgenstrahlung in sichtbares Fluoreszenzlicht, das auf Fotodioden trifft. Die in den Photodioden entstehenden elektrischen Signale werden elektronisch ausgewertet und zum Schnittbild rekonstruiert. Der Szintillator muss zum einen hoch empfindlich sein, um die Strahlenbelastung des Patienten niedrig zu halten. Er muss zum anderen ein extrem schnelles Signalfolgeverhalten aufweisen, um die sehr kurzzeitigen Änderungen der Röntgenstrahlintensität nicht zu verfälschen. Konventionell wurde Yttrium-Gadolinium-Oxid (YGO) als Szintillatormaterial eingesetzt.

Yttrium und Gadolinium sind Seltene Erdmetalle. Die Zusammensetzung neuer Entwicklungen hüten die Hersteller als Betriebsgeheimnis. SIEMENS Healthcare bewirbt seinen Detektor als "UltraFastCeramic" (UFC). Er besteht aus Gadoliniumoxid, Schwefel und anderen Zusätzen und wird pulvermetallurgisch hergestellt. GE Healthcare spricht bei seinem Szintillator aus 98 % Granat (Halbedelstein) und 2 % Seltene Erden von einem revolutionären Durchbruch nach zwei Jahrzehnten Forschungsarbeit (Frost 2007:30).

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 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 Korns kippt in die Ebene des Wechselfelds. Durch die Wahl der Stärke des stationären Feldes und des Wechselfelds kann gesteuert werden, welche Kerne (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 2008:4).

Neben CT und MRT gibt es eine Reihe weiterer bildgebender Verfahren. Darunter die Ultraschalldiagnostik (Sonographie), die Positronen-Emissions-Tomographie (PET) und die Single Photon Emission Computed Tomographie (SPECT). PET und SPECT zeichnen die aus dem Körper kommenden Signale von Radioisotopen auf, die dem

Patienten vor der Untersuchung verabreicht wurden. 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.

4.29.2 Rohstoffinhalt

Tomographen wiegen mehrere Tonnen und bestehen zu etwa 80 % aus Eisen, Stahl, Kupfer und anderen Nichteisenmetallen.

Tabelle 4-81: Materialzusammensetzung des SIEMENS-Computertomographen SOMATOM Definition mit zwei Röntgenquellen (Siemens 2007:4)

Stoffe	Anteil in %	Gewicht in kg
Eisen und Stahl	61	2.960
Kupfer und andere Nichteisenmetalle	22,6	1.096
Blei	0,4	19
Kunststoffe	10	485
Anorganische Werkstoffe und Keramik	1,7	82
Lacke und andere organische Stoffe	1,6	78
Edelmetalle	0,0073	0,35
Rest	2,7	130
Gesamt	100	4.850

Blei wird für die Röntgenabschirmung der Strahlformung benötigt. In dieser Anwendung stehen keine alternativen Stoffe zur Verfügung. Zur Zusammensetzung des Szintillator-Detektors wird in einer Produktinformation gesagt, dass dieser Gadolinium, Schwefel und andere Beimischungen enthält (Schröder 2004:65). Aus den dort und in der Produktdeklaration (Siemens 2007:5) gegebenen Informationen errechnet sich eine Gadoliniumoxid- (Ga_2O_3) oder Gadoliniumsulfid- (Ga_2O_2S) 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 Tabelle 4-82 ist möglicherweise durch supraleitendes Material der Spulenwerkstoffe bedingt.

Tabelle 4-82: Materialzusammensetzung des SIEMENS-Kernspintomographen MAGNETOM Avanto (Siemens 2006:4)

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

4.29.3 Foresight industrielle Nutzung

Die Medizintechnik gilt als Wachstumsbranche, wobei das Wachstum vom Export getragen wird. Deutschland hält mit einem Anteil von 15 % am Welthandel mit Medizintechnik eine beachtliche Position (Prognos 2007:35). Die großen europäischen Hersteller von Tomographen sind SIEMENS Healthcare und PHILIPS Healthcare. Die globalen Wettbewerber sind das US Unternehmen GE Healthcare sowie Hitachi Medical Systems und Toshiba Medical Systems im asiatischen Raum (Frost 2007:4). Die FuE-Aufwendungen der Medizintechnik-Hersteller in Deutschland in Höhe von 8 % des Umsatzes weisen die Branche als Spitzentechnologiesektor aus (Prognos 2007:37).

Der Weltmarkt für Medizintechnik wird auf 260 Mrd. € geschätzt, davon werden 29,9 Mrd. € oder 11,5 % für Diagnosegeräte einschließlich bildgebender Systeme ausgegeben. Der Umsatz der deutschen Medizintechnikhersteller ist von 2000 bis 2006 im Mittel um 9 % pro Jahr auf 16 Mrd. € gewachsen, 64 % davon gehen in den Export. Getragen wurde das Wachstum vom Export (Prognos 2007:36). Der Inlandsabsatz stagnierte praktisch im gleichen Zeitraum (DSV 2007:7). In den nächsten 10 Jahren wird von Analysten eine Verdoppelung des Medizintechnikumsatzes deutscher Hersteller erwartet. Das entspricht einer jährlichen Wachstumsrate von 7 %. Der Weltmarkt soll bis 2010 jährlich mit 5 % wachsen (Prognos 2007:35, 34).

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 2030 gedeckt sein wird, sind hoch spekulativ. Geht man von einer günstigen künftigen Entwicklung von Wohlstand und medizinischer Versorgung in den Entwicklungs- und Schwellenländern aus, könnte der Weltmarkt für Computer- und Kernspintomographen zwischen 2006 und 2030 mit 4,75 % pro Jahr wachsen. Dann würden 2030 fast dreimal so viele Tomographen aus-

geliefert wie 2006. Die Projektion dürfte eher an der oberen Grenze der möglichen tatsächlichen Entwicklungen liegen.

2006 waren weltweit etwa 25.000 CT und MRT im Einsatz (Katscher 2003:16). Bei einer angenommenen mittleren Nutzungsdauer von 8 Jahren errechnet sich für 2006 eine globale Marktmenge (Produktion) von etwa 3.000 Tomographen.

4.29.4 Foresight Rohstoffbedarf

Die globale Marktmenge von Gadolinium war nicht zu ermitteln. Sie wurde deshalb abgeschätzt. Die Metalle der Seltenen Erden weisen sehr ähnliche chemische und physikalische Eigenschaften auf und liegen deshalb in den geologischen Lagerstätten vergesellschaftet vor. Dies wurde für die Abschätzung genutzt. 2006 sind zusammen 123.000 t Seltene Erden als Oxid (X_2O_3) produziert worden (USGS 2008). Der mittlere Anteil von Gadolinium in den geologischen Vorkommen der seltenen Erden errechnet sich aus (Ullmann 2005:10) mit 3,52 %. Damit ergibt sich eine Weltproduktion von Gadolinium im Jahr 2006 von rund 4.500 t.

Für Detektoren von Computertomographen wurden mit dem Kapitel 4.29.2 geschätzten Inventar 2006 weltweit etwa 780 t Gadoliniumoxid verbraucht. Selbst in der Projektion einer anhaltend hohen Wachstumsrate von 4,75 %/a ergibt sich für 2030 ein unkritischer Bedarfsanstieg an Gadoliniumoxid auf etwa 2.400 t/a. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Gadolinium aus gebrauchten, aus der Produktion genommenen Tomographen zurückgewonnen wird. SIEMENS Healthcare gibt an, das 93 % des Gewichts von gebrauchten MRT und 97 % von CT stofflich verwertet werden.

Auch bei den für die Herstellung von Tomographen genutzten Edelmetallen und Massenrohstoffen (Commodities) nimmt der künftige Bedarf an bekannten Werkstoffen für die Herstellung von Tomographen keine kritischen Werte an, insbesondere dann nicht, wenn das weitgehende stoffliche Recycling gebrauchter Geräte berücksichtigt wird.

Tabelle 4-83: Rohstoffbedarf für die Herstellung von Computertomographen in t

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030
Eisen und Stahl	1.170.000.000	10.250.000	31.200.000
Kupfer und Nichteisenmetalle	> 60.000.000	5.700.000	17.400.000
Edelmetalle	> 20.000	550	1.700
Gadoliniumoxid	4.500	780	2.400

Werkstofftechnik

4.30 Superlegierungen

4.30.1 Technologiebeschreibung

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 nicht unter die Umgebungstemperatur absenken lässt, bleibt für die Wirkungsgradverbesserung nur die Erhöhung der Eintrittstemperatur. Dem sind durch die Werkstofffestigkeit Grenzen gesetzt. 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 CO_2 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 800 °C. Mit ferritischen rostfreien Stählen lassen sich Einsatztemperaturen bis 1350 °C erreichen, die Festigkeit ist bei diesen Temperaturen allerdings gering. Diese Stähle sind zwar hitzebeständig, aber nicht warmfest. Bei höheren Anforderungen an die Festigkeit wird auf Superlegierungen und Cermets zurückgegriffen.

Die Arbeitstemperaturen warmfester Superlegierungen auf Nickelbasis in Gasturbinen erreichen heute 1230 °C. Die Einlasstemperaturen zur ersten Schaufelreihe liegt bei Erdgasgefeuerten Turbinen mit 1550 °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 Keramiksicht senkt die Temperatur des darunter liegenden Materials um 150 °C (Pictures of the Future 2002:63).

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.

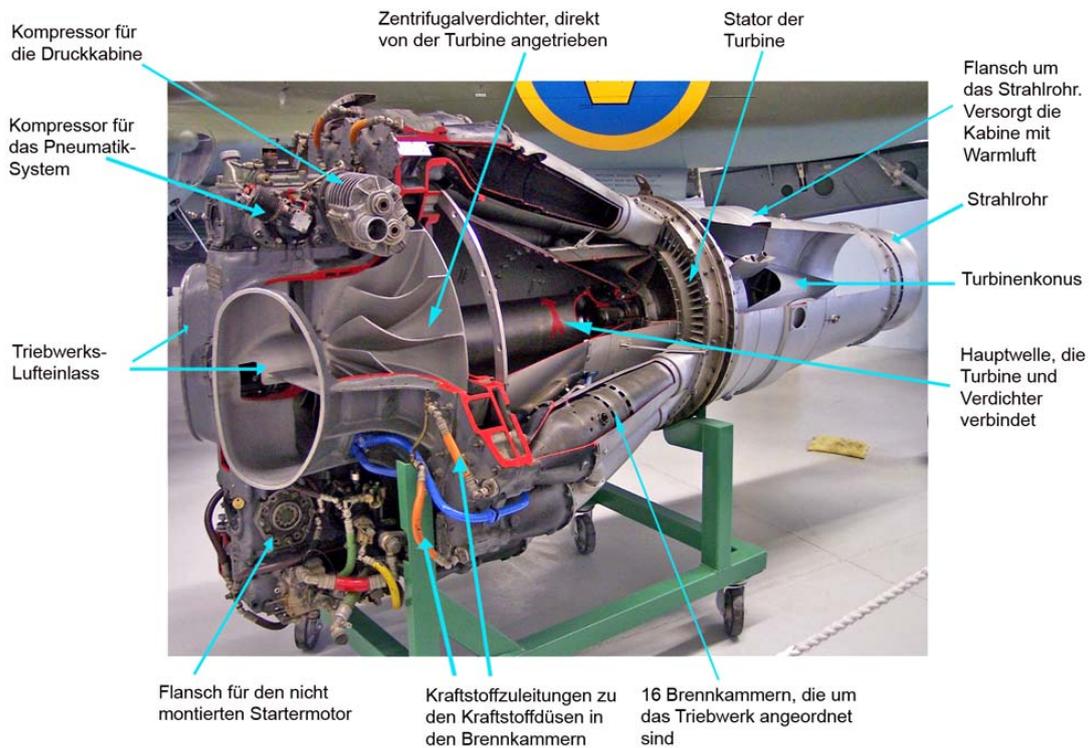
Hochtemperatur-Technologien sind in zahlreichen Sektoren, Prozessen und Produkten von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Bei Triebwerken für die Luft- und Raumfahrt, stationären Gas- und Dampfturbinen, Diesel- und Ottomotoren für Kraftfahrzeuge, Heizkesseln für die Gebäudeheizung, in der Eisen- und Stahlindustrie, 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.

4.30.2 Rohstoffinhalt

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 Treibwerke erreichen Spitzentemperaturen von über 1000 °C. Sie werden heute aus Nickelbasis-Superlegierungen gefertigt, ebenso wie der Turbinenrotor, die Brennkammern und die Auslasseinheit mit dem Strahlrohr. Abbildung 4-63 zeigt ein Strahltriebwerk älterer Bauart, bei dem die wesentlichen Komponenten gut erkennbar sind. Heute werden Mantelstromtriebwerke verwendet, mit getrennten coaxialen Wellen für die Verdichter- und Turbinenstufe.

Abbildung 4-63: Strahltriebwerk



Quelle: Wikipedia

Superlegierungen sind aus der Luft- und Raumfahrt in viele andere Anwendungen vordringen. Beispiele sind Abgasventile in Verbrennungsmotoren, Komponenten von Autoabgaskatalysatoren, Hochtemperaturfedern, Schmiedewerkzeuge, Bohrwerkzeuge bei der Erdöl- und Erdgasförderung und Wärmetauscher.

Markennamen für Nickelbasis-Superlegierungen sind Inconel[®], Incoloy[®], Hastelloy[®], Nimonic[®], Waspaloy[®], Cronifer[®], Nicrofer[®]. Die Zusammensetzung von Inconel[®] mit der Werkstoffnummer 2.4668 ist in Tabelle 4-84 beispielhaft für eine warmfeste Superlegierung zusammengestellt.

Tabelle 4-84: Zusammensetzung einer warmfesten Inonel[®] Superlegierung

Legierungselement	Gewichtsanteil [%]
Nickel	52,50
Chrom	19,00
Eisen	19,00
Niob	5,10
Molybdän	3,00
Aluminium	0,90
Titan	0,90
Kupfer	≤ 0,10
Kohlenstoff	0,04

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 1983:290). 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 (Enghag 2004:665).

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 Tabelle 4-85 (CM 2008:2).

Tabelle 4-85: Zusammensetzung von verschleißfesten Stellite-Superlegierungen

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 übertreffenden Verhältnisses von Festigkeit zu Gewicht in unzählige Anwendungen vorgezogen. Heute stehen hochwarmfeste, korrosionsbeständige Titanlegierungen für Arbeitstemperaturen bis 600 °C zur Verfügung (Ullmann 2005:27). Sie erreichen damit beinahe die Einsatzgrenze hochwarmfester Stähle. Tabelle 4-86 zeigt die Zusammensetzung der Titanlegierung IMI 829 für Hochtemperatur-Technologien. Als weitere Legierungselemente in spezifischen Anwendungen werden Kupfer, Mangan, Vanadium und andere verwendet.

Tabelle 4-86: Zusammensetzung einer warmfesten Titanlegierung

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 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. Tabelle 4-87 gibt einige Beispiele für die Zusammensetzung hoch warmfester Cermets von wirtschaftlicher Bedeutung wieder. Die Werkstoffe LT-1 und LT-1B weisen bis 1200 °C gute Kriecheigenschaften auf (Ullmann 2005:6).

Tabelle 4-87: Zusammensetzung von warmfesten Cermets

Legierungselement	Gewichtsanteil		
	Cermet LT-1 [%]	Cermet LT-1B [%]	Cermet LT-2 [%]
Chrom	77	59	25
Aluminiumoxid Al_2O_3 (Tonerde)	23	19	15
Molybdän	-	20	-
Titandioxid TiO_2	-	2	-
Wolfram	-	-	60

Graphit

Kohlenstoff als Graphit kann in einer inerten oder reduzierenden Arbeitsumgebung bei Temperaturen bis zu 3000 °C eingesetzt werden. In einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre allerdings beginnt Graphit oberhalb von 500 °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.

4.30.3 Industrielle Nutzung und Rohstoffbedarf

Die Nutzung von Nickel-Chrom-Legierungen geht zurück auf den Beginn des 20. Jahrhunderts. 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 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, darauf wurde hingewiesen. Es sind High-tech-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 2005:27). Bei Dieselmotoren hält die gleiche Quelle durch die Nutzung von Hochtemperaturkeramiken eine Steigerung des Wirkungsgrads von 38 auf 65 % für möglich (Ullmann 2005:2).

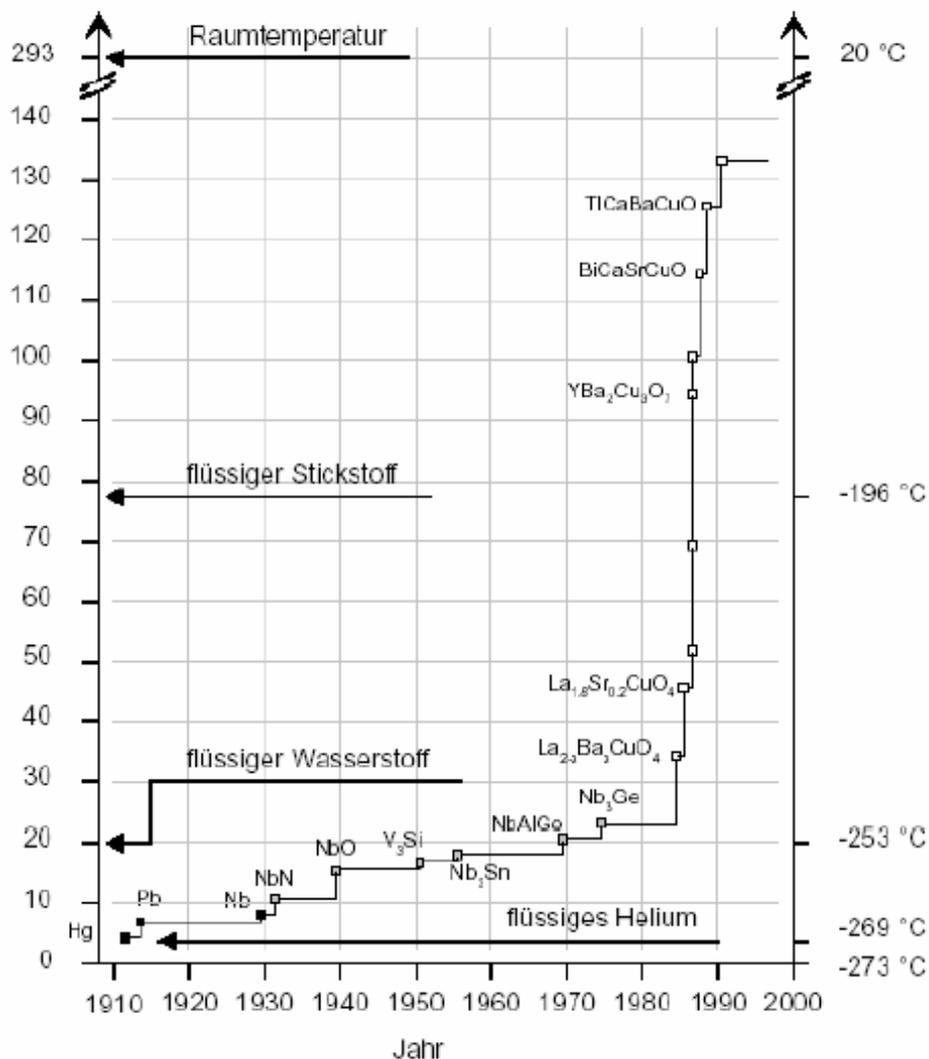
Die herausragende Leistungsfähigkeit von Superlegierungen wird auch künftig in neue Anwendungen vordringen und bestehende Anwendungen zum Standard werden lassen. Ihre Werkstoffentwicklung ist noch keineswegs abgeschlossen. Vom Vordringen von Superlegierungen gehen insbesondere Nachfrageimpulse für Nickel, Chrom, Kobalt und Titan aus.

4.31 Hochtemperatursupraleiter in der Elektrizitätswirtschaft

4.31.1 Technologiebeschreibung

Die Elektrizitätsverluste in den entwickelten Ländern 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. Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung der Sprungtemperatur T_K von Supraleitern:

Abbildung 4-64: Entwicklung der Sprungtemperatur von Supraleitern



Quelle: Kathke 1999

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 nicht sprunghaft, sondern graduell über hybride Zustände in einen supraleitenden Zustand über⁶⁰. 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)⁶¹. Folgende Hauptklassen von HTS können unterschieden werden (Mulholland et al. 2001):

- ▶ Die BSCCO – Bismut-Strontium-Calzium-Kupfer-Oxide werden auch Hochtemperatursupraleiter der 1. Generation genannt ($T_K = \text{ca. } 110 \text{ K}$). Die Drahtherstellung ist inzwischen ein reifes, kommerziell eingesetztes Verfahren.
- ▶ Die YBCO – Yttrium-Barium-Kupfer-Oxide werden als Hochtemperatursupraleiter der 2. Generation bezeichnet ($T_K = \text{ca. } 93 \text{ K}$). Sie haben inhärent geringere Kosten und potenziell Vorteile hinsichtlich der Leistungsfähigkeit. Ihre Kommerzialisierung wird in vier bis fünf Jahren erwartet.

Weitere, noch nicht im großen Maßstab kommerzialisierbare HTS sind:

- ▶ Mit TBCCO – Thallium-Barium-Calzium-Kupfer-Oxide wurden erstmalig Sprungtemperaturen über 120 K erreicht ($T_K = \text{ca. } 125 \text{ K}$).
- ▶ Den Rekord für die Sprungtemperatur halten MBCCO – Quecksilber- Barium-Calzium-Kupfer-Oxide. Der HTS mit der höchsten Sprungtemperatur bei Normalbedingungen hat heute einen Wert von 138 K: $(\text{Hg}_{0.8}\text{Tl}_{0.2})\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8-33}$ ⁶².

⁶⁰ 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 $\text{Na}_{0.05}\text{WO}_3$ mit einer Sprungtemperatur von 91 K.

⁶¹ Die Supraleitung der Perovskite ist erst möglich, wenn die Ordnung im Kristallgitter durch Dotierung unterbrochen wird.

⁶² Für $(\text{Sn}_{1.0}\text{Pb}_{0.5}\text{In}_{0.5})\text{Ba}_4\text{Tm}_5\text{Cu}_7\text{O}_{20+}$ mit einer Sprungtemperatur von ca. 185 K ist ein Patent angemeldet.

Technische Anforderungen an HTS sind insbesondere kritische Temperaturen über 77 K, hohe magnetische Stromdichte, hohes kritisches Magnetfeld, einfache Herstellung und gute mechanische Eigenschaften. Darüber hinaus stellen sich Fragen nach der Toxizität und der Rohstoffverfügbarkeit.

HTS haben vier Haupteinsatzgebiete in der Energiewirtschaft: Kabel⁶³, Motoren⁶⁴, Generatoren und Transformatoren. In der Energiewirtschaft werden sie heute auch für Kurzschlussstrombegrenzer, in Zukunft vielleicht auch für spezielle elektromagnetische Energiespeicher (SMES) wie Schwungräder eingesetzt.

Darüber hinaus haben HTS folgende Einsatzgebiete: Magnetschwebbahntechnologie⁶⁵, Mobilfunkfilter für das Hochfrequenzband, Magnetic Resonance Imaging (MRI) in der medizinischen Diagnostik und supraleitende Quanteninterferometer (SQUIDs), u. a. für Magnetoencephalographie oder Werkstoffprüfung, Lagersysteme, Hochenergiepartikelbeschleuniger⁶⁶ und Supraleitende Mikrochips in Petaflop-Computern.

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.

4.31.2 Rohstoffinhalt

Die aus heutiger Sicht relevantesten Hochtemperatursupraleiter haben folgende Summenformeln (Knupfer 2006):

- ▶ BSCCO: $\text{Bi}_m\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+m+2}$ $m = 2, n = 3$
- ▶ YBCO: $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ $x = 0,8 - 1,0$
- ▶ TBCCO: $\text{Tl}_m\text{Ba}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+m+2}$ $m = 2, n = 3$
- ▶ MBCCO: $\text{HgBa}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+2}$ $n = 3$

HTS-Drähte der 1. Generation basieren auf BSCCO Material, das im Oxide Powder-in-Tube Verfahren in eine Matrix aus Silberlegierung eingefügt wird. Diese HTS-Drähte sind standardmäßig 4,1 mm breit und 210 µm dick. Durch Extrudierung werden Längen

⁶³ Referenzen: Umformstation Detroit 2001, Furukawa Electric (Teststand Yokusuka, Japan).

⁶⁴ Referenz: American Superconductor.

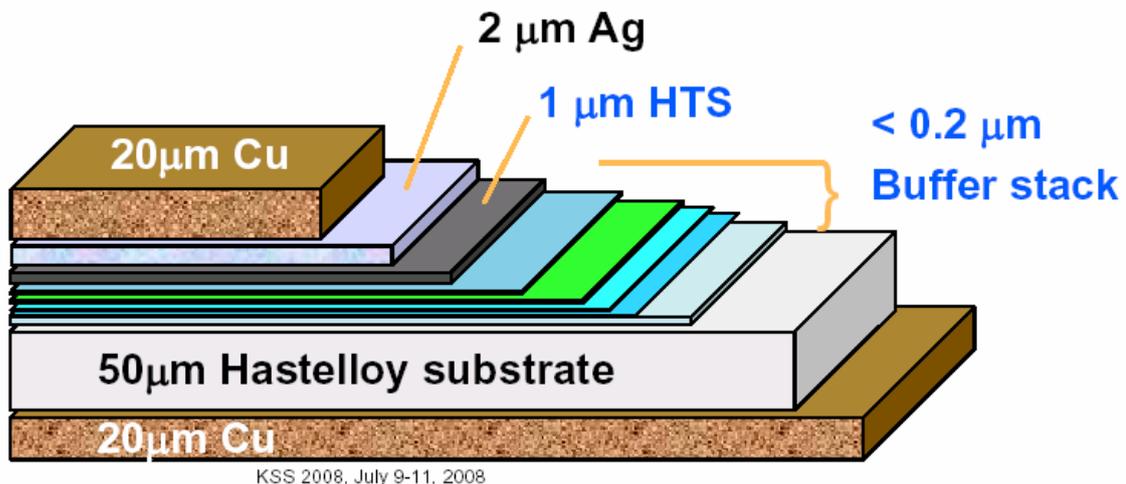
⁶⁵ Referenz: MAGLEV, Japan.

⁶⁶ Referenzen: CERN, DESY u. a..

bis zu 1 km erreicht. Die American Superconductor Corporation (AMSC) und Sumimoto (Japan) sind die führenden Hersteller.

HTS-Drähte und -Bänder der 2. Generation (vgl. Abbildung 4-65) 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. Als Puffermaterial dienen Yttriumstabilisiertes Zirkon (YSZ), $Gd_2Zr_2O_7$ (GZO) oder MgO ⁶⁷. Die eigentliche HTS-Schicht aus YBCO wird in 1 – 5 μm Dicke mit einem Höchstmaß an gleichförmiger Ausrichtung abgeschieden (Dichte 6 g/cm^3)⁶⁸. Bislang gelingen nur Längen von mehreren Zentimetern bis etwa 1 m. HTS-Drähte der 2. Generation werden von American Superconductors, Trithor und ASE hergestellt (Manzel & Himmerich, 2004).

Abbildung 4-65: Aufbau von HTS-Drähten der 2. Generation



Quelle: Yi-Yuan Xie et al. 2008

Die HTS-Drähte werden je nach Anwendung auf verschiedene Weise zu Kabeln oder Spulen gewickelt (ORNL 2007):

- ▶ Ein 1000 PS Elektromotor enthält ein BSCCO Band, das um die Wicklungen gewunden ist. Das Band ist 4,1 mm breit und 0,31 mm dick. Für einen 200 PS Elektromotor betragen die Maße 3 mm Breite und 0,22 mm Dicke.

⁶⁷ Die Herstellung der Templates aus Substrat und Puffer erfolgt mittels Ion-Beam Assisted Deposition (IBAD), Rolling-Assisted Biaxially Textured Substrates (RABiTS™) oder Inclined-Substrate deposition (ISD).

⁶⁸ Dies erfolgt mittels Trifluoroacetat-basierter metallorganischer Deposition (MOD), metallorganischer chemischer Deposition (MOCVD) oder hoch-gepulster Laserabscheidung (PLD).

- ▶ Ein triaxiales HTS Kabeldesign besteht aus drei Schichten HTS-Material. Die Bewehrung erfolgt mit Kupfer. Die HTS-Menge kann theoretisch noch halbiert werden.

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.

Für die USA werden spezifische Materialbedarfe für Hochtemperatursupraleiter berichtet, die sich vermutlich ausschließlich auf HTS der 1. Generation beziehen (vgl. Foresight Rohstoffbedarf). Belastbare quantitative Informationen zum Rohstoffgehalt von HTS pro Meter Draht liegen bislang nicht vor.

4.31.3 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:

Tabelle 4-88: 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

Quelle: Knupfer 2006

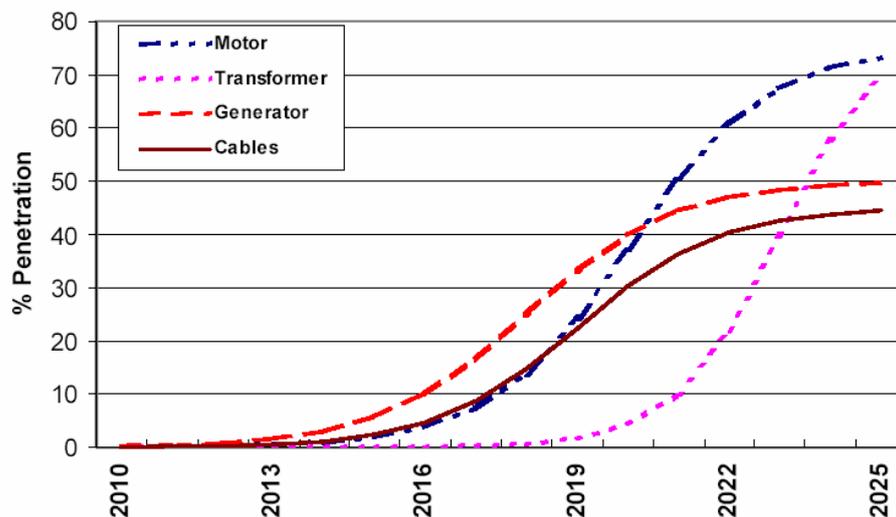
Das Conectus Konsortium hat Prognosen für die Marktentwicklung von Supraleitern vorgenommen. Im Jahr 2004 war der Gesamtmarkt für LTS etwa 3,6 Milliarden US\$ groß, für HTS 0,04 Milliarden US\$. Wächst der Markt für LTS bis 2013 nur noch langsam, so steigt er für HTS exponentiell an. Neuen Großanwendungen auf Basis von HTS wird das größte Wachstum bescheinigt, so dass der Markt für HTS 2013 bereits 500 Millionen US\$ betragen soll. Das dominierende Marktsegment für Supraleiter soll nach 2020 der Energiesektor sein (Conectus 2007).

Für die USA liegt eine Studie zum zukünftigen Marktpotenzial für Hochtemperatursupraleiter von 2000 bis 2025 vor (Mulholland et al. 2001). Sie analysiert die wichtigsten Stromverbraucher in den USA:

- ▶ Elektromotoren mit mehr als 500 PS Leistung⁶⁹,
- ▶ Generatoren mit mehr als 100 MVA,
- ▶ Transformatoren mit mehr als 20 MVA und
- ▶ Übertragungskabel für mittlere Spannungen.

Das Marktvolumen für HTS wird alleine für die USA in diesen vier Segmenten auf 1,8 Mrd. US\$ im Jahre 2025 geschätzt⁷⁰.

Abbildung 4-66: Marktdiffusionskurven für vier HTS-Teilmärkte in den USA bis 2025



Quelle:

Mulholland et al. 2001

Hauptthemnisse für die Marktdurchdringung in den USA sind die Herstellungskosten für HTS-Draht und die Kosten für Tieftemperaturkühlung.

- ▶ Der Preis für HTS-Draht der 1. Generation ist über einen längeren Zeitraum hinweg um 20 – 30 % pro Jahr gesunken. Heute kosten diese Drähte 100 – 200 US\$ pro kAm⁷¹. Die Kosten sollen in Zukunft auf 50 US\$ pro kAm sinken. Es be-

⁶⁹ entsprechend ca. 368 kW.

⁷⁰ Die Annahmen für die Modellrechnungen sind der Studie direkt zu entnehmen.

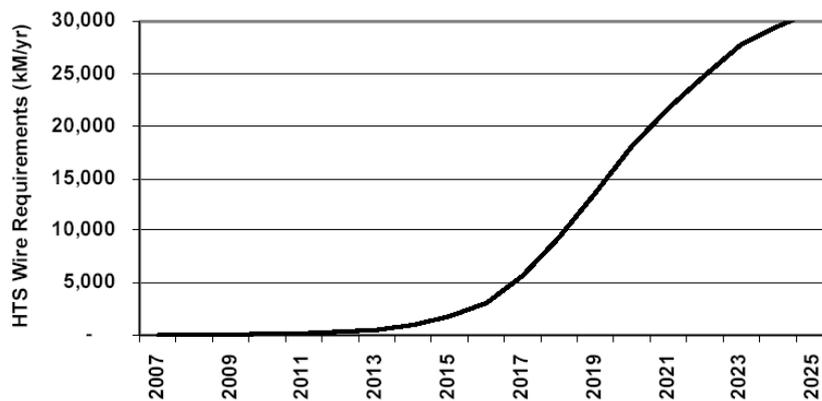
⁷¹ 1 kAm entspricht einem Meter Draht, der 1.000 Ampere Strom übertragen kann.

darf noch beträchtlicher weiterer Forschungsanstrengungen um Draht der 2. Generation mit einer wettbewerbsfähigen Stromtragfähigkeit herzustellen. Die Kosten sollen bis 2020 auf unter 20 US\$ pro kAm sinken.⁷² Zum Vergleich: Kupferdraht brachte es 2004 auf 25 US\$ pro kAm (Parks et al. 2005).

- ▶ Aufgrund des hohen Kühlungsbedarfs werden HTS zunächst meist in begrenzten Arealen mit guten Isolierungsmöglichkeiten, wie z. B. Großgeneratoren, eingesetzt. Längere Stromkabel werden in absehbarer Zeit die Ausnahme sein.

Insgesamt werden für die oben abgebildete Marktdurchdringung folgende Mengen an HTS-Draht benötigt:

Abbildung 4-67: Zukünftiger HTS-Drahtbedarf in den USA bis 2025 in km per anno



Quelle: Mulholland et al. 2001

Es ergibt sich ein starker Anstieg des HTS-Drahtbedarfs in den USA für die vier Teilmärkte bis auf über 30.000 km im Jahr 2030 mit sich sättigender Tendenz. Die veröffentlichten Daten in Mulholland et al. (2001) sind aber nicht geeignet, um die Teilmärkte HTS für Kabel, Transformatoren, Motoren und Generatoren zu differenzieren.

Folgende Parameter haben wir in den Projektionen bis 2030 variiert:

- ▶ Projektion A: Der gesamte HTS-Drahtbedarf wird durch BSCCO gedeckt. Die Abmessungen betragen 3,5 mm Breite und 300 µm Dicke.
- ▶ Projektion B: Der Drahtbedarf wird zu jeweils einem Viertel durch BSCCO, YCBO, TBCCO und MBCCO gedeckt.

⁷² Für die Produktionskosten wird – in Analogie zur Glasfaserkabelherstellung - eine Degression mit zunehmender Massenfertigung angenommen.

Die Prognose des HTS-Drahtbedarfs in den USA in Höhe von 30.000 km HTS bis 2025 ist schon etwas älter, das US-Stromnetz bedarf einer Modernisierung und die ambitionierte US-Förderung hat an Fahrt verloren, weshalb die getroffenen Annahmen insgesamt als eher optimistisch anzusehen sind.

Betrachtet man jedoch den globalen Maßstab, so liegt das Potenzial bis 2025 mindestens um das Doppelte bis das Zehn-Fache darüber. Eine einfache Hochrechnung mit dem Anteil der USA am Weltbruttosozialprodukt ist nicht realistisch, da die Stromerzeugungs- und -übertragungssysteme starke länderspezifische Gegebenheiten haben.

Trägt man dem Zeitraum bis 2030 Rechnung, so ist mindestens mit einer weiteren Verdopplung der beiden Werte zu rechnen. Es ergibt sich also in den beiden Projektionen eine Bandbreite von 120.000 km bis 600.000 km für den weltweiten HTS-Drahtbedarf im Jahr 2030. Am wahrscheinlichsten ist aus heutiger Sicht der Mittelwert beim HTS-Drahtbedarf und eine Diversifizierung der Materialien.

4.31.4 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).

Tabelle 4-89: Projektion des globalen Rohstoffverbrauchs für die Herstellung von Hochtemperatursupraleitern für Motoren, Generatoren, Transformatoren und Kabel in t

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvor-schau 2030 A	Bedarfsvor-schau 2030 B
Bismut	5.700	-	925	231
Strontium	585.000	-	388	97,0
Calcium	k. A.	-	177	137
Yttrium	7.008	-	0	75,4
Barium	7.960.000	-	0	552
Thallium	10	-	0	208
Quecksilber	1.480	-	0	130
Kupfer	15.100.000	-	2270	2270

Quelle und Anmerkungen: eigene Berechnungen; Barium als Barit; Zu Calcium-Metall liegen keine Produktionszahlen vor; Weltproduktion an Yttrium als Elementgehalt der Produktionsmenge des Oxids

Die Wismutproduktion lag 2007 bei 5.700 t. Bleiben HTS der 1. Generation auf BSCCO-Basis der dominierende Werkstoff bis 2030, so wird eine erhebliche Nachfrage

nach Wismut ausgelöst. Treten andere HTS auf den Markt, wird der Wismutmarkt merklich entlastet.

Die Yttrium Weltproduktion lag 2007 bei 7.000 t. Sollten die HTS-Märkte dynamisch wachsen und YBCO (Die 2. Generation) nennenswerte Marktanteile erringen, so sind durch die geschätzten zusätzlichen ca. 75 t keine gravierenden Nachfrageeffekte auf die Yttriummärkte zu erwarten.

Die heutige Thallium-Weltproduktion von rund 10 t pro Jahr ist nicht in der Lage, den Bedarf für HTS auf TBCCO-Basis in Projektion B zu decken (208 t). Selbst wenn das HTS-Wachstum vergleichsweise moderat und der TBCCO-Anteil gering sein sollte, wären signifikante Nachfrageeffekte im Hinblick auf Thallium zu erwarten.

Bei 1.480 t Quecksilber Weltproduktion würden die über 130 t zusätzliche Nachfrage durch HBCCO einen merklichen Nachfrageeffekt auslösen, insbesondere bei dynamischem Wachstum und hohen MBCCO-Marktanteilen.

Die Nachfrageeffekte für die Erdalkalimetalle Calcium, Strontium und Barium sind ebenso vernachlässigbar, ebenso wie die für Kupfer.

Zwar eignen sich HTS-Drähte grundsätzlich für das Recycling, die hohen Qualitätsanforderungen und die umgebenden, anderen wertgebenden Metalle sowie der Zeitverzug lassen im Zeitraum bis 2030 keine nennenswerten Beiträge von HTS-Drahtrecycling zur Deckung der Rohstoffnachfrage erwarten.

Die zukünftige Aufteilung in BSCCO, YBCO, TBCCO und MBCCO ist sehr unsicher. Dominiert 2030 nur ein Typ, so verschieben sich die Probleme erheblich. Die fieberhafte Forschung lässt bis 2030 auch andere Kandidaten möglich erscheinen, darunter ggf. auch MgB_2 , das allerdings kein HTS im eigentlichen Sinne und sehr spröde ist. 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 weit unterschätzt worden sein.

4.32 Hochleistungs-Permanentmagnete

4.32.1 Technologiebeschreibung

Permanentmagnete zeichnen sich dadurch aus, dass sie im Laufe der Zeit nicht oder nur unwesentlich entmagnetisiert werden. Hochleistungs-Permanentmagnete können bis zum 2000-fachen ihres Eigengewichtes heben. Permanentmagnete basieren auf Hartferriten, Seltenen Erden Magneten oder Aluminium-Nickel-Cobalt (Alnico) – Legierungen. Die stärksten Permanentmagnete beruhen auf einer Neodym-Eisen-Bor-Verbindung. Nd-Fe-B-Magneten werden in einer Fülle von Bauformen angefertigt und meist in komplexere Systeme integriert:

Abbildung 4-68: Beispiele für Bauformen von Nd-Fe-B-Magneten



Quelle: ChenYang-Technologies 2008

Hochleistungs-Permanentmagnete werden schon heute massenhaft in Windkraftturbinen, elektrischen Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge und miniaturisierten Komponenten der Informations- und Kommunikationstechnik (z. B. im iPod) eingesetzt. Die anisotropen Nd-Fe-B Magnete haben mit $200 - 420 \text{ kJ/m}^3$ sehr hohe Energiedichten (Rodewald et al 2002)⁷³. Diese Eigenschaft ermöglicht die Entwicklung innovativer Technologien:

- ▶ Mikro-Motoren mit 1,9 mm Durchmesser bei einer Leistung von 60 mW,

⁷³ Diesen Spitzenwert erreichen die kommerziell erhältlichen Nd-Fe-B Magnete unter der Bezeichnung VACODYM 722[®] der Fa. VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG in Hanau unter Lizenz von Sumitomo Special Metals Corp.

- ▶ Große Motoren mit bis zu 3 m Durchmesser bei einer Leistung von 5 MW, z. B. für Schiffsantriebe,
- ▶ Positioniersysteme für Schreib- und Leseköpfe in Festplatten von Computern,
- ▶ Magnetsysteme für MRI Tomographen und
- ▶ Magnetsysteme für Spektrometer.

Wichtige Innovationsstrategien sind die weitere Erhöhung der maximalen Energiedichte, die Verringerung der Entmagnetisierung und die fertigungstechnische Reduzierung der Produktionskosten.

4.32.2 Rohstoffinhalt

Die typischen Abmessungen eines Magnetformteiles hängen von der Form ab (Quader, Ellipsoid, Schale, Niere, ...). Bei Quadern sind dicke Magnete (heute bis zu 35 mm) am wirtschaftlichsten, wobei die Grundfläche auf weniger als 5.500 mm^2 begrenzt ist (Rodewald et al 2002). Einzelne, kommerziell angebotene Neodym-Magnete weisen folgende Spezifikationen auf:

- ▶ Ein GIGANT Neodym Magnet mit den Abmessungen $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 20\text{mm}$ hebt 80 kg und ist für 30 € zu erwerben (Yatego 2008).
- ▶ Ein frei erhältliches Modell für Tüftler und Künstler ($50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 25\text{mm}$) hebt bei einem Eigengewicht von 350 g bis zu 400 kg (crazy magnet 2008).
- ▶ Ein Neodym-Magnet für Windkraftturbinen Grade N42 hat die Abmessungen $2'' \times 1'' \times 0,5''$ mit einer Ni-Cu-Ni-Beschichtung (Ningbo Tongchuang 2008).

Neben dem Grundmaterial $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ kommen Zusätze zur Erhöhung der Temperaturbeständigkeit, der Korrosionsfestigkeit sowie Oberflächenbeschichtungen zum Einsatz.

Zur Verbesserung der Temperaturbeständigkeit wird Nd teilweise durch Dysprosium ersetzt ($(\text{Nd,Dy})_2\text{Fe}_{14}\text{B}$), so dass die Dauereinsatztemperatur zwischen 100 und 200 °C liegen kann.⁷⁴ Zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit⁷⁵ werden gleichzeitig Co und Cu zugesintert. Als Beschichtungen kommen typischerweise galvanische Zinn-

⁷⁴ Gesinterte Hartferrite und SmCo_5 können bis zu 250 °C, gegossene Alnico-Werkstoffe bis zu 450 °C und die neu entwickelten $\text{Sm}_2(\text{Co,Cu,Fe,Zr})_{17}$ sogar bis zu 550 °C eingesetzt werden (Rodewald et al. 2002).

⁷⁵ In feucht-warmer Umgebung oxidieren die Nd-reichen Gefügebestandteile zu Nd-Hydroxid unter Freisetzung von Wasserstoff, der wiederum Nd-Metallhydrid bildet und damit Kornlagen vom Magneten ablöst.

und/oder Nickelüberzüge, Elektro-Tauchlacke oder Aluminiumsprühlackierungen bzw. Chromatierungen zum Einsatz (Rodewald et al 2002).

Laut Sicherheitsdatenblatt (91/155 EWG) haben Neodym-Eisen-Bor-Magnete eine Dichte von etwa $7,5 \text{ g/cm}^3$. Der Molmassenanteil von Neodym beträgt 26,7 %, von Bor 1,0 % und von Eisen 72,3 %.

4.32.3 Foresight industrielle Nutzung

Insgesamt wurden im Jahr 2000 rund 5,5 Mio. t Magnetwerkstoffe mit einem Umsatz von 11 Mrd. US\$ hergestellt (Rodewald et al 2002). Der Markt teilt sich wie folgt auf:

- ▶ Die gesamte Produktionsmenge wird mit 88 % durch kristalline weichmagnetische Werkstoffe dominiert.
- ▶ Knapp 10 % der Produktionsmenge entfallen auf Dauermagnetwerkstoffe ("Permanentmagnete").
- ▶ Die restlichen gut 2 % decken weichmagnetische Pulverkerne ab.

Hinsichtlich der Umsätze ergibt sich folgendes Bild: Auf weichmagnetische Werkstoffe entfallen nur 40 %, auf Hartferrite 22,9 % und auf Seltene Erden Magnete schon über 20 % des Umsatzes mit wachsender Tendenz (Rodewald et al 2002).

Wurden 1990 in Japan rund 800 t Nd-Fe-B Magnete, in der EU, den USA und in China nur je rund 20 – 40 t, produziert, so sind im Jahr 2000 in Japan und China jeweils rund 6.500 t und in der EU und den USA jeweils etwa 1.000 t Nd-Fe-B Magnete hergestellt worden (Luo 2000).

Weder für 2006, noch für die Zukunft sind Marktdaten bekannt. Aus den enormen Wachstumsraten zwischen 1990 und 2000 (von 900 t auf etwa 15.000 t) lassen sich in Anbetracht der starken Verwendung in Zukunftstechnologien bis 2030 – wenn auch geringere – Wachstumsraten plausibel begründen. Der Markt für Nd-Fe-B-Magnete ist insgesamt relativ klein, bei 5,5 Mio. t Magnetwerkstoffen, davon knapp 550.000 t Permanentmagnetwerkstoffen.

Geht man von der vereinfachten Annahme einer Produktion von Nd-Fe-B-Magneten in Höhe von 15.000 t im Jahre 2006 aus, so lassen sich in einer moderaten Projektion mit rund 7,5 % jährlichem Wachstum bis 2015 und 5 %/a Wachstum bis 2030 die zukünftigen Produktionsmengen abschätzen. In einer dynamischen Projektion beträgt die jährliche Wachstumsrate bis 2015 rund 10 % und danach 7,5 %/a. Letztere wird für wahrscheinlicher gehalten, da Elektromotoren weltweit verstärkt nachgefragt werden (s. Technologie-Synopse Elektromotoren für Hybridfahrzeuge).

4.32.4 Foresight Rohstoffbedarf

Legt man die gesamte Produktion von Nd-Fe-B-Magneten in Verbindung mit den Molmassenanteilen der einzelnen Elemente (ohne weitere funktionale Zusätze) zugrunde, so erhält man folgende Bedarfsvorschau für die beiden Projektionen⁷⁶:

Tabelle 4-90: Projektion des globalen Rohstoffverbrauchs für die Herstellung von Hochleistungspermanentmagneten in t

Rohstoff	Weltproduktion 2006	Verbrauch 2006	Bedarfsvorschau 2030
Neodym	7.300	4.000	16.000 – 27.900
Eisen	1.170.000.000	10.800	43.200 – 75.700
Bor	1.320.000	150	600 – 1.050

Die Projektionen zeigen, dass vom Neodym-Verbrauch für Hochleistungs-Permanentmagnete in Zukunft erhebliche Nachfrageimpulse auf die Weltproduktion von Neodym ausgehen werden. Die Weltproduktion von 2006 ist geschätzt; allerdings scheint schon heute ein Großteil der Neodymproduktion durch die Magnetwerkstoffindustrie abgenommen zu werden⁷⁷. Dagegen sind weder die induzierten Nachfrageeffekte nach Eisen, noch nach Bor signifikant.

Es ist derzeit kein stärkerer Magnetwerkstoff als Nd-Fe-B in Aussicht. Er hat damit die Samarium-basierten Magnetwerkstoffe zurückgedrängt. Es davon auszugehen, dass die Werkstoffe als Bestandteil von Elektromotoren zu hohen Anteilen in das Kupfer-Recycling oder nach Zerlegung in das Stahlrecycling gelangen – allerdings ohne das Neodym in metallischem Zustand zurückzugewinnen.

Die große Heterogenität an Bauformen und die fehlenden globalen Marktstudien schmälern die Aussagekraft der Abschätzung. Deshalb ist auch nicht differenzierbar, welcher Anteil an Nd-Fe-B-Magneten auf welche innovativen Technologien entfällt. Wie

⁷⁶ Der Neodym-Bedarf für elektrische Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge (vgl. Kapitel 4.2) ist ein wichtiges zukünftiges Anwendungsfeld für Nd-Fe-B-Magnete und in der Abschätzung in Tabelle 4-90 bereits enthalten.

⁷⁷ Die Angaben zum Neodymbedarf für Permanentmagnete unterscheiden sich in der Fachliteratur erheblich. Naumov (2008) gibt den Markt für Permanentmagnete im Jahr 2005 mit nur 40 t/a an. BCC Research (2006) gibt den Bedarf an Seltenen Erden Oxiden für Permanentmagnete im Jahr 2005 mit 17.150 t an, wovon auf Neodym der größte Anteil – allerdings nicht plausibel beziffert - entfällt. Sowohl nach Rodewald et al. (2002), als auch nach BCC Research (2006) werden nur metallische Legierungen bei der Produktion von Nd-Fe-B-Permanentmagnet-Werkstoffen eingesetzt. Vor diesem Hintergrund scheint die Schätzung eines Neodym-Metallbedarf von 4.000 t im Jahr 2006 am realistischsten. Die Märkte für Permanentmagnete entwickeln sich allerdings ausgesprochen dynamisch, so dass die vorgenommene Abschätzung rasch überholt sein kann.

in der Technologie-Synopse Elektromotoren für Hybridfahrzeuge untersucht, liegt die Abschätzung dennoch in einer realistischen Größenordnung.

5 Rohstoffsynopsen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Analysen der im Projektportfolio enthaltenen Rohstoffe dokumentiert. Gegenstand der Analysen waren die spezifischen Rohstoffeigenschaften, ihr Vorkommen und ihre Verwendungen, ihre Bedeutung für Zukunftstechnologien und die davon ausgehende Rohstoffnachfrage.

5.1 Kupfer

5.1.1 Eigenschaften

Kupfer oder lateinisch "cuprum" gehört mit einer Ordnungszahl 29 zu der ersten Nebengruppe der Übergangsmetalle der 3-d-Reihe (Cu, Ag, Au). Es ist vermutlich das älteste Metall, das Menschen genutzt haben.

Kupfer ist ein weiches und verformbares Metall. Mit seinem edlen Charakter wird es von Luft nicht korrodiert aufgrund der (sehr langsamen) Bildung einer schützenden Oxidschicht. Unter feuchten und sauren Bedingungen bildet es eine Patina aus Kupfer-salzen (Sulfate) aus. Nur oxidierende Säuren greifen es an. Kupfer in Reinform ist ein hellrotes, hartes und gut schmiedbares schweres Metall. Es lässt sich in vielerlei Formen verarbeiten (Bleche, Folien, Draht). Wichtige Eigenschaften sind seine elektrische und Wärmeleitfähigkeit, die nur von Silber übertroffen werden. Weiterhin kann es mit zahlreichen weiteren Metallen legiert werden, um Produkte mit spezifischen Eigenschaften herzustellen.

Kupfer kommt relativ häufig in der Erdkruste vor. Mit ca. 60 ppm ist es das 26-häufigste Element (Enghag 2004:139). Kupfer kommt vor allem als Sulfid (Kupferkies CuFeS_2 oder Kupferglanz Cu_2S) im geringeren Umfang als Oxid (Rotkupfererz / Cuprit Cu_2O) vor.

5.1.2 Vorkommen

Die Reserven an Kupfer werden von USGS auf ca. 490 Mio. t geschätzt, die Reservenbasis liegt bei ca. 940 Mio. t (USGS 2008). Durch zunehmende Prospektion und durch den hohen Preisanstieg sind die Reserven immer mehr ausgeweitet worden⁷⁸. In 1995 lagen sie noch bei etwas über 300 Mio. t. Ebenso stieg durch zunehmende Pros-

⁷⁸ Die Reserven sind der Teil der Reservenbasis, die unter den jeweiligen Bedingungen ökonomisch und technisch ausbeutbar sind. Die Reservebasis sind der Teil der Ressourcen. Mit steigendem Preis oder verbesserter Technologie können Ressourcen so zu Reserven werden.

pektion die Reservenbasis von 600 Mio. t bis auf ca. 940 Mio. t. Die größten Reserven hat Chile, dessen Anteil bei ca. 30 % der Weltreserven liegt. Die landgebundenen Ressourcen dürften bei über 3.000 Mio. t liegen, wobei noch schätzungsweise 700 Mio. t maritime Ressourcen hinzukommen können (USGS 2008).

Auf Basis des Kupferinhalts der derzeitigen Kupfererzproduktion liegt die statische Reichweite der Reserven bei knapp über 30 Jahren, die der Reservenbasis bei knapp über 60 Jahren. Große Mengen an Kupfer liegen aber vermutlich noch im nördlichen Kupfergürtel von Afrika, im Kongo und in Zaire. Aufgrund der kriegerischen Konflikte wird in dieser Region Bergbau nur im geringen Umfange getrieben.

Die statische Reichweite von Kupfer ist seit einigen Jahren unverändert bei ca. 30 Jahren. Bedingt durch den Preisanstieg sind die Reserven ausgeweitet worden, was aber durch zunehmenden Abbau kompensiert wurde. Die Ressourcen sind äußerst umfangreich.

Tabelle 5-1: Versorgungssituation bei Kupfer 2006

Reserven:	480 Mio. t
Ressourcen:	> 3.000 Mio. t (zusätzlich: 700 Mio. t maritim)
Statische Reservenreichweite:	31 Jahre
Statische Ressourcenreichweite:	> 190 Jahre
Wichtige Förderländer:	Chile (36 %), Peru (8 %), USA (8 %) sowie Australien, China und Russland (jeweils 5 bis 6 %)
Länderkonzentration der Reserven:	Herfindahlindex 0,14

Quellen: USGS 2008, USGS 2007 und eigene Berechnungen

5.1.3 Produktion

Die Kupfergewinnung beginnt mit dem Erzbergbau, bei dem sulfidisches oder oxidisches Erz zumeist im Tagebau gewonnen wird. Abbauwürdig sind inzwischen Vorhaben mit ca. 0,3 % im Tagebau. Die sulfidischen Erze des Bergbaus werden zunächst durch Flotation zu einem Kupferkonzentrat verarbeitet, welche durch Röst-, Schmelz- und Konverterverfahren über die Feuer-Raffination zunächst zu Anodenkupfer (Verhüttung) oder Kupferlegierungen verarbeitet wird. Das Anodenkupfer wiederum wird abschließend durch Raffinations-Elektrolyse zu Raffinade-Kupfer verarbeitet, welches das meist genutzte Kupferzwischenprodukt ist, aus dem vor allem Reinkupferprodukte (z. B. Kabel) hergestellt werden bzw. welches zur Herstellung von Legierungen (z. B. Messing) dient. Hierbei wird vor allem mit einem Elektrolyseverfahren und nur selten mit der Feuerraffination gearbeitet.

Die Weltjahresproduktion an Kupfererz betrug im Jahre 2007 ca. 15,6 Mio. t Kupferinhalt (USGS 2008). Seit 1995 ist die Erzproduktion um ca. 65 % gewachsen. Der größte Produzent von Kupfererzen ist seit einiger Zeit Chile mit mehr als 5,7 Mio. t jährlicher Produktion (36,5 % der Weltjahresproduktion). Mit weitem Abstand folgen Peru (7,7 %) und die USA (7,6 %) mit ca. 1,2 Mio. t. sowie China (5,9 %, 920.000 t), Australien (5,5 %, 860.000 t), Indonesien (5 %, 780.000) und Russland (4,7 %, 730.000 t). Der Anteil dieser Länder an der Kupfererzproduktion beträgt fast 73 % der Weltjahresproduktion. In der letzten Dekade hat es aber auch bedeutende Änderungen gegeben. Argentinien hat seit 1995 seine Produktion mehr als verdoppelt. Auch Peru, Indonesien, Kasachstan (460.000) und Australien haben die Erzproduktion stark ausgeweitet. Argentinien und Laos haben den Kupfererzbergbau aufgenommen. Signifikant gesunken ist die Erzproduktion in den USA und Südafrika.

Tabelle 5-2: Weltweite Minenproduktion und Preisentwicklung von Kupfer

	2003	2004	2005	2006	2007
Globale Minenproduktion in Mio. t Kupferinhalt der Erze	13,6	14,6	14,9	15,1	15,6
Preis in €/kg Kupfermetall (Maximum)	n. v.	2,652	3,901	6,810	5,825

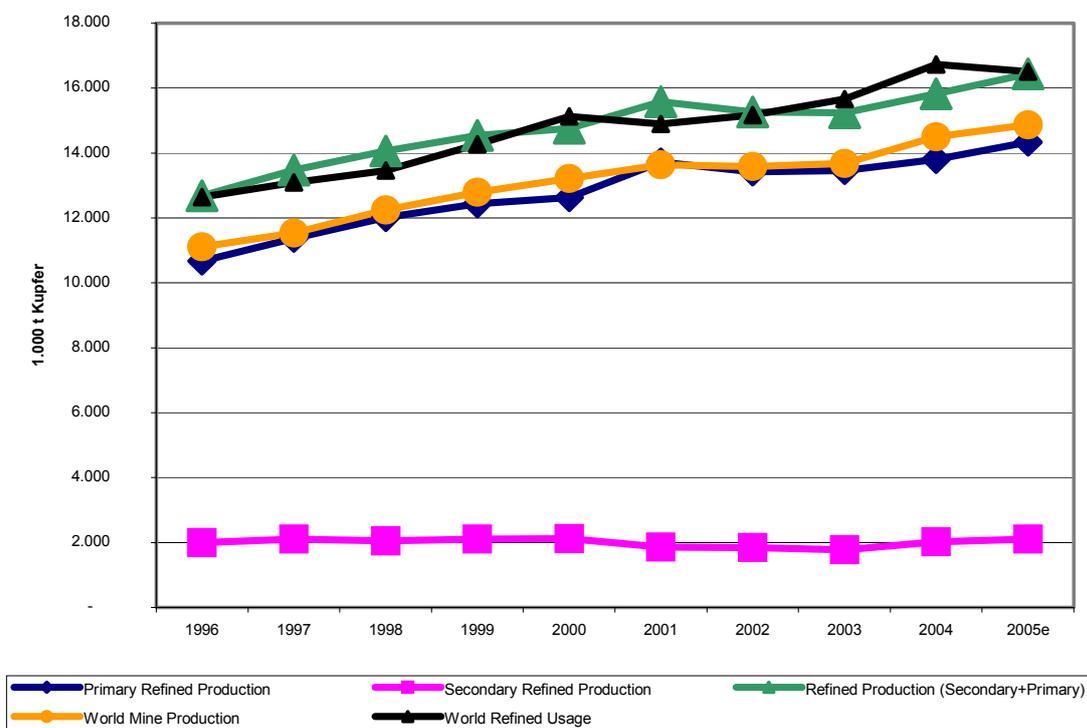
Quellen und Anmerkung: USGS 2008, USGS 2007, USGS 2006a, USGS 2005 und LME 2008. Der Preis bezieht sich auf den Handelspreis für Kupfer an der LME.

Der Preis für Kupfer wird über die Rohstoffbörsen ermittelt. Der wichtigste Handelsort ist die LME in London. In den letzten Jahren sind deutliche Preisanstiege bei Kupfer zu verzeichnen, was vor allem durch die Nachfrage nach Kupfer in China bedingt ist. Seit 2001 ist der Preis für Kupfermetall um ca. 150 % von knapp 2.000 €/t auf knapp 5.000 €/t in 2008 gestiegen.

Deutschland zählt mit zu den größeren Raffinadekupferproduzenten. Mangels eigener Vorkommen wird im größeren Umfang Kupfererz zur Raffinadeherstellung importiert. In 2005 betrug der Import ca. 1,15 Mio. t Kupfererze und –konzentrate (WVM 2006:3). Der größte Produzent von Raffinadekupfer ist die Norddeutsche Affinerie, weiterhin wird Kupfer auch bei MKM Mansfelder Kupfer und Messing GmbH hergestellt. Darüber hinaus gibt es noch weitere Werke, die Halbzeuge herstellen wie die Deutsche Gießdraht, KME-Europa Metal und die Wieland-Werke. Im Jahre 2005 wurden ca. 640.000 t Raffinadekupfer in Deutschland hergestellt. Beachtenswert ist der hohe Anteil an sekundären Vorstoffen in der deutschen Produktion mit ca. 62 %. Insgesamt betrug die Produktion von Halbzeugen aus Elektrolytkupfer, Legierungen und Sekundärkupfer in Deutschland ca. 1,6 Mio. t. Hiervon entfielen ca. 40 % auf Leitmaterial (v. a. Kabel). Die

folgende Tabelle stellt die Produktionsdaten für Raffinadekupfer, Legierungen und Halbzeuge dar:

Abbildung 5-1: Erzproduktion und Produktion von primären und sekundären Raffinadekupfer



Quelle: ISGS 2006

Tabelle 5-3: Produktion von Kupfer in Deutschland [1.000 t].

	1990	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Raffiniertes Kupfer	476	696	709	694	696	598	653	639
aus primären Vorstoffen	204	305	310	303	327	287	284	240
aus sekundären Vorstoffen	272	391	399	391	369	311	369	399
Kupfergusslegierungen	55	56	63	63	56	46	44	46
Halbzeuge inkl. Legierungen	1.319	1.704	1.908	1.734	1.619	1.657	1.723	1.603
davon Leitmaterial	528	679	757	681	645	685	679	655

Quelle: DKI o.J.

Das Recycling von Kupfer ist ein essenzieller Bestandteil für die Kupferproduktion weltweit, auch wenn der Anteil des Sekundärkupfers an der Gesamtkupferproduktion weltweit in 2005 nur bei 15 % lag bzw. 2,1 Mio. t umfasste (ICSG 2006). In Deutsch-

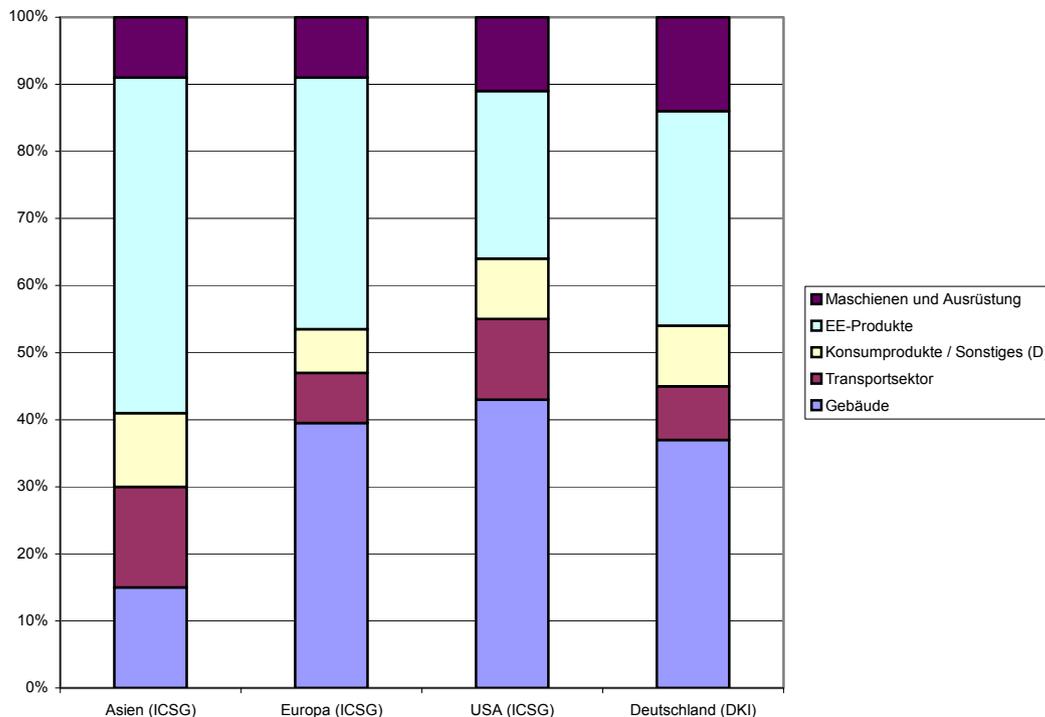
land ist das Kupferrecycling – aufgrund hoher Energiepreise einerseits und einer guten Wertstoffeffassung in Europa andererseits deutlich größer. So nutzt die Norddeutsche Affinerie ca. 40 % Sekundärmaterial für die Kupferproduktion (Norddeutsche Affinerie o.J.).

Sekundärmaterial wird in Deutschland auf allen Stufen von der Hütte bis zu den Halbzugherstellern verwendet. Beim Kupferrecycling und der Entsorgung werden aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung und Schrottqualitäten verschiedene Wege gegangen. Hierzu müssen zum einen Produktionsabfälle (Filterstäube, Schlacken, Krätzen, Elektrolyseschlämme sowie Reaktionsabfälle), Neu- (Stanz, Span- und Schneidabfälle) und Altschrotte unterschieden werden. Weiterhin muss zwischen Kupfer für Leitzwecke, Messing und andere Legierungen unterschieden werden. Die Tabelle 5-3 gibt einen Überblick über den Einsatz verschiedener Schrotte und Abfälle sowie der hieraus hergestellten Produkte in dem Recyclingprozess.

5.1.4 Verwendungen

Die Verwendung von Kupfer nach Einsatzbereichen ist weltweit sehr unterschiedlich. Generell lassen sich aber vier wesentliche Bereiche unterscheiden, die zumeist auch statistisch verwendet werden: Gebäude, Transport, elektrische und elektronische Produkte sowie Maschinen und Ausrüstung. Darüber hinaus werden dann unterschiedliche Kategorien gebildet wie Konsumprodukte (ICSG 2006) oder Sonstiges (DKI o.J.). Die global sehr stark unterschiedlichen Verwendungen ergeben sich durch unterschiedliche wirtschaftliche Orientierungen (z. B. starker Maschinenbau in Deutschland oder Produktion von Elektronikprodukten in Asien) sowie unterschiedliche Rahmenbedingungen im Bauwesen (z. B. hoher Elektrifizierungsgrad und mehrere Sanitärbereiche im Bauwesen in Europa und den USA). Die folgende Abbildung zeigt die typischen Anwendungsfelder in verschiedenen Regionen bzw. Ländern:

Abbildung 5-2: Anwendungsfelder von Kupfer nach Regionen und Ländern



Quelle: ICSG und DKI

Kupfer ist die Basis für alle elektrischen und elektronischen Zukunftstechnologien per se. Ohne Kupfer sind sowohl kleinste EE-Geräte als auch Fahrzeuge aller Art sowie auch großtechnische Anlagen wie Windenergieanlagen und Produktionsanlagen nicht realisierbar. In der Folge davon lassen sich einzelne Zukunftstechnologien nur sehr subjektiv herausgreifen wie die beiden folgenden Beispiele zeigen:

- ▶ Ein modernes Handy enthält ca. 15 % bzw. ca. 16 g Kupfer (Sullivan 2006) bzw. ca. 9 g Kupfer (Hagelüken 2005). Trotz dieser teilweise sehr geringen Mengen summieren sich diese in dem boomenden Markt und hohen Ausstattungsgraden zu großen Mengen. Allein für den geschätzten Bestand von 630 Millionen Handys in den USA liegt der Anteil des Kupfers bei ca. 10.000 t (Sullivan 2006). Hagelüken schätzt den Bestand an Kupfer in 1 Mrd. Handys auf ca. 9.000 t.
- ▶ Nach der Studie des IZT (Erdmann et al. 2004) wurden im Jahr 2000 in der deutschen Automobilproduktion in 5,1 Mio. produzierten Pkw und in 0,4 Mio. Nutzfahrzeugen ca. 155.000 t Kupfer eingesetzt. Damit gehen geschätzte 13,7 % des jährlichen nationalen Kupferverbrauchs in die Automobilproduktion. Der zunehmende Kupferverbrauch in der Automobilproduktion wird noch durch einen höhe-

ren Elektroanteil steigen. RWI/ISI/BGR (2007) rechnen mit einer Verdopplung der Kupfermenge auf 40 kg pro Fahrzeug in 2025.

Für eine Vielzahl von Kupferanwendungen sind prinzipiell Substitute möglich, auch wenn diese nicht immer die gleichen Materialeigenschaften aufweisen.

- ▶ Bei der Stromleitung mit Starkstromkabeln und der Stromleitung in elektrischen Bauteilen kann Kupfer häufig auch durch (Leit)Aluminium ausgetauscht werden.
- ▶ Bei Kühleinrichtungen wie Automobilkühler oder bei Kühl- und Gefrieranlagen können Kupferradiatoren gleichfalls aus Aluminium hergestellt werden. Bei PCs ist dies inzwischen Standard für die größeren Kühlkörper. Bei Wärmeaustauschern können diese auch durch Titan und Stahl hergestellt werden.
- ▶ Rohrleitungen im Wohnungsbereich werden heutzutage schon vielfach – insbesondere im Eigenbau und bei Fußbodenheizungen – durch Kunststoffleitungen substituiert.
- ▶ Besonders in der LuK-Technik können Kupfer(daten)leitungen durch Glasfasern ersetzt werden, da diese bessere Übertragungsraten ermöglichen.
- ▶ Für Armaturen – ein wichtiges Anwendungsfeld für Kupferlegierungen – liegen hingegen kaum alternative Materialien vor. Prinzipiell ist jedoch eine Substitution gegen Stähle möglich, die die gleichen Funktionalitäten erfüllen. Allerdings sind Stähle nur mit höherem Aufwand herstell- und bearbeitbar.

Generell gilt jedoch, dass Kupfer ein Massenmetall ist, welches vor allem aufgrund seiner elektrischen Leitfähigkeit kaum ersetzbar ist. Hierbei spielt das Kaltfließverhalten von Substituten wie z. B. Aluminium eine Rolle, welches unter Druck (Quetschverbindungen) kaum die Rolle des Kupfers in vielen Anwendungsfeldern ersetzt werden kann.

5.1.5 Kupferbedarf 2030

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind folgende zusätzliche Rohstoffbedarfe geschätzt worden:

Tabelle 5-4: Kupferbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2006	Bedarf 2030
Bleifreie Weichlote	950	1.700
Industrielle Elektromotoren	1.400.000	3.470.000
Elektrische Traktionsmotoren für Fahrzeuge ⁷⁹	9.000	213.000
RFID-Tags	50	9.100
Hochtemperatursupraleitung	0	2.270
Bedarfssumme	1.410.000	3.696.070
Bedarf / Rohstoffproduktion 2006	0,09	0,24

Das untersuchte Segment der Zukunftstechnologien deckt rund ein Zehntel des heutigen Kupferbedarfs ab. Diese Menge wird sich fast verdreifachen und damit bis auf 24 % der heutigen Kupferprimärproduktion anwachsen.

Das größte Mengenwachstum der untersuchten Zukunftstechnologien bis 2030 ist beim Einsatz von Kupfer in industriellen Elektromotoren zu erwarten, gefolgt vom Kupferbedarf für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben (Brennstoffzellen, Hybrid- und Elektroauto). Starkes Wachstum ist auch bei zahlreichen anderen Zukunftstechnologien zu erwarten. Ihre absoluten Beiträge zur Kupfernachfrage addieren sich zu nennenswerten, aber überschaubaren Mengen.

Die Verwendungsstruktur von Kupfer ist breit. Die meisten Zukunftstechnologien sind ohne Kupfer nicht denkbar. Die anderen Technologien werden ihre Position vermutlich mindestens 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 sehr hoch.

⁷⁹ Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeuge

5.2 Chrom

5.2.1 Eigenschaften

Chrom ist ein silberweißes, korrosionsbeständiges, gut verformbares und trotzdem hartes, paramagnetisches, hoch schmelzendes Metall von herausragender wirtschaftlicher Bedeutung. Sein Schmelzpunkt liegt bei 1907 °C. Es steht in der Häufigkeit der Elemente der Erdkruste an 21. Stelle und zählt nicht zu den seltenen Metallen. Metallisches Chrom und dreiwertige Chromverbindungen, darunter das in der Natur vorkommende Chromit sind gesundheitlich unbedenklich. Dies gilt nicht für die sechswertigen Chromverbindungen – Cr(VI). Von diesen sind die Chromate CrO_4^{2-} und Dichromate $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ von besonderer technischer Bedeutung. Sie sind starke Oxidationsmittel und werden beispielsweise im Korrosionsschutz und als Vorprodukte für zahlreiche Chromverbindungen genutzt werden. Cr(VI)-Verbindungen sind giftig, karzinogen und mutagen. Sie stehen unter intensiver Beobachtung und ihre Verwendung wird durch umwelt- und arbeitsrechtliche Bestimmungen reguliert. Aufgrund der Verwendungsbeschränkungen ist die Chromnachfrage in einigen Anwendungen rückläufig.

5.2.2 Vorkommen

Chromit, auch als Chromeisenstein bezeichnet, mit der chemischen Summenformel FeCr_2O_4 ist das einzige Chromerz von wirtschaftlicher Bedeutung. Chrom liegt in diesem Erz als dreiwertige Chromverbindung vor – Cr(III). Die Chromit Ressourcen werden vom USGS auf über 12 Mrd. t geschätzt, ausreichend für viele Jahrhunderte. Die großen Vorkommen sind allerdings stark konzentriert auf die beiden Länder Kasachstan und Südafrika. Die mit heute wirtschaftlichen Techniken abbaubaren Chromit Reserven übersteigen 500 Mio. t, die Chromit Reservenbasis beträgt über 800 Mio. t. Letztere enthält auch einige heute wirtschaftlich noch nicht erschließbare aber nachgewiesene Lagerstätten. Davon liegen etwa 70 % in den genannten beiden Ländern (USGS 2008). Eine genaue aktuelle Übersicht, die auch bedeutsame Lagerstätten in Zimbabwe, der Türkei, Russland, Finnland und anderen Ländern einschließt, fehlt. Der Herfindahlindex für die Konzentration der Reservenbasis lässt sich aus diesem Grund nicht genau bestimmen, liegt aber um etwa 0,3 und zeigt damit eine beträchtliche Konzentration an. Auf der anderen Seite weist das USGS in 2005 19 Chromit produzierende Länder aus. Die gelegentlich geäußerte Befürchtung, die Chromversorgung sei hoch vulnerabel, ist vor diesem Hintergrund unbegründet. Es gibt zahlreiche Lagerstätten, nur die mengenmäßig besonders ergiebigen sind stark konzentriert.

5.2.3 Produktion

2006 wurden weltweit 19,6 Mio. t Chromit produziert (USGS 2008:48), darin sind etwa 5,9 Mio. t Chrom enthalten (USGS 2005:17.13). Davon stammten 38 % aus Südafrika, 18 % aus Kasachstan und 18 % aus Indien. Von diesen drei Ländern werden also fast $\frac{3}{4}$ der globalen Nachfrage versorgt. Nachfrage und Produktion haben zwischen 2003 und 2006 um 26 % zugelegt. Das entspricht einer jährlichen Wachstumsrate von 8 % und liegt über dem Weltwirtschaftswachstum. Dies zeigt, dass vom technischen Wandel Impulse auf die Chromnachfrage ausgehen. Die hohe Nachfrage hat auf die Preise durchgeschlagen. Für 2007 schätzt das USGS den Chromitpreis auf 175 US \$/kg. Trifft dies zu, hat sich der Preis für Chromerz zwischen 2003 und 2007 mehr als verdreifacht.

Tabelle 5-5: Globale Chromitproduktion und Preisentwicklung (USGS 2008:48)

	2003	2004	2005	2006
Chromitproduktion der Minen in Mio. t	15,5	17,5	19,3	19,6
Preis in US \$/t Chromit	54,0	114,0	140,0	141,0

Tabelle 5-6 stellt die Produktion der mengenmäßig bedeutsamen Chromprodukte zusammen. Die Zahlen stammen aus USGS Angaben, welche die International Chromium Development Association (ICDA) als Quelle zitieren (USGS 2005:17.13). 2006 wurden weltweit insgesamt rund 9 Mio. t Chrom in metallischer Form abgesetzt.

Tabelle 5-6: Globale Produktion gehandelter Chromprodukte

	2003	2004	2005	2006
Chromitproduktion in Mio. t Chrom	4,63	5,34	5,81	5,90
Ferrochrom in Mio. t Chrom	3,46	3,75	3,74	3,96 ⁸⁰
Rostfreier Stahl in Mio.t Chrom	3,86	4,18	4,13	4,70 ⁸¹
Metallisches Chrom in Mio. t	n. v.	n. v.	n. v.	0,35 ⁸²

⁸⁰ Berechnet nach Angaben der ICDA und USGS (ICDA 2008:2; USGS 2005:17.14).

⁸¹ Berechnet aus BGR-Schätzung einer Produktionssteigerung um 14 % gegenüber 2005 (BGR 2007:59).

⁸² Nach Angaben der ICDA (ICDA 2008:4).

Tabelle 5-7: Richtwerte für den mittleren Chromgehalt gehandelter Chromprodukte (USGS 2005:17.14; ICDA 2008:4)

	Mittlerer Chromgehalt [%]
Chromit	30,0
Ferrochrom	57,0
Rostfreier Stahl	17,0
Chrommetall	99,0 – 99,8

Betrachtet man die verfügbaren Vorkommen in der Erdkruste, ist Chrom kein knapper Rohstoff. Bezogen auf die Produktion im Jahre 2006 reichen die Ressourcen für 600 Jahre. Die statische Reichweite der Reserven beträgt mindestens 25 Jahre und die der Reservenbasis mehr als 40 Jahre. Deutschland hat 2006 rund 460.000 t Ferrochrom importiert. Das sind etwa 12 % der Weltproduktion.

Tabelle 5-8: Versorgungssituation bei Chrom 2006

Reserven:	500 Mio. t Chromit
Ressourcen:	12.000 Mio. t Chromit
Statische Reservenreichweite:	25 Jahre
Statische Ressourcenreichweite:	600 Jahre
Wichtige Förderländer:	Kasachstan, Südafrika
Länderkonzentration der Reserven:	0,3 (Herfindahlindex)

5.2.4 Verwendungen

Nach USGS und ICDA werden über 93 % des weltweit gewonnenen Chromits zu Ferrolegierungen verarbeitet und dann in der Metallurgie eingesetzt (USGS 2005:17.3). Diese Zahl weicht von den in Tabelle 5-6 zusammengestellten Angaben ab, die aus derselben Quelle stammen. Solche Inkonsistenzen sind bei Statistiken leider kein Einzelfall. 90 % des zu Ferrolegierungen verarbeiteten Chroms gehen in die Herstellung von rostfreiem Stahl, der Rest wird für andere Stahlsorten, Superlegierungen, vorwiegend auf Nickelbasis, und Cermete benötigt (USGS 2005:17.3).

Rostfreier Stahl ist damit die mit großem Abstand mengenmäßig wichtigste Chromnutzung. Der Korrosionsschutz entsteht bei Chromanteilen über 12 %. Erst dann bildet sich eine dichte, harte und transparente Passivierungsschicht aus Chromoxid auf der Stahloberfläche aus. Chrom ist für rostfreie Stähle ein essenzieller Legierungsbestandteil, d. h. nicht substituierbar. Es werden rostfreie Stähle mit Chromanteilen von bis zu 30 % hergestellt. Der wahrscheinlich bekannteste Stahltyp, V2A, enthält 18 % Chrom.

"Rostfreier Stahl" wird als umgangssprachliches Synonym für rost- und säurebeständigen Stahl verwendet. Rostfreie Stähle sind jedoch nicht zwingend "Edelstähle". Kennzeichen der Edelstähle ist ihre Reinheit, sie müssen aber nicht rostfrei sein. Mit dem hohen Chromanteil zählt rostfreier Stahl sie zu den hochlegierten Stählen.

Das Legierungselement Chrom verleiht Stahl nicht nur einen äußerst wirksamen Korrosionsschutz, sondern erhöht die Festigkeit des Stahls und verbessert seine Warmfestigkeit und Zunderbeständigkeit. Hochwarmfeste Stähle mit 16 bis 18 % Chrom eignen sich für Arbeitstemperaturen bis 800 °C. Für noch höhere Temperaturen kommen so genannte Superlegierungen zum Einsatz. Auch für diese ist Chrom ein wichtiges Legierungselement (Dubbel 1983:290).

Bei Werkzeugstahl und Schnellarbeitsstahl (HSS) für die Span abhebende Metallbearbeitung kommt es auf die Werkstoffhärte an. Solche Stähle haben einen Chromanteil von etwa 4 %. Zur Erzielung der Werkstoffhärte werden beispielsweise Wolfram und Molybdän zulegiert, die Carbide mit hoher mechanischer und thermischer Stabilität ausbilden (Dubbel 1983:293). Große Härte und Warmfestigkeit besitzen auch Cermets. Das sind Verbundwerkstoffe aus Keramik und Metall, die pulvermetallurgisch hergestellt werden. Cermets von wirtschaftlicher Bedeutung enthalten Chromanteile von 25 – 77 % (Ullmann 2005:6). Hochwarmfeste Cermets können für Arbeitstemperaturen bis zu 1200 °C eingesetzt werden (Ullmann 2005:7).

Bei der Metallurgie der Herstellung von Stählen, Superlegierungen und Cermets wird als Chrom tragendes Vorprodukt Ferrochrom eingesetzt. Das sind Eisenlegierungen mit Chromanteilen von 45 – 95 % (Ullmann 2005:7). Ferrochrom wird in Elektrostahlöfen erschmolzen. Nur bei der Herstellung eisenfreier Superlegierungen wird metallisches Chrom genutzt.

Im Vergleich zur Chromnutzung in der Metallurgie sind die übrigen Anwendungen mengenmäßig von untergeordneter Bedeutung. Anwendungen, in denen sechswertige Chromverbindungen eingesetzt werden, sind aufgrund der human- und umwelthygienischen Risiken rückläufig. Darunter die Chromnutzung zur Ledergerbung, die Passivierung von Konversionsschichten auf Metallen, für Chromatpigmente, Feuerfestmaterial und Magnetbänder.

Tabelle 5-9: Verwendungen von Chrom (USGS 2005:17.3; ICDA 2008:3)

Verwendungssegment	Anteil [%]	Technologie- und Produktbeispiele
Rostfreie und warmfeste Stähle	84	Autoabgaskatalysatoren; Komponenten für Triebwerke, Turbinen, Motoren; Wärmetauscher; Kesselbleche; Rohrleitungen; Küchenfronten und Wandverkleidungen in der Lebensmittelverarbeitung; Gebäudefassaden
Superlegierungen, Cermets und andere Stähle	9	Brennkammern, Auslassdüsen, Schaufeln von Gasturbinen, Flugzeugturbinen, Strahltriebwerke, Kraftwerks-, Petrochemie- und Chemieanlagenkomponenten, Werkzeugstahl, Schnellarbeitsstahl (HSS), Gusseisen
Chemische Industrie	3	Ledergerbung, Passivierungsschichten auf Metalloberflächen, Verchromung von Metall- und Kunststoffoberflächen, Pigmente, Katalysatoren, Holzschutz, Videobänder
Gießereisande	3	Stahl- und Eisenguss, NEM-Guss, Leichtmetallguss
Feuerfestmaterialien	1	NEM-Metallurgie (Kupfer, Blei, Zink), Zementdrehrohöfen, Kalkbrennöfen, Glasmelzwannen, NEM-Industrie
Gesamt	100	

Das Recycling von Chrom ist wirtschaftlich interessant und chromhaltiger Stahl- und Eisenschrott ist gefragt. Dies gilt noch ausgeprägter für Superlegierungen, die allerdings mengenmäßig unbedeutend sind. Über das Chromrecycling nicht metallischer Produkte liegen keine Informationen vor. Zum Teil sind diese Verwendungen dissipativ, wie beispielsweise die Nutzungen von Chrom für Pigmente und den Holzschutz. Die Recyclingquote, also der Anteil des inländischen Chrombedarfs, der aus Schrotten stammt, wird von der BGR für Deutschland auf 15 – 20 % geschätzt (BGR 2007:58; BGR 2004:54). In den USA sollen nach USGS Angaben 2007 38 % des Chromverbrauchs aus sekundären Quellen stammen, 2006 seien es 25 %, 2005 29 % und 2004 28 % gewesen. Dabei werden von der USGS üblicherweise auch gehandelte Produktionsabfälle und nicht nur Chrom aus gebrauchten Produkten mitgezählt. Diese Angaben aus den USGS Minerals Commodity Summaries stimmen allerdings mit dem Zahlengerüst im Minerals Yearbook der gleichen Quelle nicht überein. Dort wird bei einem Chrom-Gesamtverbrauch in den USA von 951.000 t in 2005 der Sekundärchromeinsatz mit 124.000 t angegeben (USGS 2005:17.13). Daraus errechnet sich eine Recyclingquote von 13 %. Es wäre auch überraschend, wenn in den USA höhere Recyclingquoten erzielt würden als in Deutschland. Das inländische Schrottaufkommen bildet die einzige nationale Chromressource, weil in Deutschland keine natürlichen Chromlagerstätten vorhanden sind.

Zukunftstechnologien

Die Nutzung von Chrom für **korrosionsbeständige und hochwarmfeste Werkstoffe** ist ohne Zweifel für die zukünftige Entwicklung zahlreicher technischer Anwendungen von großer Bedeutung. Solche Nutzungen zielen darauf, die Arbeitstemperatur von thermodynamischen Prozessen anzuheben, um eine Verbesserung des thermodynamischen Wirkungsgrades zu erzielen. Das hat die gewünschte Verringerung des Brennstoff- oder Treibstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen zur Folge. Während das Entwicklungspotenzial bei den hochwarmfesten Stählen weitgehend ausgeschöpft scheint, werden bei Superlegierungen und insbesondere den Keramik-Metall-Verbänden (Cermets) noch Entwicklungsmöglichkeiten gesehen. Die Nachfrage nach hochwarmfesten Werkstoffen konzentriert sich besonders auf den Fahrzeugbau, die Luft- und Raumfahrt, die Kraftwerkstechnik und den chemischen Apparatebau, durchwegs Zukunftsbranchen mit überdurchschnittlichen Wachstumserwartungen.

Rostfreie Stähle haben in der Vergangenheit überdurchschnittliche Zuwachsraten erzielt. Ihre Produktion ist seit 1970 mit einer jährlichen Rate von 5,9 % gewachsen und ist 2006 mit 28 Mio. t/a auf das über achtfache gestiegen. Zwischen 2003 und 2006 hat die Weltproduktion jährlich um 7,2 % zugenommen (ICDA 2007:41). Roskill erwartet für die Jahre bis 2010 eine im Vergleich dazu eher moderate weitere Nachfragesteigerung um 25 % (Roskill 2005a). USGS geht davon aus, dass 2050 156 Mio. t rostfreier Stahl produziert wird (USGS 2005:17.10). Das entspricht einer erwarteten mittleren Wachstumsrate von 4,2 %/a. Der Ferrochrombedarf wächst proportional mit der Produktionsmenge rostfreier Stähle. Ein großer Teil des Ferrochrombedarfs kann durch das Recycling rostfreier Stähle gedeckt werden.

5.2.5 Chrombedarf 2030

Der Chrombedarf für die analysierten Zukunftstechnologien steigt zwar bis 2030 auf das 5-fache an, bleibt allerdings auf einem unkritisch niedrigen Niveau. Der künftige Chrombedarf wird von den übrigen Verwendungen getrieben und wird dort insbesondere vom künftigen Wachstum der Weltwirtschaft bestimmt.

Tabelle 5-10: Chrombedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2006	Bedarf 2030
Meerwasserentsalzung	10.900	40.900
Orthopädische Implantate	350	1.000
Chrombedarf	11.250	41.900
Chrombedarf / Chromproduktion 2006	0,001	0,005

Das Recycling von Chrom aus Legierungen ist gut ausgebaut und zu wirtschaftlichen Bedingungen möglich. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Recyclingmöglichkeiten bis 2030 weltweit weitgehend genutzt werden und Sekundärchrom in nennenswertem Umfang zur Chromversorgung beitragen wird. Dissipative Chromverwendungen, beispielsweise für Pigmente, Holzschutz und Ledergerbung, spielen mengenmäßig eine untergeordnete Rolle.

5.3 Kobalt

5.3.1 Eigenschaften

Kobalt ist chemisch mit Eisen und Nickel verwandt und wird mit diesen zusammen zur Eisengruppe gezählt. Kobalt ist ein ferromagnetisches Schwermetall der Dichte $8,9 \text{ kg/dm}^3$. Es ist als Gefahrstoff mit Xn (gesundheitsschädlich) zu kennzeichnen und bei der Handhabung sind Sicherheitsbestimmungen zu beachten, die in den R- und S-Sätzen festgelegt sind. Kobalt ist ein seltenes Element von erheblicher wirtschaftlicher Bedeutung, gerade für die Nutzung in Hoch- und Spitzentechnologien.

5.3.2 Vorkommen

Kobalt kommt in der Erdkruste nicht als Metall vor, sondern als Begleitstoff von Nickel-, Kupfer-, Silber- und Eisenerzen. Die Demokratische Republik Kongo ist mit 40 % das wichtigste Förderland, gefolgt von Sambia mit 15 %, Australien und Russland mit jeweils etwa 10 %. Die DR Kongo zählt trotz ihres Rohstoffreichtums zu den ärmsten Ländern der Welt. Der Staat und die Region Zentralafrika gelten als politisch instabil. Die Bedeutung von Kobalt für die Wirtschaft, die Dominanz der DR Kongo bei der Förderung und die politische Instabilität dieser Region geben Kobalt den Charakter eines vulnerablen Rohstoffs. Das United States Geological Survey (USGS) bezeichnet Kobalt als strategisches Metall (USGS 2005:19.1). Der Herfindahlindex der Reserven zeigt mit 0,19 eine noch ausreichende Streuung der erkannten Vorkommen an.

Die mit heute genutzten Technologien, auf dem gegenwärtigen Rohstoffpreisniveau *wirtschaftlich* ausbeutbaren Kobaltreserven der Welt (reserves) werden auf 7 Mio. t geschätzt (USGS). Die weltweit *identifizierten* Ressourcen, die auch einen Teil noch nicht wirtschaftlich ausbeutbare Reserven enthalten, schätzt das USGS auf 15 Mio. t. Dabei ist das in Manganknollen und Sedimenten auf den Ozeanböden nachgewiesene Kobalt nicht eingerechnet.

5.3.3 Produktion

Die Weltproduktion an raffiniertem Kobalt betrug 67.500 t im Jahr 2006. Bezogen auf diese Produktionsmenge errechnet sich eine statische Reichweite der Reserven von gut 100 Jahren und eine Ressourcenreichweite von 220 Jahren. Die produzierte Menge ist 2004 sprunghaft angestiegen und bewegt sich seither auf dem höheren Niveau. Dies könnte auch Folge von Vorratsbestellungen nach einer Preisverdoppelung in 2004 gewesen sein. Noch größer war der Produktionssprung von 2005 auf 2006. Dies hat sogar das USGS überrascht, das in den Commodities Summaries vom Januar

2007 die Kobaltproduktion für 2006 noch auf 57.500 t schätzte. Auch am Kobaltmarkt hinterlässt der Rohstoffbedarf der sich rasch entwickelnden chinesischen Wirtschaft seine Spuren. Chinas Anteil am globalen Kobaltbedarf stieg von 3 % (800 t) in 1997 auf über 11.000 t (17 %) in 2006 (Roskill 2007b:1).

Tabelle 5-11: Kobaltproduktion und Preisentwicklung (USGS 2008; USGS 2006b)

	2003	2004	2005	2006
Globale Minenproduktion in t Co	50.800	57.100	57.900	67.500
Preis US \$/kg Kathodenkobalt	23,35	52,71	35,15	35,02

Tabelle 5-12: Versorgungssituation bei Kobalt 2006

Reserven:	7.000.000 t
Ressourcen:	15.000.000 t
Statische Reservenreichweite:	100 Jahre
Statische Ressourcenreichweite:	220 Jahre
Wichtige Förderländer:	DR Kongo, Sambia, Australien
Länderkonzentration der Reserven:	0,19 (Herfindahlindex)

5.3.4 Verwendungen

Die Nutzungen von Kobalt sind vielfältig und werden mengenmäßig dominiert von den Nachfragesegmenten Batterien und Superlegierungen (Tabelle 5-13). Sie machen zusammen mit der Nutzung für Katalysatoren und Hartmetalle $\frac{2}{3}$ des Kobaltverbrauchs aus, hauptsächlich in Hoch- und Spitzentechnologie-Anwendungen. Europa beanspruchte 2006 30 % des globalen Kobaltbedarfs, der amerikanische Kontinent 29 %, Japan 20 % und China ebenfalls 20 %.

Kobalt ist teuer und knapp, das sind gute Voraussetzungen für das Recycling. Dies wird bei kobalthaltigem Metallschrott praktiziert. Auch die Kobaltrückgewinnung aus Katalysatoren ist Stand der Technik. Aufwändiger und teurer ist die Rückgewinnung von Kobalt aus Batterien. Hier wird sich eine nennenswerte Recyclingkapazität erst in der Zukunft entwickeln. In den USA werden 18 % des Kobaltbedarfs aus Schrott gewonnen (USGS 2008:52). Dies schließt Produktionsabfälle ein. Auch in Europa dürfte die Recyclingquote ein ähnliches Niveau erreicht haben.

Tabelle 5-13: Verwendungen von Kobalt (CDI 2008b:5; CDI 2006; CDI 2007c:9)

Verwendungssegment	Anteil [%]	Technologie- und Produktbeispiele
Batterien	22	Lithium-Ionen und Nickel-Metallhydrid Akkumulatoren
Superlegierungen	22	Gasturbinenschaufeln, medizinische Implantate für Hüfte und Knie
Katalysatoren	11	Fischer-Tropsch-Synthese für GTL- und BTL-Kraftstoffe
Hartmetalle	11	Schneidwerkzeuge (Bindemittel für Wolfram-, Titan- und Tantalcarbide)
Pigmente	9	Gläser, Keramik
Hochwarmfeste Stähle, Oberflächenbeschichtung	8	Turbinenschaufeln, verschleißfeste Bauteile
Spezialchemikalien	8	Reifenadditive, Kobaltseifen, Tintetrocknungsmittel
Magnetlegierungen	7	Elektromotoren, -generatoren, Permanentmagnete
Sonstige Verwendungen	2	Magnetbänder, Medikamente, Futtermittelzusätze
Gesamt	100	

Zukunftstechnologien

Der Kobaltbedarf für **Batterien** hat sich von 11 % im Jahr 2003 auf 22 % in 2006 verdoppelt. Der Lithium-Ionen-Akkumulator ist aus heutiger Sicht *die* Stromspeichertechnologie der Zukunft. Entwicklung und industrielle Nutzung werden getrieben von den mobilen elektronischen Geräten und vom Fahrzeugbau, beides Sektoren mit überdurchschnittlichen Wachstumserwartungen.

Der Bedarf nach **Superlegierungen** wird insbesondere von der Luftfahrtindustrie einschließlich Militärflugzeuge getragen. Dem Sektor Luft- und Raumfahrt werden für die Zukunft überdurchschnittliche Wachstumsraten bescheinigt. Hoch temperaturbeständige Superlegierungen sind für leistungsfähige Triebwerke, aber auch für energieeffiziente stationäre Kraftwerke gefragt.

GTL- und BTL-**Kraftstoffe** besitzen das Potenzial, die Kraftstoffversorgung auf eine breitere Basis zu stellen und weniger abhängig von Erdöl und seinen Vorkommen in der Krisenregion Naher Osten und der politischen Willkür Russlands und anderer GUS Staaten zu werden. Insbesondere der GTL-Technologie werden bei anhaltend hohen Erdölpreisen enorme Wachstumsaussichten bescheinigt.

Kobalt gilt als nicht zu ersetzende Komponente in Hochleistungs-Schneidwerkzeugen. Es wird als Binder für Carbide, vorwiegend Wolframcarbide (WC), aber auch Niob-, Tantal-, Titan- und Chromcarbide, genutzt. Die Herstellung dieser **Hartmetalle** erfolgt durch Sinterung mit Hilfe der Pulvermetallurgie. Sie sind unerlässlich für höchste

Schneidgeschwindigkeiten und Standzeiten von spanabhebenden Werkzeugen, wie sie bei der Fertigung von Metallteilen aus Kostengründen gefordert werden.

Sicheren und langlebigen orthopädischen **Implantaten** kommt in dem Wachstumsmarkt Medizintechnik wachsende Bedeutung zu. Grundstoff von Implantaten ist meist Titan. Dieses Metall ist aber weniger verschleißfest als Kobalt-Chrom-Molybdän-Legierungen. Deshalb werden hoch belastete Implantatteile, beispielsweise Köpfe von künstlichen Hüft- und Kniegelenken, aus Kobaltlegierungen gefertigt.

5.3.5 Kobaltbedarf 2030

Der globale Kobaltbedarf für die analysierten Zukunftstechnologien wird nach den dort entwickelten Projektionen von heute 19 % auf 40 % der Produktion im Jahre 2006 steigen. Dies ist ein erheblicher Zuwachs. Die übrigen Kobaltverwendungen werden vom Weltwirtschaftswachstum getrieben. Der künftige Kobaltbedarf wird also gleichermaßen vom technischen Wandel und dem Wirtschaftswachstum stark beeinflusst.

Tabelle 5-14: Kobaltbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2006	Bedarf 2030
Lithium-Ionen-Hochleistungsstromspeicher	12.000	20.400
XtL (Gas/Coal/ Biomass-to-Liquid)	gering	4.060
Orthopädische Implantate	820	2.400
Kobaltbedarf	12.820	26.860
Kobaltbedarf / Kobaltproduktion 2006	0,19	0,40

Kobalt ist ein teures Metall, wodurch wirtschaftliche Anreize für das Recycling entstehen. Es kann davon ausgegangen werden, dass bestehende Recyclingpotenziale bis 2030 weltweit ausgeschöpft werden. Dissipative Kobaltnutzungen, beispielsweise für Medikamente, Additive und Pigmente, spielen mengenmäßig keine allzu große Rolle. Auch bei gut entwickeltem Recycling wird der Ausbau des Kobaltinventars für die stark wachsenden Anwendungen zum größten Teil durch Primärkobalt gedeckt werden müssen.

5.4 Titan

5.4.1 Eigenschaften

Titan ist ein metallisch weiß glänzendes leichtes Metall mit hoher Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Mit einem spezifischen Gewicht (Dichte) von $4,51 \text{ g/cm}^3$ weist es nur 57 % des Gewichts von Eisen auf, erreicht aber entsprechend legiert die Zugfestigkeit von hochfesten Stählen (Dubbel 1983:301). Aluminium ist mit einer Dichte von $2,70 \text{ g/cm}^3$ leichter, seine Festigkeitswerte bleiben aber weit hinter Titan zurück. Die ungebrochene Dynamik der Nutzung von Titanmetall gründet sich auf die unerreicht hohe spezifische Arbeitsfähigkeit des Metalls, die durch das Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht charakterisiert wird (Tabelle 5-15).

Tabelle 5-15: Das Verhältnis von Zugfestigkeit zu Gewicht ausgewählter Werkstoffe (Dubbel 1983:1389, 1372, 1386)

	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Dichte [g/cm ³]	Zugfestigkeit / Dichte [10^3 Nm/kg]
Titanlegierungen	1.270	4,51	282
Hochfester Stahl	1.320	7,87	168
Aluminiumlegierungen	420	2,70	155

Die Korrosionsbeständigkeit von Titan kommt durch die Bildung einer dichten und stabilen 10 – 100 Å dicken Titandioxidschicht (TiO_2) auf der Metalloberfläche zustande, die sich bei einer Beschädigung spontan neu ausbildet (Selbstpassivierung) (Enghag 2004:506). Titan ist auch in chlorhaltigen Medien und Meerwasser beständig. Bei Abwesenheit von Sauerstoff und in einer reduzierenden Atmosphäre, welche die Bildung einer Oxidschicht verhindern, geht die Korrosionsbeständigkeit verloren.

Titanmetall ist ungiftig. Titandioxid ist inert und besitzt keine toxischen Eigenschaften. Dies ist die Ursache für die ausgezeichnete Bioverträglichkeit von Titan. Die stabile und inerte Schutzschicht aus TiO_2 liegt zwischen Körpergewebe bzw. Körperflüssigkeiten und Metall, verhindert das Herauslösen von Metallionen und Abwehrreaktionen des Organismus.

5.4.2 Vorkommen

Titan ist kein seltenes Metall, sondern im Gegenteil das 9. häufigste Element der Erdkruste. Es kommt in der Erdkruste fast ausschließlich oxidisch und vorwiegend vergesellschaftet mit Eisen vor. Titanrohstoffe von wirtschaftlicher Bedeutung sind

- ▶ Ilmenit, ein Titaneisenerz FeTiO_3 ,

- ▶ Leukoxen, ein eisenarmer Ilmenit,
- ▶ Rutil, Titandioxid TiO_2 , und
- ▶ titanhaltige Schlacken aus der Verhüttung von Eisenerz.

Über 90 % der globalen Produktion von Titanerzkonzentraten aus geologischen Lagerstätten werden aus Titaneisenerzen gewonnen. Die Hauptvorkommen an Titanerzen liegen in Australien, China, Norwegen, Vietnam, Indien, den Vereinigten Staaten und der Ukraine.

Der Herfindahlindex der Erzproduktion zeigt mit einem Wert unter 0,19 eine ausreichend Streuung der produzierenden Länder an. Zusammen mit der Häufigkeit von Titan in der Erdkruste weisen die Basisdaten auf eine langfristig sichere Versorgungslage dieses technisch bedeutsamen Metalls hin. Trotzdem kommt es durch Disparitäten zwischen Produktionskapazität und Nachfrage zu Knappheiten und Preisschwankungen.

5.4.3 Produktion

Um die 95 % des weltweit erzeugten Titans wird als Titandioxid, TiO_2 , verwendet. Die natürlichen Vorkommen als Rutil reichen nicht aus, um die Nachfrage zu decken. Titandioxid wird deshalb auch aus titanhaltigen Eisenschlacken und aus Ilmenit erzeugt. Technisches Titandioxid ist ein hochweißes, lichtbeständiges Pigment für Farben, Lacke, Kunststoffe und andere Zubereitungen. Unter der Bezeichnung E 171 wird es als Zusatz in Zahnpasten und Lebensmitteln genutzt. In nanoskaliger Form wirkt TiO_2 photokatalytisch und baut organische Verunreinigungen ab, wenn künstliche oder im Sonnenlicht vorhandene UV-Strahlung auf das Oxid trifft (IAO/ISI 2008; USGS 2008).

Tabelle 5-16: Titanproduktion und Preisentwicklung (Quelle USGS 2006b:78.14)

	2003	2004	2005	2006
Produktion Erzkonzentrate in 1000 t	6.141	6.293	6.463	7.211
Produktion Schlacken in 1000 t	1.880	1.880	1.880	2.160
Preis US \$/kg Titanschwamm	6,50	8,50	9,23	13,58

Die Produktion von Titanerzkonzentraten ist von 2005 auf 2006 mit 12 % sprunghaft gestiegen. Noch stärker war mit 47 % der Preissprung bei Titanschwamm, einem Vorprodukt für die Herstellung von metallischem Titan. Der starke Preisauftrieb scheint sich in 2007 fortgesetzt zu haben. Nach vorläufigen Schätzungen des USGS betrug der Preis für Titanschwamm am Jahresende 2007 16 US \$/kg.

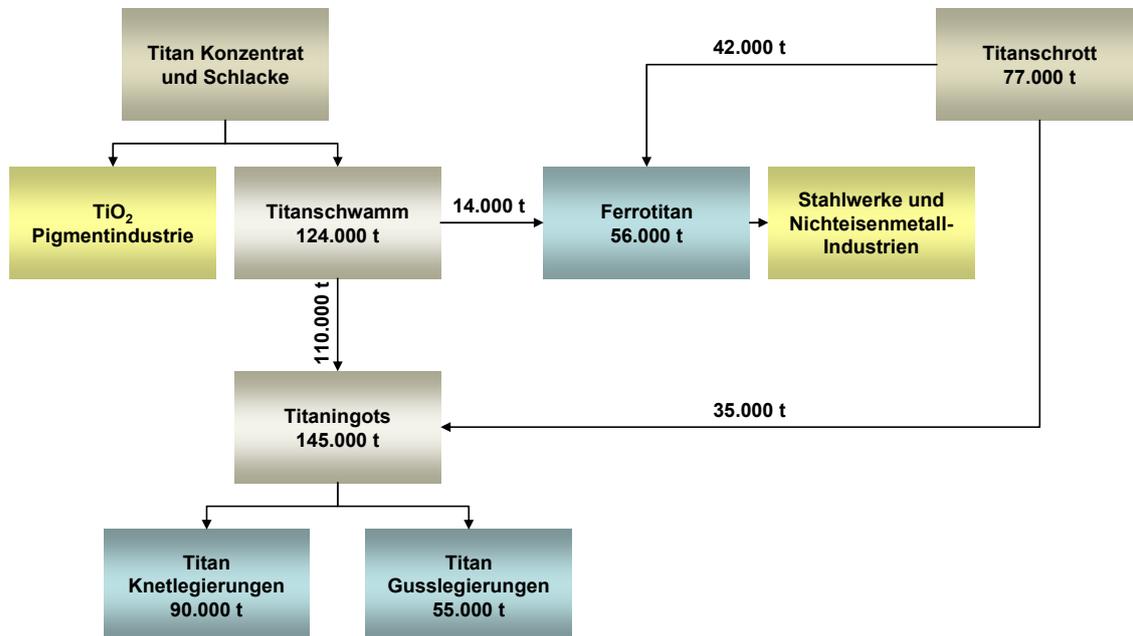
Die Weltressourcen an Titanmineralien werden auf über 2 Mrd. t geschätzt (USGS 2008:180). Damit errechnet sich für die Produktionsmenge von 2006 eine komfortable Reichweite von knapp 280 Jahren.

Für High-tech Produkte ist aus den eingangs genannten Gründen nicht das Oxid sondern das Titanmetall interessant, weshalb die weiteren Ausführungen sich darauf beschränken. Der Produktionsprozess zur Herstellung von metallischem Titan ist aufwendig und teuer und erfolgt heute weltweit fast ausschließlich über den Kroll-Prozess. Ausgangsprodukt ist Titantetrachlorid, TiCl_4 , das durch Chlorierung von TiO_2 in einem Wirbelschichtreaktor erzeugt wird. Im Kroll-Prozess wird TiCl_4 mit Magnesium zu metallischem Titan reduziert, das dann als Titanschwamm vorliegt. Der Titanschwamm wird im Vakuum-Elektrolichtbogenofen eingeschmolzen und die Titanschmelze zu Rohbarren (Ingots) vergossen, die als Vorprodukt für die weitere Verarbeitung dienen. Es hat in der Vergangenheit nicht an Versuchen gefehlt, den aufwändigen Herstellungsprozess für metallisches Titan zu vereinfachen und kostengünstiger zu machen. Angestrebt wird eine Kostenreduktion um den Faktor zehn. Einer der neuen Prozesse soll nach Einschätzung des USGS bis 2010 die kommerzielle Reife erlangen (USGS 2006b:78.5). Eine Preisreduktion würde dem Metall neue Anwendungen erschließen, beispielsweise in der Automobilindustrie.

Trotz der herausragenden industriellen Bedeutung von Titan ist das Mengengerüst der *Metall*produktion in der zugänglichen Literatur erstaunlich lückenhaft, unpräzise und widersprüchlich. So findet sich beispielsweise in den USGS Standardpublikationen, das sind das Minerals Yearbook und die Mineral Commodity Summaries, kein Hinweis auf die globale Produktionsmenge von Titanmetall, die sich aus Titanschwamm, Ferrotitan und Titanschrott zusammensetzt. Das gleiche gilt für Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Das in Abbildung 5-3 zusammengestellte Mengengerüst setzt auf eine unzureichende Informationsbasis auf und ist der Versuch, die Metallströme und die weltweit erzeugte Titanmetallmenge grob einzugrenzen.

Danach wurde 2006 aus den Rohstoffen Titankonzentrat, titanhaltigen Schlacken und 77.000 t Titanschrott insgesamt 201.000 t Titanmetallhalbzeug in Form von Knet-, Guss- und Ferrolegierungen produziert. Die Sekundärmaterial-Einsatzquote erreicht weltweit den hohen Wert von 38 %. Dies ist aufgrund des hohen Preises von Titan und der Herkunft des Schrottes aus teuren High-tech Produkten plausibel.

Abbildung 5-3: Globaler Stoffstrom bei der Herstellung von Titanmetall Halbzeug 2006 (nach Roskill 2007c)



Deutschland hat 2006 9.250 t Titanmetall und 13.500 t Ferrotitan importiert. Exportiert wurden im gleichen Jahr 2.200 t Titanmetall und 5.000 t Ferrotitan. Deutschland ist Nettoexporteur von Titanschwamm. Einer Importmenge von 4.300 t stand 2006 ein Export von 5.500 t gegenüber (BGR 2007:A-22). Der Handelssaldo von Titanmetall wurde im Land zu Produkten für den inländischen Markt und den Export verarbeitet.

Tabelle 5-17: Versorgungssituation bei Titan 2006

Reserven:	660 Mio. t
Ressourcen:	2.000 Mio. t
Statische Reservenreichweite:	90 Jahre
Statische Ressourcenreichweite:	280 Jahre
Wichtige Förderländer:	Australien, China, Norwegen
Länderkonzentration der Produktion:	0,19 (Herfindahlindex)

5.4.4 Verwendungen

Titan ist ein teures Metall und wird aus diesem Grund vorwiegend in High-tech Produkten eingesetzt. Dort ist es aufgrund seiner schon angesprochenen herausragenden Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit kaum substituierbar. Weil Titan ein sehr leichtes Metall ist, konzentriert sich sein Einsatz auf Produkte, bei denen es auf geringes Gewicht ankommt. Das ist an allererster Stelle die Luft- und Raumfahrt. Hier werden

physikalisch und thermisch hoch belastete Triebwerks- und Rumpfteile aus Titanlegierungen gefertigt. Ein Passagierflugzeug enthält 300 – 1.100 kg Titan, Überschallflugzeuge enthielten 20.000 – 40.000 kg (Enghag 2004:506). Die Apollo-Kapseln für die Mondlandung bestanden zu einem großen Teil aus Titan. Heute stehen Titanlegierungen für Einsatztemperaturen von bis zu 600 °C zur Verfügung (ITA 2008:3).

Weitere Einsatzfelder sind der chemische Apparatebau und die Petrochemie. Dort werden beispielsweise bei elektrochemischen Verfahren, wie der Chlor-Alkali-Elektrolyse, Kathoden mit Titanüberzügen geschützt. Es wird bei Wärmetauschern, Destillationskolonnen, in Entschwefelungsanlagen der Rauchgasreinigung und bei der Meerwasserentsalzung eingesetzt. In der Automobilindustrie beschränkt sich die Titannutzung auf thermisch hoch belastete Motorteile, wie Auslassventile, Ventiltfedern, Bremsscheiben und Komponenten der Abgasführung und -reinigung. Die Nutzung des leichten Titanmetalls für Fahrgestell und Karosserie beschränkt sich auf die Aufhängung. Den Einsatz für die Karosserie verhindert der hohe Preis.

In modernen GuD-Kraftwerken, die heute einen elektrischen Wirkungsgrad von über 60 % erreichen, bestehen die beiden letzten Schaufelreihen des Niederdruckteils in volltourigen Dampfturbosätzen (3.000 U/min) aus Titan (Siemens 2008:35).

In der Medizintechnik ist das ausgesprochen bioverträgliche Titan für tragende Teile von Implantaten das Mittel der Wahl. Dazu zählen Zahnimplantate, künstliche Gelenke, Brustkorb- und Wirbelsäulenimplantate sowie Herzschrittmacher.

Auch in Konsumprodukten ist Titan vorgedrungen. Allgemein bekannt sind Brillenfassungen aus Titan, aber auch für Uhren, Fahrräder, Computer, Golfschläger und Küchengeräte wird Titan verarbeitet.

Titan ist ein wichtiges Legierungselement für Stahl, Aluminium und Superlegierungen. Im Stahl wird die Eigenschaft von Titan zur Bildung von Titankarbid (TiC) genutzt, wodurch die Neigung zur interkristallinen Spannungskorrosion reduziert wird. Titanzusatz führt zu einem feineren Korn und setzt die Sprödigkeit der Legierung herab. In hochwarmfesten Stählen werden bis zu gut 2 Gewichtsprozent Titan zulegiert, Superlegierungen auf Nickelbasis enthalten bis zu 4,8 % Titan (Dubbel 1983:1367). Auch in Aluminium- und Kupferlegierungen wird Titan zur Kornverfeinerung genutzt. Die Verarbeitung von Titan als Legierungszusatz erfolgt sowohl schmelzmetallurgisch als auch pulvermetallurgisch.

Nach der dürftigen Informationslage in der zugänglichen Literatur bei der Titanmetallherstellung darf es nicht verwundern, dass auch über die Mengenströme bei der Titanverwendung nur punktuell Informationen verfügbar sind und sich kein konsistentes

quantitatives Mengengerüst erstellen lässt. An punktuellen Informationen findet sich beispielsweise im USGS Minerals Yearbook der Hinweis, dass in den USA 73 % der Knetlegierungen in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt werden (USGS 2006b:78.2). Die gleiche Veröffentlichung gibt an, dass bei der Titannutzung als Legierungselement 74 % für Stahl, 12 % für Superlegierungen und 14 % für andere Legierungen eingesetzt werden (USGS 2006b:78.9).

Tabelle 5-18: Verwendungen von Titanmetall

Verwendungssegment	Anteil	Technologie- und Produktbeispiele
Luft- und Raumfahrt	hoch	Triebwerkskomponenten, Rumpfbauteile
Metallurgie	mittel	Stahl, Nickelbasis Superlegierungen, Aluminium, Kupfer
Anlagenbau	klein – mittel	Schaufeln von Dampfturbosätzen, Meerwasserentsalzung
Chemische Industrie, Petrochemie	klein – mittel	Destillationskolonnen, Rauchgasentschwefelungsanlagen, Wärmetauscher
Medizintechnik	klein	Zahnimplantate, Gelenks-, Wirbelsäulen und Brustkorbimplantate, Herzschrittmacher, Stifte und Schrauben zur Knochenfixierung, chirurgische Instrumente
Automobilbau	sehr klein	Ventile, Ventildfedern, Aufhängung
Konsumprodukte	sehr klein	Brillenfassungen, Golfschläger, Uhren, Fahrräder, Computer, Küchengeräte
Sonstige Verwendungen	sehr klein	CVD und PVD Beschichtungsverfahren, Supraleitende Niob-Titan Legierungen

Die globale Einsatzquote von Sekundärtitan wurde im vorhergehenden Kapitel mit 38 % abgeschätzt. Titan ist ein hochwertiger und teurer Rohstoff. Dies schafft starke Anreize, Titankomponenten aus gebrauchten Produkten vollständig zu erfassen, aufzubereiten und das Metall zu recyceln. Es kann davon ausgegangen werden, dass das Titanschrottrecycling bereits einen hohen Standard erreicht hat. Dissipative Nutzungen, beispielsweise für Komponenten von Raketen und Raumfahrzeugen, die nicht auf die Erde zurückkehren, gehen dem Wirtschaftskreislauf verloren. Die Nutzung von Titan weist eine hohe Mengendynamik auf, so dass der Rücklauf aus gebrauchten Produkten den Metallbedarf nur zu einem Teil decken kann.

Zukunftstechnologien

Titan ist ein teurer Zukunftswerkstoff der vorwiegend in High-tech-Produkten eingesetzt wird. Sie wurden zuvor angesprochen, darunter die letzten Schaufelreihen von energetisch hoch effizienten Dampfturbosätzen in **GuD-Kraftwerken**. Andere Anwendungen, beispielsweise für Brillenfassungen, fallen dagegen mengenmäßig nicht ins Gewicht.

Wenn es gelingt, den Herstellungsprozess von Titan deutlich zu vereinfachen und zu verbilligen, wird der Werkstoff verstärkt auch in nicht High-tech-Branchen vordringen.

5.4.5 Titanbedarf 2030

Die Bedarfsprojektionen der analysierten Zukunftstechnologien ergeben eine beträchtliche Steigerung des Titanbedarfs von heute 8 % auf 29 % der Titanproduktion von 2006. Mengenmäßig schlägt insbesondere die Meerwasserentsalzung durch. Nicht untersucht wurde der Einzug der Titannutzung im Automobilbau, von dem ein erhebliches Nachfragepotenzial ausgeht.

Tabelle 5-19: Titanbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2006	Bedarf 2030
Miniaturisierte Kondensatoren	177	1.140
Meerwasserentsalzung	14.700	55.300
Orthopädische Implantate	520	1.600
Farbstoffsolarzellen	0	108
Titanbedarf	15.397	58.148
Titanbedarf / Titanproduktion 2006	0,08	0,29

Das hochwertige und teure Metall Titan wird heute weltweit bereits in hohem Maße recycelt. Bei den stark wachsenden Anwendungen wird jedoch selbst eine sehr weitgehende Rückführung von Titanmetallschrott in den Wirtschaftskreislauf der Inventar- ausbau nur zum kleineren Teil durch Sekundärmaterial gedeckt werden können.

5.5 Zinn

5.5.1 Eigenschaften

Zinn ist ein bei 232 °C niedrig schmelzendes weiches Metall von erheblicher technischer Bedeutung. Es war schon in der Antike bekannt. Im türkischen Taurus-Gebirge finden sich Zinnbergwerke, die auf 3.500 vor Christus datiert werden. Bronze, eine Legierung von Zinn und Kupfer, hat einer gesamten vorgeschichtlichen Epoche den Namen gegeben. Zinn bildet drei Modifikationen des Kristallgitters aus: α -Zinn mit kubischem Gitter der Dichte 5,75 kg/dm³ ist unterhalb 13,2 °C stabil, β -Zinn mit tetragonalem Gitter der Dichte 7,31 kg/dm³ ist bis 162 °C stabil. Darüber bildet sich γ -Zinn mit rhombischem Gitter der Dichte 6,54 kg/dm³. Die Volumenvergrößerung bei der Rekristallisation zu α -Zinn bei tiefen Temperaturen zerstört die Integrität der Zinnmatrix, es bildet sich Zinnpulver. Der Vorgang wird als Zinnpest bezeichnet. Metallisches Zinn und anorganische Zinnverbindungen sind relativ ungiftig. Einige organische Zinnverbindungen sind aber hochtoxisch. Bekannt geworden ist die Problematik von Tributylzinn (TBT), das für Schiffanstriche verwendet wird, um den Biofilmbewuchs an der unter Wasser liegenden Außenhaut (Fouling) zu unterbinden.

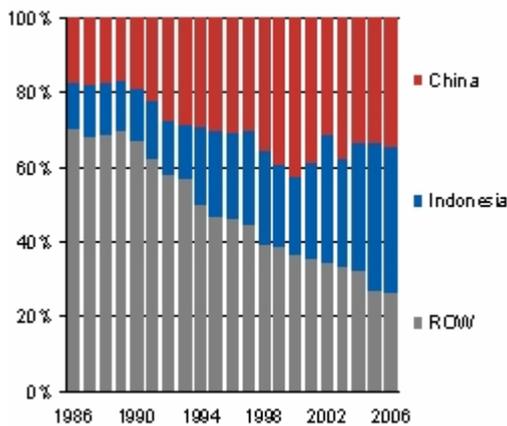
5.5.2 Vorkommen

Kassiterit (SnO₂), auch als Zinnstein bezeichnet, ist das wirtschaftlich bedeutsamste Erz für die industrielle Zinnengewinnung. Die mit heutigen Technologien wirtschaftlich ausbeutbaren Zinnvorkommen betragen 6,1 Mio. t. Die Reservenbasis, die auch nachgewiesene, aber heute noch nicht wirtschaftlich erschließbare Vorkommen einschließt, wird vom USGS auf 11 Mio. t geschätzt. Davon liegen 30 % in China. Zusammen mit Malaysia, Indonesien und Thailand verfügt Asien insgesamt über 53 % der globalen Zinnreserven. Der Rest entfällt auf Brasilien, Peru, Bolivien, Russland und andere Länder. Der Herfindahl-Index der Streuung der Reservenbasis beträgt 0,18 und zeigt damit eine noch unkritische Konzentration der Vorkommen an.

5.5.3 Produktion

Die Weltproduktion von Zinn betrug 2006 302.000 t. China und Indonesien sind mit zusammen 70 % die größten Zinnproduzenten, gefolgt von Peru mit 13 %, Bolivien mit 6 % und Brasilien mit 4 %. Die Dominanz, welche die asiatischen Produzenten gewonnen haben, zeigt Abbildung 5-4 (ITRI 2008a:1).

Abbildung 5-4: Anteile der Produktion von Zinnkonzentrat



Quelle ITRI

Der Zinnverbrauch ist den zurückliegenden Jahren kontinuierlich gestiegen, seit 2003 um 46 %. Die gestiegene Nachfrage hat Spielräume für Preiserhöhungen geschaffen und den Preis seit 2003 um 80 % steigen lassen. 2007 scheint die Preisentwicklung einen neuen Höhepunkt erreicht zu haben. Das USGS gibt nach einer noch vorläufigen Schätzung den mittleren Zinnpreis der London Metall Exchange in 2007 mit 13,83 US \$/kg an. Zur Nachfragesteigerung hat das Verbot in der Europäischen Union und anderen Staaten beigetragen, bleifreie Lote in elektrischen und elektronischen Geräten einzusetzen, denn die bleifreien Lote weisen höhere Zinnanteile auf.

Tabelle 5-20: Zinnproduktion und Preisentwicklung (USGS 2008:41)

	2003	2004	2005	2006
Globale Minenproduktion in t Sn	207.000	264.000	290.000	302.000
Preis US \$/kg Metall (LME)	4,89	8,48	7,36	8,77

Bezogen auf die Produktion in 2006 ergibt sich eine statische Reichweite der Reserven von 20 Jahren und eine Reichweite der Reservenbasis von 36 Jahren.

Tabelle 5-21: Versorgungssituation bei Zinn 2006

Reserven:	6.100.000. t
Reservenbasis:	11.000.000 t
Ressourcen:	k. A.
Statische Reservenreichweite:	20 Jahre
Statische Reservenbasisreichweite:	36 Jahre
Wichtige Förderländer:	China, Malaysia, Indonesien, Brasilien
Länderkonzentration der Reserven:	0,18 (Herfindahlindex)

5.5.4 Verwendungen

Weichlote werden auch als Lötzinn bezeichnet. Die Herstellung von Weichloten ist, bezogen auf die globale Nachfrage mit knapp 50 %, die mit Abstand mengenmäßig bedeutsamste Nutzung von Zinn. Es sind allerdings beträchtliche regionale Unterschiede vorhanden. Während in Europa gut 25 % und am amerikanischen Kontinent gut 30 % des Zinns für Lote verbraucht werden, sind es in Asien über 64 % (ITRI 2008b:2). Dies ist Folge der Dominanz Asiens im Elektronikmarkt. Die Hersteller elektrischer und elektronischer Geräte sind die wichtigsten Abnehmer von Weichloten.

Mit Wirkung vom 1. Juli 2006 hat sich in diesem Verwendungsbereich in der Europäischen Union durch die RoHS-Richtlinie (2002/95/EG) eine wichtige Änderung vollzogen: Seit diesem Zeitpunkt ist der Einsatz bleihaltiger Lote für elektrische und elektronische Geräte in der EU verboten. Während die bleihaltigen Lote 63 % Zinn enthalten beträgt der Zinnanteil in den neuen bleifreien Zinn-Silber-Kupferloten über 95 %. Sie schmelzen bei 220 °C, die eutektischen Blei-Zinn-Lote dagegen weisen mit 183 °C einen niedrigeren Schmelzpunkt auf. Japan und China haben sich dem Bleiverbot angeschlossen (Roskill 2004). Es kann davon ausgegangen werden, dass die USA und andere Länder folgen werden. Die weltweite Umstellung wird die globale Zinnnachfrage um etwa 20 % erhöhen. Das ITRI schätzt, dass gegenwärtig die Penetration bleifreier Lote im globalen Markt elektrischer und elektronischer Geräte 59 % erreicht hat (ITRI 2008b:1).

Im Vergleich zu früheren Jahren hat die Zinnnutzung für die Herstellung von Weißblech mengenmäßig ein wenig an Bedeutung verloren. Als Weißblech bezeichnet man kalt gewalztes dünnes Stahlblech, das zum Korrosionsschutz mit einer etwa 0,3 µm dünnen Zinnschicht überzogen wird. Der Überzug wird heute vorwiegend durch Feuerverzinnung aufgebracht. Dabei wird das Stahlblech in ein Zinnbad getaucht. Die galvanische Verzinnung durch Elektrolyse hat aus Kostengründen an Bedeutung verloren. Weißblech wird vorwiegend für Dosen von Lebens- und Futtermittelmittelkonserven verwendet, Getränkedosen hingegen bestehen fast ausschließlich aus Aluminium (USGS 2008:77.1). Weltweit wurden 2005 etwa 18 % des Zinnverbrauchs für die Herstellung von Weißblech genutzt.

Gut 14 % des globalen Zinnverbrauchs werden für die Herstellung von Chemikalien verwendet. Darunter für die Herstellung von Pigmenten, die Beschichtung von Gläsern, für Katalysatoren, Elektroden, Reduktionsmittel und vieles andere mehr. Organische Zinnverbindungen werden als Stabilisatoren für PVC eingesetzt, als Antifouling Biozide und als Katalysatoren bei der Herstellung von Polyurethanen und Silikonen (Ullmann 2008:27).

Bei der Herstellung von Flachglas für Fenster und Türen wird das zähflüssige Glas auf ein Bad aus schmelzflüssigem Zinn aufgegossen. Das Verfahren wird deshalb auch als Floatglasherstellung bezeichnet. Hinter dem Zinnbad wird das planparallel erstarrende Glasband in Kühlöfen langsam abgekühlt.

Zindioxid (SnO_2) ist transparent, elektrisch leitend, besitzt eine hohe Brechkraft und wird zur Beschichtung von Flachglas, bspw. für Flugzeugfenster, und Displays eingesetzt. Auch Hohlglas wird gelegentlich mit dem Oxid beschichtet, um die Schlagfestigkeit von Glasbehältern zu erhöhen.

Weitere Zinnverwendungen sind: Gussstücke aus Bronze und Messing, bspw. für Armaturen, Ziergegenstände, Modeschmuck, Verzinnen von Metallen, Dentallegierungen, Blei-Zinn-, Aluminium-Zinn und Titan-Zinn-Legierungen, Niob-Zinn-Supraleiter, hochreine Zinneinkristalle für elektronische Bauelemente, bleifreie Geschossprojekteile, Fischereigewichte und Radauswuchtmassen, antistatische Beschichtungen, Flammenschutzmittel, Holzschutzmittel, Pestizide, Pharmazeutika und Indium-Zinn-Oxid.

Tabelle 5-22: Verwendungen von Zinn 2005 (ITRI 2008b:2; USGS 2008:77.7)

Verwendungssegment	Anteil [%]	Technologie- und Produktbeispiele
Lote	49,7	Bleilote und bleifreie Weichlote, bspw. SnAg-Cu
Weißblech	18,3	Dosenblech
Chemikalien	14,1	PVC-Stabilisatoren, Pigmente, Katalysatoren, Biozide
Bronze und Messing, Lagermetalle	5,6	Armaturen
Verzinnen	1,9	Kupferlitzen, Karosseriebau, Dachspenglerei, Kupfergeschirr
Glas	1,8	Flachglasherstellung und Beschichtung, Hohlglasbeschichtung
Andere Verwendungen	8,6	ITO, Supraleiter, Dentallegierungen
Gesamt	100	

Tabelle 5-23: Struktur des globalen Zinnmarktes in % (ITRI 2008b:2)

	Welt	Europa	Amerika	Asien	ROW
Lote	49,7	25,5	30,2	64,4	27,1
Weißblech	18,3	31,7	22,9	11,7	42,2
Chemikalien	14,1	18,3	26,4	9,4	0
Bronze und Messing	5,6	6,6	4,3	5,6	6,3
Glas	1,8	1,2	0,2	2,6	2,1
Sonstiges	10,5	16,7	16,0	6,3	22,3

In den USA stammten 2005 22 % der Zinnproduktion aus dem Recycling. Darin enthalten sind zinnhaltige Produktionsabfälle und die Rückgewinnung von Zinn aus gebrauchten Produkten (USGS 2008:77.6). Das USGS schätzt die USA als den weltweit führenden Hersteller von Sekundärzinn ein. Wenn das Zinnrecycling in den USA diesen hohen Standard erreicht hat, dürfte das Niveau der Sekundärzinnnutzung auch auf Europa übertragbar sein. Hauptquellen der Zinnrückgewinnung sind Weißblechdosen, Lagermetalle und Gegenstände aus Bronze und Zinn. Unklar ist die gegenwärtige Praxis der Zinnrückgewinnung aus Elektronikschrott. Durch die niedrige Schmelztemperatur lassen sich die Lote in einer thermischen Prozessstufe vor den übrigen Metallen leicht aufschmelzen und abziehen. Die steigenden Zinnpreise verbessern die Wirtschaftlichkeit und schaffen Anreize für die Zinnrückgewinnung.

Die Nutzungen von Zinn in Bioziden, Glasbeschichtungen und Geschossprojektilen und anderem sind dissipativ und stehen für die Zinnrückgewinnung nicht zur Verfügung.

Zukunftstechnologien

Für Zukunftstechnologien tatsächlich und potenziell interessante Nutzungen von Zinn sind Indium-Zinn-Oxid (ITO), Niob-Zinn-Supraleiter und Brennstoffzellen. ITO ist transparent und elektrisch leitend. Diese Eigenschaft ist für die gesamte Display- und Leuchtdiodentechnik von essenzieller Bedeutung. Der Effekt dieser Anwendung auf die Nachfrage von Zinn ist allerdings mengenmäßig bedeutungslos.

Die Niob-Zinn-Legierung Nb_3Sn wird bei der Temperatur von etwa -255 °C supraleitend. Dieser Wert liegt deutlich unterhalb der Sprungtemperatur von keramischen Hochtemperatur-Supraleitern (HTSL), die derzeit bis zu -135 °C erreichen. Dies schränkt die wirtschaftliche Bedeutung von Nb_3Sn -Supraleitern und ihre industrielle Nutzung stark ein.

Eine Technologie, deren Potenzial noch nicht einschätzbar ist, ist die Liquid-Tin-Anode Solid Oxide Fuel Cell (LTA-SOFC). Dabei wird der Aufbau der SOFC-Brennstoffzelle dahingehend abgeändert, dass als Anode Zinn genutzt wird, das bei der Betriebstemperatur der Zelle flüssig ist. Der Entwickler, CellTech Power LLC, in Westborough, Massachusetts, gibt an, die LTA-SOFC sei mit allen kohlenwasserstoffhaltigen Brennstoffen, darunter Diesel, direkt und ohne Reformier zu betreiben. Sogar die Nutzung von Biomasse ist ein Entwicklungsziel (FC Bulletin 2007). Ein interessanter Nebeneffekt der Technologie sei die Möglichkeit dieser Zelle, Elektrizität zu speichern, wodurch ihr dynamisches Lastfolgeverhalten dramatisch verbessert werde. Eine Batterie, wie sie konventionelle Brennstoffzellen in Fahrzeugen zur Traktion benötigen, um die

Trägheit der Brennstoffzelle auszugleichen, sei bei der LTA-SOFC nicht erforderlich (CellTech 2008:1).

Die beschriebenen Vorteile der LTA-SOFC sind für industrielle Nutzungen hoch interessant. Wenn sich die Technologie breit durchsetzt werden davon erheblich Impulse für die Zinnnachfrage ausgehen, zumal angestrebt wird, der Technologie ein großes Spektrum von portablen 100 W bis zu stationären mehrere MW Anwendungen zu erschließen.

5.5.5 Zinnbedarf 2030

Der globale Zinnbedarf wird durch den Ausbau der Nutzung bleifreier Lote und durch das Weltwirtschaftswachstum getrieben. Der Zinnbedarf der analysierten Zukunftstechnologien wird, bezogen auf die Zinnproduktionsmenge 2006, von heute 62 % auf 77 % im Jahre 2030 steigen. In dieser Bedarfsprojektion sind die übrigen Zinnverwendungen außerhalb der in Tabelle 5-24 aufgeführten Technologien nicht enthalten.

Tabelle 5-24: Zinnbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2006	Bedarf 2030
Bleifreie Weichlote	188.300	232.900
Miniaturisierte Kondensatoren	105	444
Farbstoffsolarzellen	0	76
Zinnbedarf	188.405	233.420
Zinnbedarf / Zinnproduktion 2006	0,62	0,77

Die Rückgewinnung von Zinn aus dem größten Verwendungssegment, elektrische und elektronische Produkte, ist noch ausbaufähig. Es wird davon ausgegangen, dass bis 2030 das Rückgewinnungspotenzial auch aus dem Elektroniksektor global weitgehend ausgeschöpft ist. Der Ausbau des Zinninventars in einer wachsenden Weltwirtschaft wird trotzdem zum größten Teil aus Primärquellen erfolgen müssen.

5.6 Antimon

5.6.1 Eigenschaften

Antimon wird gelegentlich als Halbmetall bezeichnet, weil es nicht den typischen Metallglanz aufweist. Es ist chemisch ein Metall der Dichte $6,7 \text{ kg/dm}^3$ mit dem niedrigen Schmelzpunkt von $630 \text{ }^\circ\text{C}$. Seine elektrische und thermische Leitfähigkeit ist gering. Beim Erstarren dehnt es sich aus, weist also wie Wasser eine Dichteanomalie auf. Diese Eigenschaft wird für den Präzisionsguss ausgenutzt, beispielsweise von Drucklettern. Antimon und seine Verbindungen sind als Gefahrstoffe zu kennzeichnen.

5.6.2 Vorkommen

Antimon ist ein seltenes Element der Erdkruste und kommt in der Natur nicht metallisch vor. Industriell genutzt wird vorwiegend das Schwefelmineral Stibnit (Sb_2S_3). Die mit heute genutzten Technologien auf dem gegenwärtigen Rohstoffpreisniveau wirtschaftlich ausbeutbaren nachgewiesenen Antimonreserven der Welt werden auf 2,1 Mio. t geschätzt. Die Reservenbasis, die ebenfalls nur nachgewiesene Vorkommen einschließt, aber auch heute noch nicht wirtschaftlich gewinnbare Anteile enthält, wird vom USGS auf 4,3 Mio. t veranschlagt. 56 % davon liegen in der Volksrepublik China, die zugleich zum größten Produzenten von Antimon aufgestiegen ist. Aber auch Thailand, Russland, Bolivien und andere Länder verfügen über Antimon-Lagerstätten. Der Herfindahl-Index der Ressourcenstreuung ist aufgrund der Konzentration der Vorräte auf China mit 0,34 hoch. Der gleiche Wert ergäbe sich, wenn die Vorkommen auf 3 Länder mit jeweils gleichen Anteilen beschränkt wären. Aufgrund der hohen Konzentration der Vorkommen ist Antimon als potenziell vulnerabel einzustufen.

5.6.3 Produktion

Die Weltproduktion von Antimon im Jahr 2006 betrug 134.000 t. 82 % davon, das sind 110.000 t, wurden in der Volksrepublik China erzeugt. Bei einem so dominierenden Marktanteil darf es nicht wundern, dass es in der Vergangenheit nicht an Versuchen gefehlt hat, durch Angebotssteuerung den Antimonpreis zu beeinflussen. In der Zwischenzeit haben sich die Marktturbulenzen beruhigt. China ist zugleich selbst zum größten Verbraucher von Antimon geworden (Roskill 2007d).

Bezogen auf die Produktion in 2006 ergibt sich eine Reichweite der Reserven von 16 Jahren und eine Reichweite der Reservenbasis von 32 Jahren.

Tabelle 5-25: Antimonproduktion und Preisentwicklung (USGS 2008; USGS 2006b)

	2003	2004	2005	2006
Globale Minenproduktion in t Sb	116.000	144.000	142.000	134.000
Preis US \$/kg Metall	2,38	2,86	3,54	5,70

Tabelle 5-26: Versorgungssituation bei Antimon 2006

Reserven:	2.100.000 t
Reservenbasis:	4.300.000 t
Ressourcen:	k. A.
Statische Reservenreichweite:	16 Jahre
Statische Reservenbasisreichweite:	32 Jahre
Wichtige Förderländer:	China, Thailand, Russland, Bolivien
Länderkonzentration der Reserven:	0,34 (Herfindahlindex)

5.6.4 Verwendungen

Die mit Abstand wichtigste Nutzung ist Antimontrioxid (Sb_2O_3), das als Flammschutzadditiv für Kunststoffe, Gummi, Textilien und andere brennbare Materialien eingesetzt wird. Nach Roskill entfallen 75 % des globalen Antimonverbrauchs auf diese Anwendung (Roskill 2007d). Nach Erhebungen des USGS werden in den USA 37 % des Antimons als Flammschutzmittel verbraucht. Nachdem die organischen Flammschutzmittel, beispielsweise PBDE, PCB und PBB, wegen ihres Gefährdungspotenzials in die Kritik geraten waren, wurden verstärkt anorganische Flammschutzmittel genutzt, darunter Antimontrioxid. Andere anorganische Flammschutzmittel sind Aluminiumoxidhydrat ($\text{Al}(\text{OH})_3$), Zinkborat und Ammoniumphosphat.

Antimon wird als Legierungsbestandteil zur Härtung von Blei genutzt, das in reiner Form sehr weich ist. Solche Legierungen wurden traditionell in Blei-Starterbatterien für Fahrzeuge genutzt. Mit dem Vordringen der wartungsarmen und wartungsfreien Batterien ist diese Antimon-Anwendung jedoch beinahe weggebrochen. In modernen Blei-Starterbatterien sind noch 0,6 % Antimon enthalten (USGS 2006b). Der Rücklauf gebrauchter Starterbatterien war eine wichtige Quelle für die Rückgewinnung von Antimon.

Antimon wird als kostengünstiges Basismaterial für zahlreiche Katalysatoranwendungen genutzt, beispielsweise für die Herstellung von Polyethylenterephthalat (PET) für die Getränkeflaschenindustrie und Polyester. In dieser Anwendung kommt Antimon durch die zunehmende Nutzung von Titankatalysatoren unter Druck, nachdem das

Problem der unerwünschten Gelbfärbung des erzeugten PET gelöst wurde (MMTA 2008:7).

Weitere Antimonverwendungen sind: Lote, Lagermetalle, Letternmetalle, Schmelzsicherungen, Kabelhüllen, Bleigewichte, elektrische Widerstände, Kupferlegierungen, magnetische Stähle, Halbleiter, transparente leitfähige Schichten (ATO), Stabilisatoren für PVC, Entfärbungs- und Läuterungsmittel bei der Herstellung von Glas, Keramik und Fritten, Pigmente, Schmierstoffadditive, Munitionszünder, Pestizide und Medikamente. Tabelle 5-27 stellt die Antimonverwendungen zusammen. Die verfügbaren quantitativen Informationen zum Mengengerüst sind recht lückenhaft.

Tabelle 5-27: Verwendungen von Antimon

Verwendungssegment	Anteil [%]	Technologie- und Produktbeispiele
Flammschutzmittel	75	Kunststoffe, Gummi, Klebstoffe, Textilien (Autositzbezüge, Vorhänge, Kinderkleidung)
Pigmente		Antimonsulfid (Rotpigment), Antimon(V)oxid (Weißpigment), Antimonchromat (Gelbpigment)
Glas und Keramik		Läuterungs- und Entfärbungsmittel für Glas, Opazitätsmittel für Glasuren und Fritten
Kunststoffadditive		PVC Stabilisator
Legierungsbestandteil von Blei		Bleiakkus, Bleimantel für Erdkabel, Letternblei
Legierungsbestandteil von Loten		Lötzinn, Weichlot
Legierungsbestandteil von Lagermetallen		Gleitlager
Katalysatoren		PET, Polyester
Bestandteil von Sprengstoffzündern		Munition
Pestizide		Antimonsalze
Medikamente		Chemotherapie
III-V-Verbindungshalbleiter (GaSb etc.)		Thermophotovoltaische Elemente, Infrarotlaser, Transistoren, Infrarotdetektoren
ATO (Antimony-Tin-Oxide)		Transparente leitfähige Beschichtung, bspw. für Glasscheiben von Displays
Gesamt	100	

Zur Rückgewinnung gelangen metallische Nutzungen des Antimons, wie Bleibatterien, Drucklettern und Lagermetalle. Mit dem Rückgang der Antimonnutzung für Starterbatterien, bei der hohe Erfassungs- und Rückgewinnungsraten erzielt werden, ist die Recyclingquote von Antimon insgesamt gesunken. In den USA stammten 2006 15 % des nationalen Antimonverbrauchs aus dem Recycling (USGS 2006b). Einige Antimonan-

wendungen, darunter die mengenmäßig bedeutsame Nutzung als Flammschutzmittel, sind dissipativ. Aus solchen Anwendungen ist eine Rohstoffrückgewinnung nicht möglich.

Zukunftstechnologien

Unter den Antimonprodukten weisen antimonbasierte III-V-Verbindungshalbleiter und Antimon-Zinn-Oxid (ATO) für Zukunftstechnologien interessante Eigenschaften auf. Bei Verbindungshalbleitern kann die so genannte (Energie)Bandlücke⁸³, welche die Absorptions- und Emissionseigenschaften für elektromagnetische Strahlung festlegt, durch die Wahl der Legierungszusammensetzung in bestimmten Grenzen gezielt eingestellt werden. Mit Antimon Verbindungshalbleitern lassen sich Bandlücken von 0,4 – 0,7 eV einstellen. Dadurch wird es beispielsweise möglich, Photoleiter herzustellen, die auf mittel- und langwellige Infrarotstrahlung optimiert sind. Diese thermophotovoltaischen Halbleiter erzeugen aus der Wärmestrahlung im Temperaturbereich von 800 – 1700 °C Strom (Wang 2004:2). Silizium, das eine Bandlücke von etwa 1,1 eV aufweist, wäre für diese Anwendung ungeeignet. Als antimonbasierte III-V-Verbindungshalbleiter werden insbesondere Galliumantimonid (GaSb), aber auch AlSb, GaInAsSb und andere Legierungen genutzt.

Mit Antimon-Verbindungshalbleitern lassen sich neben der beschriebenen thermophotovoltaischen Nutzung auch Infrarot-Diodenlaser, Hochgeschwindigkeitstransistoren und Detektoren realisieren. Dies sind alles Anwendungen, die für Zukunftstechnologien interessant sind. Nach den vorliegenden Informationen ist der Bedarf an hochreinem Antimon (99,999 %) für Halbleiteranwendungen allerdings mengenmäßig völlig unbedeutend ("tiny") (MII 2008:3). Zum Vergleich, die Weltproduktion an höchstreinem Silizium für die Halbleiterindustrie wird im Rutherford Lexikon der Elemente mit 5.000 t/a angegeben (Rutherford 2006:2).

Antimon-Zinn-Oxid, ATO (Antimony-Tin-Oxide), weist eine für die Displaytechnik interessante und zugleich sehr seltene Eigenschaft auf: Es ist elektrisch leitend und zugleich transparent. ATO eignet sich deshalb als transparenter Stromleiter für die äußere, dem Betrachter zugewandte Elektrode von Flüssigkristallbildschirmen (LCD), Plasmabildschirmen, organischen Leuchtdioden (OLED), Touchscreens und für Solarzellen. ATO ist eine kostengünstige Alternative zu ITO (Indium-Tin-Oxide), das die gleiche Eigenschaft aufweist. Indium zählt zu den knappsten Rohstoffen der Erde.

⁸³ Als Bandlücke eines Atoms wird die Energiedifferenz zwischen den Elektronen im Valenzband und den Elektronen im Leitungsband bezeichnet.

Auch aus dieser Anwendung von Antimon sind keine merklichen Nachfrageeffekte zu erwarten. Die Weltproduktion des in dieser Anwendung vorwiegend eingesetzten Indiums liegt bei 880 t/a. Davon werden etwa 750 t/a für die Herstellung von ITO genutzt (Rutherford 2006).

5.6.5 Antimonbedarf 2030

Der Antimonbedarf der analysierten Zukunftstechnologien ist unbedeutend. Die Nutzung als Flammenschutzmittel ist rückläufig. Der steigende Antimonbedarf für Halbleiter und das transparente leitfähige Antimon-Zinn-Oxid werden den Rückgang mengenmäßig nicht kompensieren können. In diesem Kontext könnte das aus Schrotten zurück gewonnene Sekundärantimon zur Bedarfsdeckung wesentlich beitragen.

Tabelle 5-28: Antimonbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2006	Bedarf 2030
Miniaturisierte Kondensatoren	28	71

5.7 Niob

5.7.1 Eigenschaften

Niob ist ein Element der fünften Hauptgruppe in der sechsten Periode (Vanadiumgruppe). Es kommt vor allem als Pyrochlor $[(\text{Na,Ca})_2\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH,F})]$ oder Niobit (Mischkristall mit Eisen, Tantal, Mangan) vor. Ein weiteres bekanntes Erz ist Coltan, ein Columbit-Tantalit-Erz mit Niob und Tantalanteilen. Die chemischen Eigenschaften von Tantal sind wie folgt: es ist hoch schmelzend (2.468 °C), es widersteht allen Säuren außer Flusssäure und wird auch nur von Alkalischmelzen angegriffen. Es ist luft- und korrosionsbeständig auch bei hohen Temperaturen und es hat eine sehr gute elektrische (ca. 20 % schlechter als Tantal) und thermische Leitfähigkeit. Eine der wichtigsten Eigenschaften von Niob ist, dass es Stähle härten kann.

Niob kommt in der Erdkruste mit einem Anteil von 20 ppm vor⁸⁴. Es ist damit erheblich häufiger als Tantal und etwa so häufig wie Lithium.

5.7.2 Vorkommen

Niob wird vor allem aus Pyrochlor gewonnen. Die größten bekannten Reserven finden sich in Brasilien. Die Erzgehalte in der Araxá-Mine liegen bei 2,5 – 3,0 % Nioboxid.

Gab USGS die Reserven für 2006 noch mit 4,4 Mio. t Niobinhalt des Erzes an, so ist diese Zahl von für 2007 mit 2,7 Mio. t Niobinhalt des Erzes deutlich nach unten korrigiert worden (USGS 2007 und USGS 2008). Dies ist vor allem auf eine Neubewertung der Reserven in Brasilien zurückzuführen. Nach TIC (2008) sollen die bekannten Ressourcen bei 460 Mio. t Niobinhalt des Erzes liegen.

⁸⁴ Enghag 2004, Seite 549.

Tabelle 5-29: Versorgungssituation bei Niob 2006

Reserven:	4,4 Mio. t (2007 : 2,7 Mio. t)
Ressourcen:	460 Mio. t
Statische Reservenreichweite:	ca. 100Jahre (2007: ca. 60 Jahre)
Statische Ressourcenreichweite:	> 10.000 Jahre
Wichtige Förderländer:	Brasilien
Länderkonzentration der Reserven:	Herfindahlindex 0,94

Quellen: USGS 2008, USGS 2007, TIC 2008 und eigene Berechnungen

Mit der Korrektur der Reservenschätzung von 4,4 Mio. t auf 2,7 Mio. t Niobinhalt der Erze geht innerhalb eines Jahres eine Verkürzung der statischen Reservenreichweite von knapp 100 Jahren auf 60 Jahre einher.

Die Reserven von Niob zeichnen sich durch eine außerordentliche Konzentration in Brasilien aus. Der Herfindahlindex der Reserven liegt bei 0,94.

5.7.3 Produktion

Die Minenproduktion von Nioboxid erfolgt zu mehr als 90 % in Brasilien. Weitere knapp 10 % werden in Kanada gewonnen. Andere Produktionsländer wie die DR Kongo, Mozambique, Nigeria und Ruanda spielen keine besondere Rolle.

Das Niob wird vor allem in Form von Eisen-Niob (Ferroniobium) mit einem Anteil von Nioboxid von 55 – 60 % verwendet. Die Preise für andere Niobzwischenprodukte werden üblicherweise zwischen Herstellern und Käufern ausgehandelt.

Tabelle 5-30: Weltweite Minenproduktion von Niob und Preisentwicklung von Niob (Niobinhalt in Eisen-Niob)

	2003	2004	2005	2006	2007
Globale Minenproduktion in t Niobinhalt der Erze	32.800	34.000	38.700	44.500	45.000
Preis in US \$/kg Niobinhalt	14,5	14,5	16,1	16,8	k. A.

Quellen: USGS 2008, USGS 2007, USGS 2006a, USGS 2005

Recycling wird vor allem bei Niob-Stählen betrieben, andere Recyclingansätze sind zu vernachlässigen (USGS 2007b). Die Recyclingquote in den USA wird auf ca. 20 % geschätzt beim Stahlrecycling. Niob wird von den Zwischenlieferanten vor allem als Eisen-Niob (Ferro-Niobium mit 60 % Niob), Nioboxid, Niobcarbide, Niobpulver, Niobmetall und Niobstähle (Titan, Zinn, Zirkonium, Nickel) hergestellt.

5.7.4 Verwendungen

Niob wird aufgrund seiner sehr spezifischen Eigenschaften in einer Vielzahl unterschiedlicher Einsatzfelder verwendet. Seine wichtigste Eigenschaft ist die Stahlhärtung, weshalb eigentlich nur Aufschlüsselungen für die verschiedenen Stähle vorhanden sind. Die folgende Tabelle zeigt seine Anwendung:

Tabelle 5-31: Verwendung von Niob 2006

Verwendungssegment	Anteil (%)	Technologie- und Produktbeispiele
Stahlindustrie	> 95% (USA)	Hochfeste und leichte Stähle (für Automobilindustrie, Schienen, Pipelines, Werkzeuge, Schiffbau, Gebäude)
Elektro- und Elektronikindustrie		Keramikkondensatoren (Nioboxid) und Kondensatoren (Niobpulver) Natrium-Dampf-Lampen (Niob-Zirkonium-Stähle) Verwendung in elektrooptischen und piezoelektrischen Bauteilen
Maschinen- und Anlagenbau		Schneidwerkzeuge (Niobcarbid), Beschichtungen (kathodischer Schutz mit Niob)
Luftfahrt		Spezialstähle für Turbinen (Ferro-Niob-Edelstähle bzw. Nickel-Niob-Edelstähle)
Energieerzeugung		Spezialstähle für Turbinen (Ferro-Niob-Edelstähle bzw. Nickel-Niob-Edelstähle)
Chemische Industrie		korrosionsfeste Apparaturen
Medizintechnik		Supraleitfähige Magnete bei Kernspinn-Verfahren oder Magnetencephalographie
Optische Industrie		Kameralinsen, Glasbeschichtung für Bildschirme (beides Nioboxid mit einer Verbesserung der Lichtdurchgangsfähigkeit)
Forschung		Niob-Titan bzw. Niob-Zinn-Stähle zeigen Supraleitfähigkeit bei der Temperatur von flüssigem Helium

Quelle: TIC 2008

Niob kann in verschiedenen Anwendungen substituiert werden, wobei jedoch die Substitute nicht immer die Eigenschaften von Niob erreichen bzw. meist teurer sind (USGS 2007):

- ▶ Molybdän und Vanadium in Stählen,
- ▶ Tantal in Kondensatoren und
- ▶ Keramik, Molybdän, Tantal und Wolfram in Hochtemperaturanwendungen.

Die Dominanz des Einsatzes von Niob in der Stahlindustrie lässt die Verschiebungen bei den Stahlmärkten infolge veränderter Weltmarktfraße im Vergleich zu den Effekten

durch Zukunftstechnologien in den Hintergrund treten. Seine Relevanz hat Niob insbesondere als Substitut für Tantal in miniaturisierten Kondensatoren. Andere Zukunftstechnologien wie die Supraleitung in Magneten werden aufgrund ihrer grundlegenden Bedeutung auch im Hinblick auf andere Rohstoffe (u. a. Thallium) weiter verfolgt.

5.7.5 Niobbedarf 2030

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind folgende zusätzliche Rohstoffbedarfe geschätzt worden:

Tabelle 5-32: Niobbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2006	Bedarf 2030
Mikroelektronische Kondensatoren	288	1.410
Bedarfssumme	288	1.410
Bedarf / Rohstoffproduktion 2006	0,01	0,03

Die einzige quantifizierte Verwendung in Zukunftstechnologien deckt rund ein Prozent des heutigen Niobbedarfs ab. Diese Menge wird sich verdreifachen und damit bis auf 3 % der heutigen Niobprimärproduktion anwachsen.

Entscheidend für die Nachfrageentwicklung von Niob sind die Verwendungen in Stählen. Allerdings ist weder bei den hochwarmfesten Stählen, noch bei den Tailored Blanks eine Quantifizierung gelungen. Auch ohne Quantifizierung lässt sich plausibel begründen, dass diese Stahlqualitäten für Zukunftstechnologien relevant sind, bedeutende Auswirkungen auf die Niob-Nachfrage haben, aber auch leicht recyclebar sind.

5.8 Tantal

5.8.1 Eigenschaften

Tantal ist ein Element der fünften Hauptgruppe in der sechsten Periode (Vanadiumgruppe). Es kommt insbesondere als Tantalit ($\text{Fe}(\text{TaO}_3)_2$) oder vor Microlite und Wodginit vor. Die Erze sind im Gegensatz zu anderen Mineralien sehr heterogen. Coltan ist ein Columbit-Tantalit-Erz mit Niob und Tantalanteilen. Die chemischen Eigenschaften von Tantal sind wie folgt: es ist hoch schmelzend ($2.996\text{ }^\circ\text{C}$), es ist hart, aber dehn- und walzbar, es widersteht allen Säuren außer Flusssäure und es widersteht auch Alkalien, es ist korrosionsbeständig und es hat eine sehr gute elektrische und thermische Leitfähigkeit. Tantal kommt in der Erdkruste mit einem Anteil von 2 ppm vor⁸⁵. Es ist etwa so häufig wie Zinn.

5.8.2 Vorkommen

Tantal wird vor allem als Tantalit, Mikrolith und Wodginit gewonnen. Auch in Zinnschlacken finden sich nennenswerte Anteile an Tantal, wobei jedoch deren Bedeutung immer geringer wird (BMWi 1999 und USGS 2008).

Über die Erzvorräte von Tantal ist nicht viel bekannt. Mit zunehmender Prospektion zeigt sich jedoch, dass vermutlich die Tantalreserven größer sind als noch vor einigen Jahren gedacht. So schätzte das BMWi die Reserven in 1992 und 1996 auf ca. 21.800 t (BMWi 1999 S.19). Nach USGS (2007) lagen die Reserven im Jahr 2006 bei mehr als 43.000 t und die Reservenbasis bei 150.000 t Tantalinhalt im Erz. Ein Jahr später sind diese Zahlen deutlich nach oben korrigiert worden: Die Reserven erreichen nun 130.000 t und die Reservenbasis 180.000 t Tantalinhalt im Erz. Hauptgrund für die Ausweitung der Reserven ist die Bestimmung der Reserven in Brasilien auf 88.000 t Tantalinhalt im Erz (USGS 2008).

⁸⁵ Enghag 2004, Seite 561.

Tabelle 5-33: Versorgungssituation bei Tantal 2006

Reserven:	> 43.000 t (2007: 130.000 t)
Ressourcen:	k. A.
Statische Reservenreichweite:	ca. 30 Jahre (2007: > 90 Jahre)
Statische Ressourcenreichweite:	> 125 Jahre (unsicher)
Wichtige Förderländer:	Australien, Brasilien, Kanada, China, GUS
Länderkonzentration der Reserven:	Herfindahlindex 0,55

Quellen und Anmerkung: USGS 2008, USGS 2007 und eigene Berechnungen

Die Neubewertung der Reserven zwischen 2006 und 2007 bewirkt eine Verlängerung der statischen Reservenreichweite von ca. 30 Jahren auf über 90 Jahre.

Die Tantalvorkommen sind mit einem Herfindahlindex von 0,55 stark konzentriert. Etwa 68 % der globalen Reserven befinden sich in Brasilien und 30 % in Australien. Über die Vorkommen anderer Länder ist wenig bekannt. Weitere Reserven sollen in Mosambik und Zentralafrika, Äthiopien, Süd-Ost-Asien und China liegen.

5.8.3 Produktion

Australien und Brasilien produzierten 2006 zusammen ca. 1.100 t Tantal in Erzen. Ihr Weltmarktanteil belief sich somit auf ca. 77 %. In 2004 und 2005 kamen auch große Lieferungen von Tantal aus Zimbabwe, wobei jedoch unklar ist, ob Tantal auch dort abgebaut wurde (UBA 2007e:27). USGS schätzt, dass ca. 13 % der Tantal-Produktion durch Recycling von Schrott (Altschrotten) erzeugt wird (USGS 2008). Das TIC (2008) schätzt das Recycling auf 20 – 25 %. Die geringe Recyclingquote ergibt sich durch die dissipative Nutzung von Tantal, durch den Einsatz sehr geringer Mengen in den Produkten.

Tabelle 5-34: Weltweite Minenproduktion von Tantal und Preisentwicklung von Tantalpentoxid

	2003	2004	2005	2006	2007
Globale Minenproduktion in t Tantalinhalt der Erze	1.280	1.480	1.400	1.400	1.400
Preis in US \$/kg Tantalpentoxid	66,0	66,0	77,0	72,0	78,0

Quellen und Anmerkungen: USGS 2008, USGS 2007, USGS 2006a, USGS 2005. Die Produktionsangaben schwanken zwischen verschiedenen Quellen von USGS um bis zu 200 t. Der Preis für Tantal bezieht sich üblicherweise auf Ta₂O₅ in Tantalit (Fe(TaO₃)₂)

Der Preis für Tantal wird durch bilaterale Vereinbarungen zwischen den Minen und den Tantalverarbeitern hergestellt. Auf dem Spot-Markt werden nur geringere Mengen an

Tantal gehandelt. Tantal wird von den Zwischenlieferanten vor allen als Tantalstaub (50 – 60 %), Folien (15 %), Carbide (10 %), Salze (10 %) und in metallischer Form (9 %) hergestellt.

5.8.4 Verwendungen

Tantal wird aufgrund seiner sehr spezifischen Eigenschaften in einer Vielzahl unterschiedlicher Einsatzfelder verwendet, wie die folgende Tabelle zeigt:

Tabelle 5-35: Verwendung von Tantal

Verwendungssegment	Anteil (%)	Technologie- und Produktbeispiele
Stahlindustrie		Hochfeste Stähle, Korrosionsschutzüberzug (Brücken, Wassertanks)
Elektro- und Elektronikindustrie	ca. 60 % (USGS) ca. 50 % (TIC)	Kondensatoren (v. a. für KFZ, PC, GPS-Systeme, digitale Kameras, Handys, sowie kleinste elektronische Geräte); IR-Sensoren, Elektrokeramik
Maschinen- und Anlagenbau		Carbide zur Stahlbearbeitung (Schneidwerkzeuge), korrosionsfeste Verbindungselemente (Schrauben, Bolzen) sowie spezifische Anwendungen z. B. Spinddusen und Hochvakuumtechnik)
Luftfahrt		Flugzeugturbinen, Strahltriebwerke
Energieerzeugung		Turbinen (v. a. Schaufeln)
Chemische Industrie		Hochtemperaturanwendungen und korrosionsfeste Apparaturen
Medizintechnik		Operationsbestecke, Bionetrale Implantate, elektrische Applikationen und Implantate (Hörgeräte, Herzschrittmacher)
Optische Industrie		Kameralinsen, Röntgenfilme (?)

Quellen: USGS 2006b, USGS 2007, TIC 2008

Wichtige Zukunftstechnologien mit potenzieller Auswirkung auf den Ressourcenbedarf sind u. a.:

- ▶ Miniaturisierte IKT-Anwendungen (Computer, Meß- und Steuerelektronik, Kommunikationselektronik, v. a. Einsatz von Kondensatoren mit sehr geringen Mengen an Tantal),
- ▶ Maschinenbau (Herstellung von Präzisionsmaschinen und Bauteilen mittels Schneidwerkzeugen oder Verwendung von Spezialstählen, Nutzung von Spezialstählen, die gegen extreme Nutzungsbedingungen widerstandsfähig sind) und
- ▶ Turbinen (Energieerzeugung und Flugzeugbau, Verwendung von hochfesten Stählen).

Tantal kann in verschiedenen Anwendungen substituiert werden, wobei jedoch die Substitute nicht die Eigenschaften von Tantal erreichen (USGS Commodities: Tantalum 2007). Beispiele hierfür sind:

- ▶ Niob in Carbiden,
- ▶ Aluminium, Keramik und Niob in Kondensatoren,
- ▶ Niob, Platin, Titan und Zirkonium in korrosionsfesten Ausrüstungen und
- ▶ Niob, Hafnium, Iridium, Molybdän, Rhenium und Wolfram in Hochtemperatur-Anwendungen.

Für die zukünftige Tantalnachfrage ist insbesondere die Verwendung in miniaturisierten Kondensatoren für die Mikroelektronik ausschlaggebend.

5.8.5 Tantalbedarf 2030

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind folgende zusätzliche Rohstoffbedarfe geschätzt worden:

Tabelle 5-36: Tantalbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2006	Bedarf 2030
Mikroelektronische Kondensatoren	551	1.410
Bedarfssumme	551	1.410
Bedarf / Rohstoffproduktion 2006	0,39	1,01

Die mikroelektronischen Kondensatoren enthalten rund 40 % der heutigen Tantalproduktion⁸⁶. Diese Menge wird bis 2030 um den Faktor 2,5 vergrößern und somit auf das Niveau der heutigen gesamten Minenproduktion anwachsen. Das Recycling von mikroelektronischen Kondensatoren ist stark eingeschränkt.

Trotz verstärkter Substitutionsbemühungen bei Kondensatoren ist keine dauerhafte Entwarnung für die Tantalnachfrage anzugeben. Bei anderen Zukunftstechnologien wie Turbinenschaufeln ist keine Quantifizierung vorgenommen worden und auch die etablierten Anwendungen, z. B. als Schneidwerkzeuge, werden sich voraussichtlich am Markt behaupten.

⁸⁶ Die USGS-Schätzung gibt mit 60 % der Tantalnutzung für Kondensatoren US-Verhältnisse wider und nicht wie Tabelle 5-36 globale Zahlen. Die Differenz zu den höheren Angaben von TIC 2008 in Tabelle 5-35 lässt sich erklären durch andere Anwendungen in der Elektro- und Elektronikindustrie wie z. B. IR-Sensoren, aber auch durch Tantalverluste im Produktionsprozess.

5.9 Platinmetalle – Pt, Pd, Ru, Rh, Os, Ir

5.9.1 Eigenschaften

Die *Platinmetalle*, auch Platingruppenmetalle (PGM), sind die Elemente der Gruppen 8, 9 und 10 in der Periode 5 und 6 des Periodensystems der Elemente. Es handelt sich um die sechs Elemente Platin (Pt), Palladium (Pd), Rhodium (Rh), Ruthenium (Ru), Osmium (Os) und Iridium (Ir). Nicht zu verwechseln sind die Platinmetalle mit der Nickelgruppe, der 10. Gruppe des Periodensystems, mit den Elementen Nickel, Palladium und Platin, die gelegentlich auch als *Platingruppe* bezeichnet wird.

Alle Platinmetalle sind sehr selten und teuer, chemisch reaktionsträge und, mit Ausnahme von Iridium, werden alle als Katalysator oder Katalysatorzusatz genutzt. Osmium und Iridium weisen mit $22,6 \text{ g/cm}^3$ die höchste Dichte unter den stabilen (nicht radioaktiven) Elementen auf. Iridium findet sich in signifikant hoher Konzentration in Sedimentschichten, die das Zeitalter der Kreide vom Tertiär trennt. Es wird vermutet, dass diese Ablagerung von einem mächtigen Meteoriteneinschlag herrührt, dessen aufgewirbelter Staub die Erde verdunkelte, das üppige Pflanzenwachstum beendete und den Dinosauriern die Lebensgrundlage entzog.

Tabelle 5-37: Physikalische Eigenschaften der Platinmetalle

	Pt	Pd	Rh	Ru	Os	Ir
Dichte [g/cm^3]	21,5	12,0	12,5	12,4	22,6	22,6
Mohshärte [1]	4,3	4,75	6	6,5	7	6,5
Schmelzpunkt [$^{\circ}\text{C}$]	1.772	1.555	1.964	2.334	3.130	2.466
Elektrische Leitfähigkeit [10^6 S/m]	9,7	9,5	21,1	13,7	10,9	19,7

Die Platinmetalle der 6. Periode, das sind Platin, Osmium und Iridium, sind beinahe doppelt so schwer als jene der 5. Periode. Sie werden deshalb auch als "schweren Platinmetalle" bezeichnet. Die elektrische Leitfähigkeit bleibt weit hinter der von Silber mit 62, Kupfer mit 58, Gold mit 45,2 und Aluminium mit $37,7 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ zurück.

Platin, Ruthenium, Osmium und Iridium als Metall gelten als nicht toxisch. Die Wirkung von metallischem Palladium, das beispielweise in Dentallegierungen verwendet wird, ist umstritten. Bei Verbindungen ist generell Vorsicht geboten. Ihre toxikologischen Wirkungen sind wenig erforscht. Platinverbindungen, Palladium und seine Verbindungen sowie Osmiumtetroxid (OsO_4) wurden von der Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe als Stoffe eingestuft, für die derzeit aufgrund fehlender Erfahrungen keine MAK-Werte aufgestellt werden können. Rhodium und seine

anorganischen Verbindungen sind in der Kategorie 3 B der krebserzeugenden Arbeitsstoffe gelistet, weil Anhaltspunkte für solche Wirkungen vorliegen (DFG 2008).

5.9.2 Vorkommen

In den Lagerstätten treten die Platinmetalle sowohl metallisch auf als auch in Form von Arsenid-, Sulfid- und Antimonid-Mineralen auf. Darunter Sperrylith (PtAs_2), Cooperit (PtS), Geversit ($\text{Pt}(\text{Sb},\text{Bi})_2$), Braggit ($\text{Pt},\text{Pd},\text{NiS}$), Stibiopalladinit (Pd_3Sb), Laurit (RuS_2), Ferroplatin (Fe-Pt), Polyxen (Fe-Pt-PGM), Osmiridium (Os-Ir) und Iridium Platin (Ir-Pt). Ruthenium, Rhodium und Iridium sind in dieser Reihenfolge nach Rhenium die seltensten stabilen Elemente der Erdkruste, vor Gold und Platin. Die Platinmetallvorkommen in der Erdkruste stammen aus dem Erdinneren und wurden durch tektonische und vulkanische Bewegungen dorthin verfrachtet.

Die Platinmetalle, allen voran Platin, Palladium und Rhodium sind von herausragender wirtschaftlicher Bedeutung und in vielen Anwendungen schwer oder nicht zu substituierende Funktionsträger. Ihre geringen Vorkommen in der Erdkruste machen sie zu einem begehrten Wirtschaftsgut und die Förderländer zu bedeutenden Handelspartnern. Vorkommen finden sich in Südafrika, Russland, Kanada, Australien, Äthiopien, Nord- und Südamerika, Borneo, Tasmanien und Japan. Die Platinmetalle treten in der Erdkruste vergesellschaftet mit Nickel- und Kupfererzen sowie mit den Erzen anderer Platinmetalle auf.

Die Förderung der Platinmetalle zeigt eine hohe Konzentration nach Ländern. Der Herfindahindex in Tabelle 5-38 lässt erkennen, dass dies bei Platin besonderes ausgeprägt ist. Die damit verbundene Marktmacht mag ein Teil der Erklärung für die Preisentwicklung der zurückliegenden Jahre sein.

Tabelle 5-38: Die wichtigsten Förderländer von Platinmetallen (USGS 2006b:57.15)

Metall	Förderländer ⁸⁷	Länderkonzentration der Förderung 2006 (Herfindahlindex)
Platin	1. Südafrika 2. Russland 3. Kanada 4. Zimbabwe 5. USA	0,63
Palladium	1. Russland 2. Südafrika 3. Kanada 4. USA 5. Zimbabwe	0,36
Rh, Ru, Os, Ir	1. Südafrika 2. Russland 3. Kanada 4. Zimbabwe	0,55

Die nachgewiesenen Ressourcen sind groß, so dass eine geologische Knappheit nicht vorhanden ist. Die wirtschaftlich ausbeutbaren Weltressourcen werden vom USGS auf 100.000 t veranschlagt. Daraus errechnet sich eine komfortable statische Reichweite der Produktionsmenge in 2006 von gut 190 Jahren (Tabelle 5-39) (USGS 2008:127).

Tabelle 5-39: Versorgungssituation bei Platinmetallen 2006

Reserven:	71.000 t
Ressourcen:	100.000 t
Statische Reservenreichweite:	137 Jahre
Statische Ressourcenreichweite:	190 Jahre

5.9.3 Produktion

Weltweit wurden 2006 221 t Platin, 224 t Palladium und 73,5 t an übrigen Platinmetallen produziert, zusammen 518,5 t (USGS 2006b:57.15). Die Weltproduktion wird von Südafrika dominiert. 307 t, das sind 59 % der Weltproduktion, stammten von dort. Mit 143 t ist Russland mit deutlichem Abstand das zweitwichtigste Förderland, Kanada liegt mit 28 t an dritter Stelle. Die Produktion hat seit 2003 mit einer jährlichen Rate von 3,6 % nur moderat zugenommen und blieb hinter dem Weltwirtschaftswachstum zurück, das im gleichen Zeitraum 5,0 %/a betrug (IMF 2007:215). Die Erklärung für diese Entkoppelung ist die Preisentwicklung bei den Platinmetallen.

⁸⁷ Geordnet nach Fördermenge.

Tabelle 5-40: Entwicklung der Produktion von Platinmetallen in t (USGS 2006b:57.15; IPA 2007:7)

	2003	2004	2005	2006	2007
Platin	195	200	214	221	230
Palladium	207	211	219	224	232
Ruthenium	n. v.	n. v.	26 ⁺	29 ⁺	n. v.
Übrige Platinmetalle	64,4*	69,7*	51,7	44,4	n. v.
Summe	466,4	480,7	510,7	518,4	n. v.

+ Verbrauch. * inkl. Ruthenium. 2007 geschätzt

Die Preise der Platinmetalle zogen durchweg mächtig an. Der Preis für Rhodium hat sich zwischen 2003 und 2007 mehr als verzehnfacht, für Ruthenium fast verzwanzigfacht und für Platin fast verdoppelt. Im Vergleich dazu ist Palladium nur moderat teurer geworden. Die Preisentwicklungen in Tabelle 5-41 zeigen überdeutlich, dass die Preisbildung nichts mit geologischen Knappheiten oder den Kosten von Förderung und Verarbeitung zu tun haben. Es handelt sich um einen Markt, den offensichtlich die Produzenten beherrschen. Die künftige Preisentwicklung ist in einem solchen Marktgefüge nicht vorhersehbar und stellt die Abnehmer in der Industrie vor große Herausforderungen.

Tabelle 5-41: Preisentwicklung bei den Platinmetallen in US \$/kg (USGS 2008:126)

	2003	2004	2005	2006	2007*
Platin	22.327	27.289	28.920	36.795	40.511
Palladium	6.527	7.489	6.544	10.383	11.574
Rhodium	17.049	31.612	66.223	146.644	194.837
Ruthenium	1.139	2.065	2.392	6.208	19.612
Iridium	2.991	5.959	5.450	11.235	14.147

* geschätzt

Platinmetalle werden in Deutschland nicht gewonnen und müssen zur Gänze importiert werden. Der Importsaldo an Rohmetall, das ist die Differenz zwischen Import und Export, betrug 2006 bei Platin 2,9 t, bei Palladium 18,1 t und bei Rhodium 1,6 t. Bei Iridium, Osmium und Ruthenium wurden 10 t mehr exportiert als importiert. Hier sind offenbar durch den Abbau von Lagerbeständen Gewinne mitgenommen worden. Das Recycling von Platinmetallen ist gut entwickelt, was angesichts der hohen Preise nicht verwundern kann. 45 % des deutschen Bedarfs an Platinmetallen stammt aus Schrotten (BGR 2007:76).

Über die globale Rückgewinnung von Platinmetallen aus Schrotten stehen nur für Katalysatoren aus Automobilen Daten zur Verfügung. 2006 wurden daraus folgende Rohstoffmengen gewonnen: Platin 26,6 t, Palladium 24,9 t und Rhodium 5,3 t (USGS 2006b:57.2). Die aus anderen Anwendungen zurückgewonnenen Mengen kommen hinzu. Hier sind insbesondere Katalysatoren aus der Chemischen und Petrochemischen Industrie zu nennen, die praktisch vollständig recycelt werden, sowie Elektronikschrott.

5.9.4 Verwendungen

Die mengenmäßig bedeutsamste Platinanwendung sind Abgaskatalysatoren von Verbrennungsmotoren. **Platin** ermöglicht als Katalysator die quantitative Umsetzung der Schadgase NO, NO₂, CO und der Kohlenwasserstoffe in einem Temperaturfenster, das im Abgastrakt hinter dem Motor zur Verfügung steht. Starke Preissteigerungen von Platin haben die Automobilbauer zur Substitution von Platin und zur Entwicklung von Palladium-Abgaskatalysatoren veranlasst. Auch Brennstoffzellen nutzen die katalytische Wirkung von Platin um Sauerstoff und Wasserstoff bei niedriger Temperatur zu verbrennen und in Strom und Wärme umzusetzen.

Tabelle 5-42: Verwendungen von Platin (Hagelüken 2005:5)

Verwendungssegment	Anteil [%]	Technologie- und Produktbeispiele
Kfz-Abgaskatalysatoren	42,3	Dreiwegekatalysator in Ottomotoren, Oxidationskatalysator in Dieselmotoren
Schmuck	34,0	Uhren, Ringe, Schreibfedern, Sondermünzen
Chemie und Petrochemie	7,8	Katalysatoren, Apparate, Schmelztiiegel
Sonstige	15,9	Brennstoffzellen, Thermoelemente, Widerstandsthermometer, Heizleiter, Zündkerzenelektrode, Lambda-Sonden, Magnetwerkstoffe für Computerfestplatten, Schmelztiiegel für Lichtleiter-Glasfasern, Glasfaser-Spinddüsen, IC Kontakte, Vielschichtkondensatoren (MLCC), Optische Gläser (bspw. LCD-Bildschirmglas), medizinische Implantate, Herzschrittmacher, Arterienstents, Elektroden von Retinaimplantaten, Beschichtung von Rasierklingen
Gesamt	100,0	

Neben der in jüngerer Zeit gestiegenen Bedeutung von **Palladium** für Abgaskatalysatoren in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren sind Dentallegierungen eine weitere

wichtige Einzelanwendung. Es gibt allerdings Stimmen, die aufgrund der ungeklärten Toxikologie von Palladium vor der Nutzung beim Zahnersatz warnen. Palladium besitzt die Fähigkeit, große Mengen von Wasserstoff in sein Kristallgitter aufzunehmen. Fein verteiltes Palladiumpulver kann das 3000-fache seines eigenen Volumens an Wasserstoff speichern. Ob es gelingt, solche Palladiumspeicher für Wasserstofffahrzeuge technisch und wirtschaftlich zu realisieren, ist zurzeit nicht absehbar. Die Nutzung von Palladium in der Elektronik ist seit 2000 als Folge der Miniaturisierung und der Substitution durch Nickel in MLCC Kondensatoren stark rückläufig (Roskill 2005b).

Tabelle 5-43: Verwendungen von Palladium (Hagelüken 2005:5)

Verwendungssegment	Anteil [%]	Technologie- und Produktbeispiele
Kfz-Abgaskatalysatoren	50,9	Dreiwegekatalysator in Ottomotoren, Oxidationskatalysator in Dieselmotoren
Elektronik und Elektrotechnik	14,9	Steckkontakte, Elektrodenwerkstoffe (Zündkerzen), Lambda-Sonden
Dentaltechnik	13,7	Zahnersatz
Sonstige	20,5	Schmuck (Weißgold), Tiegel, Wasserstoffspeicher, Vielschichtkondensatoren (MLCC), medizinische Instrumente, Schreibfedern, Membran bei der Nylonproduktion
Gesamt	100	

Rhodium ermöglicht es, im Abgaskatalysator das bei der Verbrennung mit Luft entstehende Stickstoffmonoxid (NO) zu Stickstoff (N₂) zu reduzieren. Dies verbleibt insbesondere für Dieselmotoren eine Herausforderung der Zukunft. Die unglaublich gestiegenen Preise für Rhodium erschweren ihre Lösung.

Tabelle 5-44: Verwendungen von Rhodium (Hagelüken 2005:5)

Verwendungssegment	Anteil in %	Technologie- und Produktbeispiele
Kfz-Abgaskatalysatoren	86,3	DeNOx-Stufe in Otto- und Dieselmotoren
Chemie	5,7	Katalysatoren (bspw. Salpetersäureherstellung)
Sonstige	8,1	Beschichtung für technische Spiegel, Heizspiralen, Thermoelemente, Schleifkontakte in Elektromotoren, Zündkerzenelektrode
Gesamt	100	

Geringe Zusätze (0,1 %) von **Ruthenium** verbessern in Titanverbindungen die Korrosionsbeständigkeit beträchtlich. In Farbstoffsolarmodulen dient Ruthenium als aktiver, Elektronen spendender Farbstoff. Er nimmt die Energie der einfallenden Photonen auf. Pro Quadratmeter Solarzelle werden 0,1 g Ruthenium benötigt. Für die Katalyse in der Chemischen Industrie spielt Rhodium im Vergleich zu Palladium, Platin und Rhodium mengenmäßig eine untergeordnete Rolle. Ruthenium wird neuerdings zur Steigerung der Speicherdichte von Computerfestplatten genutzt. Von den insgesamt 16 Schichten der Festplatte enthalten vier Ruthenium (IPA 2007:8).



Quelle International Platinum Group Metals Association

Tabelle 5-45: Verwendungen von Ruthenium (Lutz 2007a:28)

Verwendungssegment	Anteil [%]	Technologie- und Produktbeispiele
Elektronik und Elektrotechnik	64	Widerstandspasten, Verschleißfeste Schaltkontakte, Beschichtung von Computerfestplatten hoher Speicherdichte, Präzisions-Schichtwiderstände
Chemie	27	Beschichtung von Titananoden der Chlor-Alkali-Elektrolyse, Katalysator
Sonstige	9	Dentallegierungen, Platinelektroden von Methanol-Brennstoffzellen, Farbstoffsolarmodulen, verschleißfeste Platin- und Palladiumlegierungen, Schmuck, Medikamente der Krebstherapie, Legierungszusatz für Titanlegierungen, Zündkerzenelektrode für Flugmotoren, Legierungszusatz für Triebwerkschaufeln
Gesamt	100	

Osmium wird aufgrund seiner Härte als Legierungselement für verschleißfeste Anwendungen eingesetzt, darunter elektrische Kontakte, Abtastnadeln, Lager im Apparatebau, Schreibkugeln in Kugelschreibern. Weitere Anwendungen sind Katalysatoren für die Hydrierung, künstlichen Herzklappen und Herzschrittmacher.

Iridium hat als Legierungsbestandteil des Urkilogramms und des Meterprototyps, die aus 90 % Platin und 10 % Iridium bestehen, einige Bekanntheit erlangt. Als hartes Element wird es ebenfalls für abrasionsfeste Anwendungen genutzt, beispielsweise in elektrischen Kontakten und Schreibfederspitzen. Weitere Nutzungen sind Tiegel für

Hochtemperaturanwendungen, UV-Schutzschicht auf Sonnenbrillen, Dentallegierungen, Elektroden und Drähte in Retinaimplantaten und die Schmuckherstellung. Iridium-Platin-Legierungen werden für chirurgische Instrumente genutzt.

Zukunftstechnologien

Den Platinmetallen kommt große Bedeutung für die Entwicklung von Zukunftstechnologien zu. Die gelegentliche Bezeichnung der Platinmetalle als "strategische Metalle" bringt ihre Bedeutung auf den Punkt.

Die **Katalyse** beispielsweise, das bevorzugte Einsatzfeld der Platinmetalle, ist eine zentrale Basistechnologie, welche die Realisierung energieeffizienter und schnell ablaufender Prozesse ermöglicht. Beide sind in der Chemischen und Petrochemischen Industrie Grundforderungen angesichts steigender Energiepreise und dem Kostendruck auf der Produktseite.

Auch in der Zukunftstechnologie **Brennstoffzellen** ist Platin als Katalysator bei der kalten Verbrennung von Sauerstoff und Wasserstoff in der Polymer-Elektrolytmembran (Proton-Exchange-Membrane – PEM) unverzichtbar. Platin scheint gegenwärtig in dieser Anwendung sogar essenziell, d. h. nicht substituierbar zu sein.

Eine neuere Entwicklung, deren Erfolg und Potenzial sich noch nicht sicher einschätzen lässt, ist die **Farbstoffsolarzelle**. Dies ist eine noch im Entwicklungsstadium befindliche kostengünstige Solartechnologie, die ohne Reinräume auskommt. Als photoelektrisch aktives Element wird Ruthenium verwendet.

Leistungsfähige Palladium **Wasserstoffspeicher** zu marktfähigen Preisen für Brennstoffzellenfahrzeuge wären auf der Verbrauchsseite ein wichtiger Schritt zur Lösung des Reichweitenproblems. Es bleibt auf der Angebotsseite allerdings immer noch die Herausforderung, einen Prozess für eine energetisch effiziente Wasserstofferzeugung zu finden.

5.9.5 Bedarf an Platinmetallen 2030

Kritische Bedarfszuwächse entstehen bei Platin mit der breiten Nutzung von Brennstoffzellen getriebenen Elektrofahrzeugen. Die Bedarfsprojektion lässt den Platinbedarf allein aus dieser Anwendung auf das 1,56-fache der gesamten globalen Platinproduktion 2006 steigen. Beträchtliche Auswirkungen auf Palladiumnachfrage zeigen die Bedarfsprojektionen der Meerwasserentsalzung. Die Rutheniumnachfrage aus der Farbstoffsolarzellen-Technologie ist dagegen mengenmäßig unkritisch.

Tabelle 5-46: Platinbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2006	Bedarf 2030
Brennstoffzellen für Elektrofahrzeuge	verschwindend	344
Farbstoffsolarzellen	0	0,8
Platinbedarf	verschwindend	344,8
Platinbedarf / Platinproduktion 2006	0	1,56

Tabelle 5-47: Palladiumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2006	Bedarf 2030
Miniaturisierte Kondensatoren	7	18
Meerwasserentsalzung	16	59
Palladiumbedarf	23	77
Palladiumbedarf / Palladiumproduktion 2006	0,10	0,34

Tabelle 5-48: Rutheniumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2006	Bedarf 2030
Farbstoffsolarzellen	0	1,0
Rutheniumbedarf	0	1,0
Rutheniumbedarf / Rutheniumproduktion 2006	0	0,03

Das Recycling von teuren Platinmetallen ist sehr gut entwickelt. Dort, wo die Bedarfsprojektionen eine stark steigende Nachfrage erkennen lassen, wird die Bedarfsdeckung trotzdem vorwiegend mit Primärmetallen erfolgen müssen.

5.10 Silber

5.10.1 Eigenschaften

Silber gehört zur Kupfergruppe des Periodensystems (Cu, Ag, Au) und zählt zu den Edelmetallen. Es hat die Ordnungszahl 47 und eine relative Atommasse von 107,868 u. Silber ist ein weiß glänzendes Metall der Dichte $10,491 \text{ g/cm}^3$, das bei $960,8 \text{ °C}$ schmilzt und bei 2212 °C siedet. Silber leitet die Wärme und Elektrizität am besten unter allen Metallen. Unter den wichtigsten technischen Eigenschaften sind auch Duktilität, Schmiedbarkeit und Reflexionsvermögen. Durch Versilbern von Glas werden Spiegel hergestellt.

Silber ist weniger reaktiv als Kupfer und oxidiert als edles Metall auch bei hoher Temperatur nicht an der Luft. Silber 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.

Silber kommt als sulfidisches Silbererz vor. Es wird aber häufig als Nebenprodukt anderer Metallgewinnungsverfahren (Kupfer-, Gold-, Blei-/Zinkerze) gewonnen. Bleiglanz PbS enthält 0,01 – 1 % Silber in Form von Silbersulfid Ag_2S . Bei der Gewinnung von Blei oder Kupfer sammelt sich das Silber im Rohblei oder Rohkupfer an.

Silber kommt als edles Metall in der Natur auch gediegen, d. h. elementar, vor. Der Gewichtsanteil von Silber in der Erdkruste liegt bei 0,075 ppm (Enghag 2004:123).

5.10.2 Vorkommen

Die Reserven für Silber werden von USGS auf 270.000 t geschätzt; die Reservenbasis liegt bei 570.000 t. Die Abschätzungen der Reserven haben sich in den letzten drei Jahren nicht verändert (USGS 2006a; USGS 2007; USGS 2008). Auf Basis der Silberproduktion im Jahr 2006 liegt die statische Reichweite der Reserven bei gut 13 Jahren.

Im Jahr 2006 stammten 25 % des vom Bergbau produzierten Silbers aus Minen mit Silber als Hauptprodukt. Aus Kuppelproduktion mit Gold wurden 13 %, mit Kupfer 26 % mit Blei/Zink 33 % und mit anderen 3 % des Silbers gewonnen (GFMS 2007).

Die neuesten Silbervorkommen sind im Zusammenhang mit Goldvorkommen entdeckt worden. In Zukunft werden jedoch Basismetalle, die das Nebenprodukt Silber enthalten, zu einem bedeutenden Teil der Reserven und Ressourcen beitragen. Die Reserven und die wichtigsten Förderländer von Silber sind breit gestreut.

Tabelle 5-49: Versorgungssituation bei Silber 2006

Reserven:	270.000 t
Reservenbasis:	570.000 t
Statische Reservenreichweite:	13 Jahre
Statische Ressourcenreichweite:	28 Jahre
Wichtige Förderländer:	Peru (17 %), Mexico, China, Australien, Chile, Polen, USA, Kanada (5 %)
Länderkonzentration der Reserven:	Herfindahlindex 0,14

Quelle: USGS 2008 und eigene Berechnungen

5.10.3 Produktion

Die Marktversorgung mit Silber setzt sich aus Anteilen der Minenproduktion, rezykliertem Silber und Auflösung von staatlichen Beständen zusammen. Die Anteile der einzelnen Posten für das Jahr 2006 variieren je nach Quelle (Fortis Bank 2008, GFMS 2007, USGS 2008). Besteht über die globale Minenproduktion mit 20.095 – 20.430 t Silbergehalt noch weitgehend Übereinkunft, so liegen die staatlichen Verkäufe zwischen 500 und 2.415 t und das Recycling zwischen 5.848 und 13.344 t.

Die Weltjahresproduktion an Primärsilber als Metall betrug nach USGS (2008) im Jahr 2006 20.200 t. Ein leichter Trend Richtung höherer Produktion ist in den letzten Jahren zu beobachten. Die größten Produzenten im Jahr 2006 waren Peru (3.471 t: 17 %) gefolgt von Mexiko (2.700 t: 13 %), China (2.600 t: 13 %) und Australien (1.727 t: 9 %). Alle vier Länder zusammen produzieren über 50 % des Silbers. Der weltweit größte Produzent Peru erhöhte seine Produktion gegenüber 2005 um 9 %, China um 4 %. In Mexiko und Australien sank die Produktion jedoch um 7 % respektive 29 % (USGS 2006b).

Der Silberpreis war 2006 um 53 % höher als der von 2005. Im Jahr 2006 sind die Preise für Silber, Gold, Nickel, Kupfer und Zink aufgrund von einem weltweiten Boom von Investitionen in Rohstoffe als Wertanlage alle deutlich gestiegen. Silberfonds sind 2006 eingeführt worden. Der Silberpreis stieg auf über 11 \$/troy ounce – der höchste Preis seit 1983 – und erreichte ein Hoch von 14,89 \$/troy ounce am 11. Mai 2006. Der Export von Silber ist 2006 wegen des Transfers von Silber zu der Londoner Agentur für börsengehandelte Fonds (exchange-traded fund ETF) gestiegen. Der ETF Lagerbestand betrug am Ende des Jahres 2006 ungefähr 3.700 t (USGS 2006b).

Tabelle 5-50: Weltweite Minenproduktion und Preisentwicklung von Silber

	2003	2004	2005	2006	2007
Globale Minenproduktion in t Silberinhalt der Erze	18.800	19.900	20.600	20.200	20.500
Preis in US \$/kg Silbermetall	158	215	236	360	431

Quellen: USGS 2008; USGS 2007; USGS 2006a, USGS 2005

5.10.4 Verwendungen

Die Silbernachfrage stieg von 2002 bis 2006 von 25.371 t auf 28.991 t. Folgende Tabelle zeigt die Silberverwendung im Jahr 2002 und im Jahr 2006:

Tabelle 5-51: Entwicklung der Verwendung von Silber [Anteile in %]

Verwendungssegment	2002	2006	Technologie- und Produktbeispiele
Schmuck und Silberware	42,0	29,8	Juwelier- und Tafelsilber mit ca. 20 % Kupfer-Anteil
Photographie	20,2	15,8	Silberbromid in analoger Photographie
Elektrik/Elektronik	17,7	20,4	elektrische Kontakte
Hartlegierungen	4,5	4,3	Amalgam mit Quecksilber als Zahnfüllung
Katalysatoren	5,6	5,1	Umwandlung von Ethylen in Ethylenoxid (Polyestergrundstoff)
Spiegel/Reflexive Gläser	1,8	1,7	Silberbeschichtung von Scheiben zur Reflexion der Sonneneinstrahlung in KfZ
Solar-Paneele	2,2	3,1	Elektroden
Batterien	1,9	1,7	Silber/Zink-Akkumulatoren
Plasma-Bildschirme	0,9	1,1	
Wasseraufbereitung	1,8	2,5	antibakterielle Imprägnierung
Andere	0,2	0,3	Silberbasierte Leitpasten in RFID-Tags
ETF	0,0	13,0	Börsenhandel
Münzen	1,3	1,1	Münzsilber mit 5 – 50 % Kupfer und bis zu 20 % Zink
Gesamt	100,0	100,0	

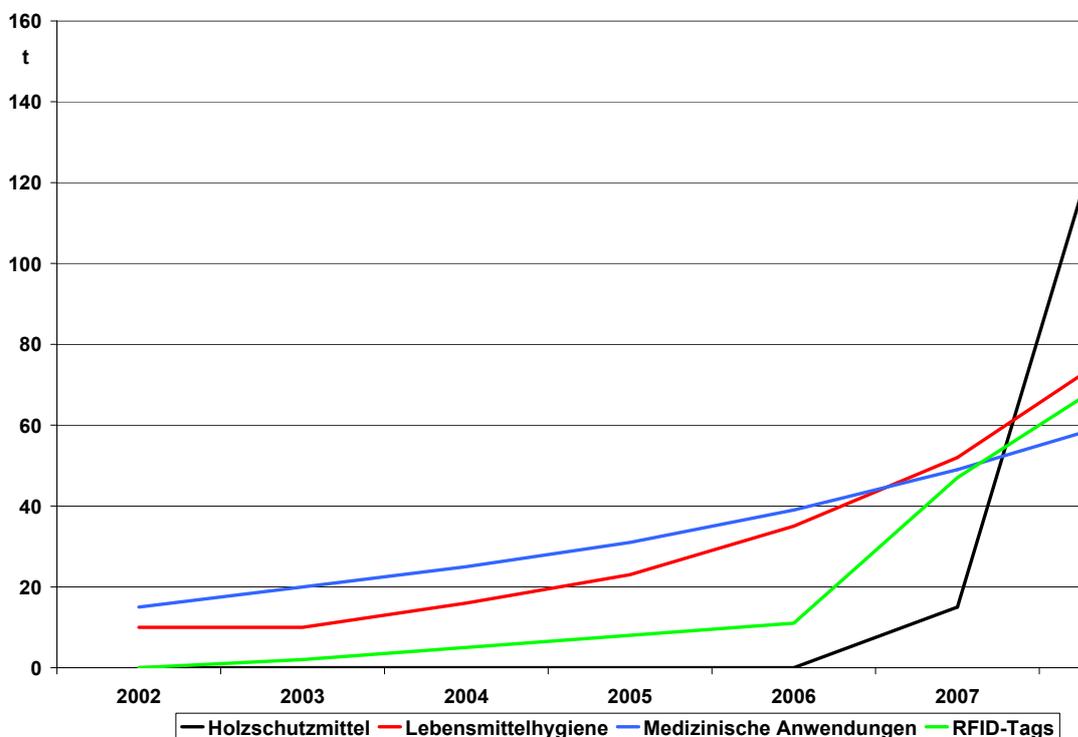
Quelle: Fortis Bank 2008

Die Silberbedarfe für Schmuck und Silberwaren sowie Photographie sind deutlich gesunken. Der Start des Silberhandels am 28. April 2004 an der ETF (Fortis Bank 2008)

hat vermutlich große Teile des Spekulationsgeschäftes mit Silber von Schmuck und Silberwaren abgezogen. Die analoge Photographie wird dagegen durch das Wachstum der digitalen Photographie stark zurückgedrängt (GFMS 2007).

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 Wasseraufbereitung⁸⁸. Auch hinter der Rubrik ‚andere‘ finden sich stark wachsende Teilmärkte:

Abbildung 5-5: Entwicklung der Silbernachfrage in ausgewählten Anwendungen



Quelle und Anmerkungen: Fortis Bank 2008, Schätzung für 2007; Prognose für 2008

In USGS (2008) wird explizit die breite Anwendung von Silber für miniaturisierte Antennen in RFID Transpondern in Pässen und zum Tracking und Tracing von Gütern hervorgehoben. Der Holzbehandlung zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit gegenüber Schimmel wird ein besonders starkes Wachstum prognostiziert. Die antibakteriellen Eigenschaften von Silber werden zunehmend auch massenhaft in neuen Anwendungen genutzt, z. B. in Verbänden zur Wundversorgung, auf Mobiltelefonabdeckungen

⁸⁸ Einige Verwendungen wie als Lagermetall, in Röntgenfilmen und in Farbpapier ließen sich nicht eindeutig zuordnen.

und zur Geruchsreduzierung in Kleidung (Alltag, Sport). Nanosilber gehört auch 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. Alkalihaltige Brennstoffzellen werden in Zukunft an Bedeutung gewinnen, da sie auch mit nicht-platinhaltigen Katalysatoren wie Silber und Gold funktionieren und somit für die Hersteller günstiger werden (USGS 2006b).

Die Anwendungserweiterung von Silber als industrielles Funktionsmetall und antibakterielles Material sowie die Einrichtung des ETF könnte Investoren anziehen, die Silber nicht nur als Wertanlage, sondern auch als strategischen Rohstoff betrachten. Die Preise könnten also weiter steigen (USGS 2006b).

Zukunftstechnologien

Die wichtigsten silberhaltigen Zukunftstechnologien mit hohen Wachstumspotenzialen sind vermutlich:

- ▶ Silberbasierte Leitpasten in RFID Transpondern,
- ▶ Nano-Silber in antibakteriellen Anwendungen,
- ▶ Silber-Zink-Akkumulatoren in mobiler Informations- und Kommunikationstechnologien und
- ▶ Silber-Katalysatoren in alkalihaltigen Brennstoffzellen.

Der Innovationsgrad beruht meist auf der Nutzung bekannter Eigenschaften von Silber in neuen, zukunftssträchtigen Anwendungsfeldern.

5.10.5 Silberbedarf 2030

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tabelle 5-52 geschätzt worden. Das untersuchte Segment der Zukunftstechnologien deckt rund ein Viertel des heutigen Silberbedarfs ab. Diese Menge wird sich verdreifachen und damit bis auf 78 % der heutigen Silberprimärproduktion anwachsen.

Tabelle 5-52: Silberbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2006	Bedarf 2030
Bleifreie Weichlote	5.100	9.300
Solarthermische Kraftwerke	1	44
Displays (OLED)	0	28
Mikroelektronische Kondensatoren	210	518
RFID-Tags	1	5.670
Nanosilber	30	250
Farbstoffsolarzellen	0	14
Bedarfssumme	5.342	15.823
Bedarf / Rohstoffproduktion 2006	0,26	0,78

Anmerkung: zum Silberbedarf durch RFID-Tags siehe Kapitel 4.7.

Das größte Mengenwachstum der untersuchten Zukunftstechnologien bis 2030 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 4.591 t im Jahr 2006 zu den auslaufenden Technologien. Die anderen Technologien werden ihre Position vermutlich behaupten, so dass von diesen keine merklich Entlastung der Silbernachfrage zu erwarten ist. Auch angesichts der sehr eingeschränkten Rezyklierbarkeit der dominierenden Zukunftstechnologien bleifreie Weichlote und RFID-Tags ist deshalb bis 2030 mit einer Nachfrageausweitung für Silber zu rechnen.

5.11 Seltene Erden – Sc, Y, Nd

Zu den Metallen der "Seltene Erden" gehören insbesondere die Lanthanoide. In der kommerziellen Praxis werden auch die Elemente der 1. Nebengruppe Scandium, Yttrium und Lanthan zu den seltenen Erden gezählt (Naumov 2008)⁸⁹. Im Folgenden werden die Seltene Erden aufgrund ihrer ähnlichen chemisch-physikalischen Eigenschaften und ihres gemeinsamen Vorkommens als Gesamtheit betrachtet. Ein Fokus wird auf die Elemente Scandium, Yttrium und Neodym gelegt, da sie im Hinblick auf die Verwendung in Zukunftstechnologien besonders aufschlussreich sind.

5.11.1 Eigenschaften

Im Periodensystem der Elemente bilden die Elemente Scandium, Yttrium und Lanthan die 1. Nebengruppe⁹⁰. Zu den Lanthanoiden gehören die Elemente Nr. 58 – 71: Cer, Praseodym, Neodym, Promethium, Samarium, Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium und Lutetium.

Einige physikalische Eigenschaften der Lanthanoide ändern sich stetig und fortlaufend von einem zum nächsten Glied (u. a. Abnahme der Ionenradien mit wachsender Kernladungszahl), andere aber periodisch (u. a. Schmelzpunkte, Dichten, magnetische Momente, Farben):

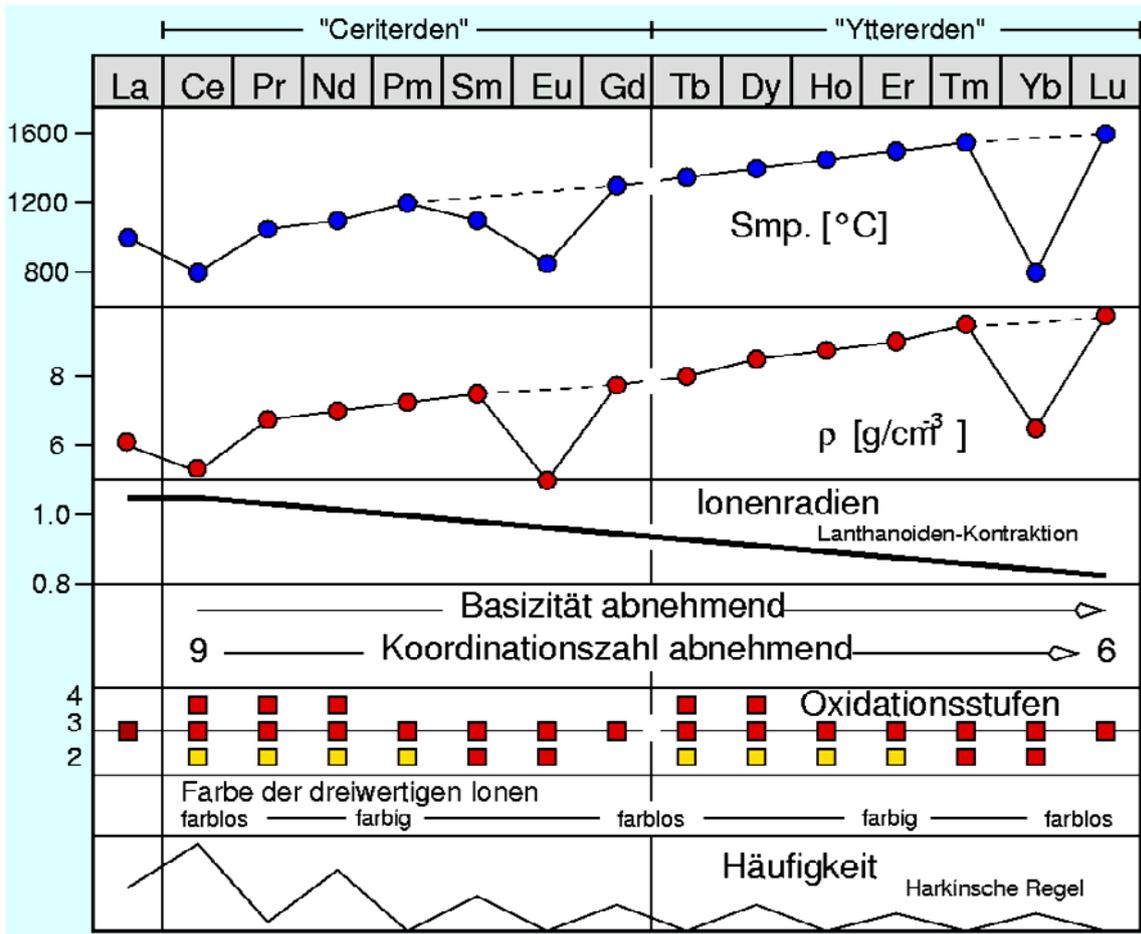
- ▶ Dichte- und Schmelzpunktminima liegen bei Cer, Europium und Ytterbium.
- ▶ Ein relatives Maximum der magnetischen Momente liegt bei Praseodym und Neodym, ein absolutes Maximum bei Dysprosium und Holmium.
- ▶ Das Farbspektrum z. B. der dreiwertigen Ionen reicht von farblos bis zu Gelb-, Grün- und Rot-Tönen.

Da die äußere Elektronenschale der Lanthanoide voll besetzt ist und sie sich nur in der Auffüllung der inneren Schale unterscheiden, sind sie sich in ihrem chemischen Verhalten sehr ähnlich. Auch bei den chemischen Eigenschaften ist zwischen aperiodischen Eigenschaften (u. a. Abnahme der Basizität mit wachsender Kernladungszahl) und periodischen Eigenschaften zu unterscheiden (u. a. Dreiwertigkeit der Lanthanoide mit zusätzlicher Zweiwertigkeit von Europium und Ytterbium). Die folgende Abbildung zeigt ausgewählte Eigenschaften der Lanthanoide im Überblick:

⁸⁹ Die so genannte Yttrium-Gruppe bilden Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y, die Cer-Gruppe La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu.

⁹⁰ Das radioaktive Actinium gehört auch zur 1. Nebengruppe, ist aber, wie die ebenfalls instabilen Actinide, für die Rohstoffversorgung von ganz anderer Natur und wird deshalb nicht weiter betrachtet.

Abbildung 5-6: Eigenschaften der Lanthanoide



Quelle: Ruby 2008

5.11.1.1 Scandium

Aufgrund seiner Dreiwertigkeit und einem ähnlichen Ionenradius ersetzt Scandium in der Lithosphäre häufig Aluminium. Auch andere dreiwertige Ionenbildner, insbesondere Yttrium und Lanthanoide, werden ersetzt, obwohl sich die Ionenradien deutlich unterscheiden und die Dichte von Scandium mit 3 g/cm³ weniger als die Hälfte der meisten Lanthanoide beträgt. Scandium ist ein silbriges, weißes und weiches Metall mit einem Schmelzpunkt von 1.541 °C. Scandium erhöht in Sc-Al-Legierungen die Festigkeit und verringert die Korngröße, was beim Walzen und Schweißen von Bedeutung ist. Bei gegebenem Atom-Anteil ist Scandium das Element, das am stärksten die Festigkeit

von Aluminiumlegierungen erhöht (Raade 2003)⁹¹. Darüber hinaus wird Scandium zur Dotierung u. a. als Lasermaterial und zur Erhöhung der Effizienz von festen Brennstoffzellenelektrolyten eingesetzt.

5.11.1.2 Yttrium

Yttrium hat ähnliche chemische Eigenschaften wie die anderen Seltenen Erden. Das Atomgewicht und die Dichte liegen aber deutlich unter den Werten für die Lanthanoide. Der Schmelzpunkt liegt bei 1.522 °C. Die Zugabe von Yttrium zu Stahl sorgt für eine feinkörnigere Struktur und verbessert einige mechanische, elektrische und magnetische Eigenschaften. Yttrium-Aluminium-Granate (YAl_5O_{12}) sind synthetische Kristalle, die für Festkörper-Laser verwendet werden. Yttrium ist Bestandteil in YBCO – Yttrium-Barium-Kupfer-Oxiden, die als Hochtemperatursupraleiter der 2. Generation bezeichnet werden.

5.11.1.3 Neodym

Die Farbe des dreiwertigen Ions von Neodym wird als Pigment in Gläsern technisch genutzt. Für die Legierung von Eisen und Stahl ist der Schmelzpunkt in Höhe von 1.021 °C wichtig. Neodym bildet ein 4-Niveau Laser-System, das aufgrund eines ähnlichen Ionenradius' wie Yttrium über Dotierung in Yttrium-Aluminium-Granaten technisch genutzt wird. Das hohe relative Maximum des magnetischen Momentes wird in leistungsfähigen Permanentmagneten als Neodym-Eisen-Bor-Werkstoff genutzt.

5.11.2 Vorkommen

Die Bezeichnung "Seltene Erden" für diese Metalle ist irreführend. Sie sind zwar seltener als die Erdalkalimetalle Magnesium, Kalzium, Strontium und Barium, das häufigste Metall der Seltenen Erden, Cer, kommt in der Erdkruste jedoch häufiger vor als beispielsweise Kupfer, Kobalt, Blei und Zinn. Neodym und Scandium, REM mit besonderer Bedeutung für Zukunftstechnologien, sind nur wenig seltener als Cer und häufiger als beispielsweise Lithium, Zinn und Arsen. Thulium, das seltenste Metall unter den stabilen REM, ist immer noch häufiger als Silber, Platin und Gold⁹².

Scandium kommt nicht in Konzentrationen vor, die eine Klassifizierung als Reserve oder Reservenbasis erlauben. Es hat seine höchsten Konzentrationen in Thortveitit,

⁹¹ Wird Titancarbid mit Scandium dotiert, so entsteht die vierthärteste Verbindung, die weltweit bekannt ist (Naumov 2008).

⁹² Enghag 2004, Seite 16f.

einem der zugleich seltensten Minerale überhaupt. Es findet sich u. a. auch in Eisen-, Uran-, Zinn- und Wolframerzen. Der Abbau von Scandium ist nur als Kuppelprodukt unter speziellen Bedingungen wirtschaftlich darstellbar (Naumov 2008, USGS 2008).

Die Reserven von Seltenen Erden liegen bei 88.000.000 t Seltene Erden Oxide (REO), die Reservenbasis bei 150.000.000 t REO. Davon entfallen 540.000 t Reserve bzw. 610.000 t Reservenbasis auf Yttrium (USGS 2008). Für Neodym liegen keine gesonderten Angaben vor. Insgesamt sind die Reserven und die Ressourcen von Seltenen Erden relativ groß. Die REO und Yttrium werden nahezu ausschließlich in China produziert, der Herfindahlindex der Reserven ist mit 0,23 dagegen deutlich breiter gestreut.

Tabelle 5-53: Versorgungssituation bei Seltenen Erden Oxiden und Yttrium 2006

	Seltene Erden Oxide	Yttrium als Y ₂ O ₃
Reserven	88.000.000 t	540.000 t
Reservenbasis	150.000.000 t	610.000 t
Statische Reservenreichweite	715 Jahre	61 Jahre
Statische Ressourcenreichweite	1.220 Jahre	69 Jahre
Wichtige Förderländer	China (97 %)	China (99 %)
Länderkonzentration der Reserven	Herfindahlindex 0,23	Herfindahlindex 0,26

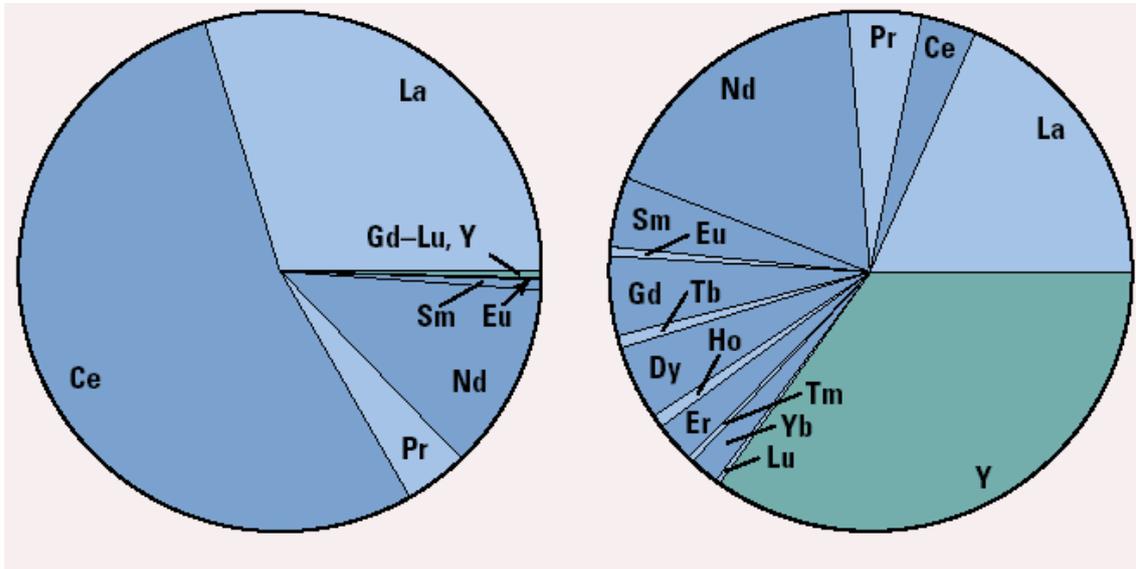
Quelle: USGS 2008 und eigene Berechnungen

Die wichtigsten Quellen für Seltene Erden sind folgende Minerale (Naumov 2008):

- ▶ Bastnäsit: [Ce, La(CO₃)]F mit 55 – 60 % REO
- ▶ Monazit: (Na, Ce, Ca)(Ti, Nb)O₃ mit 30 – 35 % REO
- ▶ Xenotim (Y, Eu, Gd, ...)PO₄ mit 55 – 60 % REO
- ▶ Ionen-absorbierende Tone mit 10 – 20 % REO

Folgende Abbildung zeigt die Zusammensetzung des Anteils Seltener Erden in einem Bastnäsiterz und in einem Ionen-absorbierenden Ton:

Abbildung 5-7: Zusammensetzung des Anteils seltener Erden in einem Bastnäsi-
terz (links) und in einem Ionen absorbierenden Ton (rechts)



Quelle: USGS 2002

Die größten Reserven an Seltenen Erden befinden sich in Bastnäsi-Vorkommen in China, der GUS und den USA (USGS 2008). 59 % der Reservenbasis an REO sind in China konzentriert. Auch in der GUS lagern große Mengen weitgehend noch nicht erschlossener Ressourcen. Neodym findet sich zu bedeutenden Anteilen in Bastnäsi, aber auch in anderen Vorkommen. Yttrium kommt vor allem in Monazit und Xenotim in großen Mengen vor. Die wirtschaftlich abbaubaren Monazit-Vorkommen liegen in Australien, Brasilien, China, Indien, Malaysia, Südafrika, Sri Lanka, Thailand und den USA. Die Ressourcen für die hochwertigere und seltenere Yttriumgruppe (rechts in Abbildung 5-7) befinden sich sogar zu rund 80 % in China (Naumov 2008).

5.11.3 Produktion

Seltene Erden werden in folgenden Hauptformen produziert, gehandelt und verwendet:

- ▶ Seltene Erden Oxide (REO),
- ▶ Seltene Erden Metalle (REM), darunter Einzelmetalle und Mischmetall⁹³.

Nur Cer (8.000 – 20.000 t), Lanthan (7.000 – 10.000 t), Neodym (7.300 t) und Yttrium (7.000 t) werden als Einzelmetalle in größeren Mengen hergestellt, die meisten anderen in Mengen von wenigen bis zu 500 Tonnen (Scharp 2008). Auf Einzelmetalle ent-

⁹³ Mischmetall enthält typischerweise ca. 50 % Cer, 30 % Lanthan, 15 % Neodym und 5 % Promethium (Naumov 2008).

fallen etwa $\frac{1}{4}$ und auf REO und Mischmetall rund $\frac{3}{4}$ der Produktionsmenge. Die Seltenen Erden werden also vorwiegend direkt als Oxide, oder als Mischmetall verwendet. Die folgende Tabelle zeigt die Produktionszahlen von REO insgesamt und für das Yttrium-Metall sowie die korrespondierenden Preisentwicklungen:

Tabelle 5-54: Weltweite Minenproduktion von Seltenen Erden Oxiden und Yttrium-Oxid sowie Preisentwicklungen von Seltenen Erden Oxiden, Mischmetall und Yttriummetall

	2003	2004	2005	2006	2007
Minenproduktion REO in t	99.100	102.000	123.000	123.000	124.000
Minenproduktion Y ₂ O ₃ in t	2.400	2.400	6.080	8.900	8.900
Minenproduktion Nd ₂ O ₃ in t			19.555		
Preis in US \$/kg REO (Bastnäsit-Konzentrat)	4,08	4,08	4,08	4,08	4,08
Preis in US \$/kg Mischmetall	5 – 6	5 – 6	5 – 6	5 – 6	5 – 6
Preis in US \$/kg Yttriummetall 99,9 % Reinheit	95 – 115	96	96	68 – 155	68 – 155

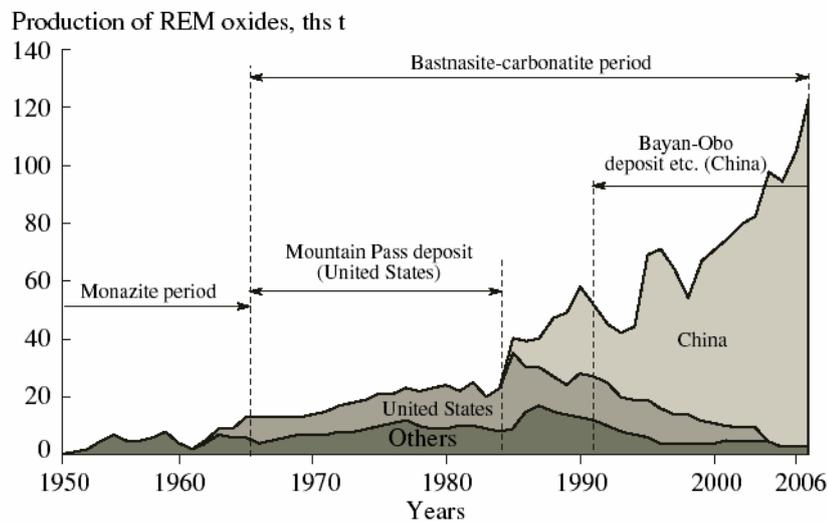
Quellen: USGS 2008, USGS 2007, USGS 2006a, USGS 2005, BCC Research 2006

Die Produktionsmenge von REO, insbesondere für Yttrium, ist in den letzten fünf Jahren deutlich gestiegen, wohingegen die Preise für Bastnäsit-Konzentrat und Mischmetall in den USA in den letzten fünf Jahren stabil geblieben sind. In den Roskill-Studien wird der globale Bedarf an REO im Jahr 2010 auf 180.000 – 190.000 t geschätzt.

Der Markt für REM ist von 1964 – 1997 um einen Faktor 17 und von 1997 – 2007 um einen Faktor 20,5 gewachsen. Das starke Wachstum in den letzten 10 Jahren ist zu einem großen Anteil auf ihre Verwendung in Zukunftstechnologien zurückzuführen. Stieg die Produktion von REM von 1990 – 2000 um einen Faktor 2,45, so steigt die Nachfrage von Neodym und Dysprosium für Magnete im gleichen Zeitraum um einen Faktor 9 – 10. Die Neodym-Nachfrage erreichte im Jahr 2000 ein Maximum, so dass große Mengen überschüssiger anderer seltener Erden auf die Preise drückten. Im Jahr 2000 ergriff die chinesische Regierung deshalb Maßnahmen zur Limitierung des Abbaus und der Verringerung des Exports. Seit 2007 ist wieder ein Preisanstieg für einzelne REM zu verzeichnen (Naumov 2008). Metallisches Yttrium hat in den vergangenen fünf Jahren keine vergleichbare Produktionsausweitung wie die REO insgesamt erfahren, wohl aber größere Preisschwankungen.

Die Produktion von Seltenen Erden hängt stark von der Ausbeutung einiger weniger Lagerstätten ab. Folgende Abbildung zeigt die wesentlichen Abschnitte der Weltproduktion von REO seit 1950:

Abbildung 5-8: Weltproduktion von REO



Quelle: Naumov 2008, basierend auf Daten von USGS (verschiedene Jahrgänge)

Bis etwa 1965 sind REO vor allem aus Monazit gewonnen worden, seitdem dominieren die Bastnäsit-Vorkommen⁹⁴. Das Mountain Pass Deposit in den USA ist seit 1991 von der Chinesischen Lagerstätte Bayan-Obo als bedeutendster REO-Lieferant abgelöst worden. Mit der Einstellung des Abbaus des Mountain Pass Deposits in den USA dominiert die Lagerstätte Bayan-Obo die Weltversorgung mit REO.

Mit ca. 120.000 t werden heute ca. 97 % aller hergestellten REO im chinesischen Bergbau gewonnen. Während China im Bergbau und in der Produktion führend ist, dominieren die USA bei der Verarbeitung. Die Monopolposition Chinas bei der Produktion kann aufgrund der immensen Lagerstätten auch in anderen Ländern in Zukunft potenziell gebrochen werden. Folgende Projekte werden derzeit diskutiert:

- ▶ Zur Minderung der Abhängigkeit von Rohstoffimporten wird in den USA eine Wiederaufnahme des Abbaus von Seltenen Erden am Mountain Pass Deposit diskutiert (USGS 2002).
- ▶ Die größte Lagerstätte ist Mount Weld in Australien. Sie enthält 1,18 Mio. t REO und wird derzeit zur Erschließung vorbereitet (Naumov 2008).

Die Produktionszahlen für Scandium sind nicht genau bekannt. Die Scandium-Versorgung liegt bei geschätzten 5 t Scandiumoxid (Sc_2O_3) pro Jahr, wovon 2 t aus

⁹⁴ Der Abbau von Monazit-Vorkommen ist aufgrund des Gehaltes an radioaktivem Thorium und Radium erschwert.

Kuppelproduktion und 3 t aus sowjetischen Altbeständen stammen. Im Jahr 2005 hat die Eaglefield Holdings Party Limited für das Mulga Rock Deposit in Australien eine Abbaugenehmigung beim Australischen Parlament ersucht. Dieses Vorkommen ist das weltweit Größte für Scandium, das in Kuppelproduktion mit Uran, Nickel und Kobalt wirtschaftlich gewonnen werden könnte. Anvisiert ist eine Förderung von 200 t Sc_2O_3 pro Jahr, was eine völlig neue Versorgungssituation ergeben würde und vom Antragsteller auch mit dem hohen strategischen Interesse an einer Weiterverarbeitung zu Al-Sc-Legierungen begründet wird (Eaglefield 2005).

5.11.4 Verwendungen

Die Konzentrationen der Seltenen Erden variieren in verschiedenen Erzen sehr stark. Sie korrespondieren nicht mit ihrer kommerziellen Nachfrage. Heute werden nur ca. 75 % der produzierten Seltenen Erden auch verbraucht. Es ist langfristig wahrscheinlich, dass die Ungleichheiten von Angebot und Nachfrage für einzelne REMs als ein gravierendes Problem bestehen bleiben. Um eine gewisse Menge an begehrten Seltenen Erden bereitzustellen sind Hersteller also gezwungen, beträchtliche Mengen anderer, weniger lukrativer Seltener Erden mit zu produzieren. Zur weltweiten Verwendung von Seltenen Erden gibt es keine belastbaren Daten. Folgende Tabelle zeigt die Verwendung von Seltenen Erden in den USA im Überblick⁹⁵.

Tabelle 5-55: Verwendung von Seltenen Erden in den USA 2006

Verwendungssegment	Anteil [%]	Technologie- und Produktbeispiele
Katalysatoren für Automobile	25	REO im Keramikkörper
Katalysatoren für Erdölraffinerien	22	REO im Keramikkörper
Metallurgische Additive und Legierungen	20	Mischmetall in rostfreien Stählen, Batterie- und Gusslegierungen
Glaspolierung und Keramik	11	REO als Schleifmittel
Leuchtstoffe	10	Einzelmetalle für Beleuchtung, Fernseher, Computermonitore, Radar und Röntgenfilme
Permanentmagnete	3	Einzelmetalle in Legierungen
Laser und medizinische Anwendungen	3	Einzelmetalle als Dotierungsstoffe
Sonstige	6	Einzelmetalle in Batterien, Pigmenten, Glasfasern, Supraleitern
Gesamt	100	

Quelle: USGS 2008

⁹⁵ Im globalen Maßstab sind auch andere Verwendungen, z. B. als Tierfutterzusatz, relevant.

Die Verwendungsstruktur von Seltenen Erden wird durch seit längerem genutzte technische Eigenschaften dominiert (Naumov 2008, Heinritz 2008):

- ▶ Ceroxid erhöht z. B. in Automobilkatalysatoren die Aktivität von Rhodium für die Reduktion von NO_x . Auch Lanthan und Lutetium werden in Katalysatoren zunehmend eingesetzt.
- ▶ Nahezu alle hochwertigen polierten Gläser, einschließlich Spiegel und Präzisionslinsen werden mit Ceroxid behandelt.
- ▶ Als metallurgisches Additiv oder als Legierungsbestandteil wird meist Mischmetall verwendet. Wichtigste Anwendung ist die Entfernung von Sauerstoff und Schwefel in der Stahlproduktion. Auch Yttrium wird vor allem in der Stahlindustrie zur Erzielung verschiedener Effekte eingesetzt.
- ▶ In Kathodenstrahlröhren, FED, PDPs und Fluoreszenzlampen werden Seltene Erden als Leuchtstoffe eingesetzt. Neben Yttrium kommen insbesondere Eu, Gd, Tb und Ce zum Einsatz.

Weitere Anwendungen von Seltenen Erden finden sich in Magneten, Lasern, in der Glasfasertechnologie und bei Supraleitern. Lanthan und Neodym werden auch in Elektroden von Ni-Metallhydrid-Akkumulatoren eingesetzt, weshalb ihre Verwendung in Elektro- und Hybridautos zunimmt. Hauptverwendungsgebiet von Scandium sind Al-Sc Legierungen für die Luftfahrt und Sportausrüstung.

Die dissipative Verwendungsstruktur ist mit der Grund dafür, dass Seltene Erden nur zu geringen Anteilen aus Sekundärrohstoffen wiedergewonnen werden. Am meisten werden Permanentmagnet-Schrotte wieder rezykliert (USGS 2008).

Während die Verwendungsstruktur der Seltenen Erden insgesamt von etablierten Verwendungen, meist als REO oder Mischmetall dominiert wird, sind einige Seltene Erden als Einzelmetalle auch für Zukunftstechnologien relevant. Insbesondere Scandium, Yttrium und Neodym haben als Einzelmetalle und als Rohstoffe besondere Eigenschaften, die sie für den Einsatz in Zukunftstechnologien prädestinieren.

5.11.4.1 Scandium in Zukunftstechnologien

Scandium wird trotz seiner technisch hoch interessanten Eigenschaften aufgrund seiner geringen Verfügbarkeit nur wenig verwendet. Sollte die Erschließung ökonomisch gewinnbarer Ressourcen gelingen, so wäre dies ein echter "Enabler" für einzelne Zukunftstechnologien, insbesondere (Eaglefield 2005):

- ▶ Hohe Treibstoffpreise und die Folgen des Klimawandels begünstigen in Zukunft noch stärker den Leichtbau in der zivilen Luftfahrt. Aufgrund der begrenzten Ver-

füßbarkeit wurden Sc-Al-Legierungen bislang vorwiegend in der militärischen Luftfahrt eingesetzt. Im zivilen Flugzeugbau sind Sc-Al-Legierungen in Zukunft womöglich eine wichtige Option für den Leichtbau.

- ▶ Sc kann die Einführung von Feststoff-Brennstoffzellen (SOFC) beschleunigen, da es durch Dotierung von Yttrium-stabilisiertem Zirkon (YSZ) die Effizienz des Elektrolyts um einen Faktor 3 – 5 erhöht und damit eine Verringerung der Betriebstemperatur von 900 – 1.000 °C auf 750 – 800 °C erlaubt. Dies wiederum ermöglicht den Einsatz von einfacheren und billigeren Materialien wie Stahl, was die Kosten von SOFC weiter deutlich reduziert.

Die Beobachtung der Scandium-Projekte und die Versorgung mit Scandium können für die marktreife Entwicklung und Produktion dieser beiden Zukunftstechnologien ausschlaggebend sein.

5.11.4.2 Yttrium in Zukunftstechnologien

Das Angebot an Seltenen Erden wird derzeit stark von den Bastnäsit bestimmt. Yttrium kommt darin nur in relativ geringen Anteilen vor. Eine deutliche Nachfragesteigerung durch Zukunftstechnologien könnte den Abbau von Monazit wieder in anderem Licht erscheinen lassen:

- ▶ Die YBCO – Yttrium-Barium-Kupfer-Oxide werden als Hochtemperatursupraleiter der 2. Generation bezeichnet. Sie haben inhärent geringere Kosten und potenziell Vorteile hinsichtlich der Leistungsfähigkeit. Ihre Kommerzialisierung wird in vier bis fünf Jahren angenommen.

Die potenzielle Transformation der Elektrizitätswirtschaft durch Hochtemperatursupraleitung hat möglicherweise erhebliche Folgen für die Yttrium-Nachfrage, den Abbau von Monazit und damit auch für das gesamte verfügbare Portfolio an Seltenen Erden.

5.11.4.3 Neodym in Zukunftstechnologien

Die Bewegungen in den Produktionsstrukturen von Neodym (Heinritzi 2008) und seine vielseitige Verwendung in Magneten und in Lasern legt eine Fokussierung und Weiterverfolgung von Neodym nahe:

- ▶ Yttrium-Aluminium-Garnets sind synthetische Kristalle, die als aktives Lasermaterial in Festkörperlasern verwendet werden. Zur Erzielung bestimmter Wellenlängen werden sie meist mit Neodym dotiert. Darüber hinaus kommen auch andere Seltene Erden wie Ytterbium, Erbium und Holmium in verschiedenen Laserkristallen zum Einsatz.

- ▶ Der Einsatz von Seltenen Erden in Magneten hat zu revolutionären Transformationen der Branche geführt. Waren es zunächst Samarium-Verbindungen, so werden seit 1984 Nd-Fe-B-Legierungen für leistungsstarke Permanentmagnete eingesetzt. Wichtige Einsatzgebiete liegen im Bereich miniaturisierter IKT (z. B. in iPods), aber auch bei Elektro- und Hybridautos.

Neodym war in den letzten Jahren eines der Leitmetalle, die den Abbau von Bastnäsit rentabel gemacht haben. Damit ist indirekt auch die Förderung der begleitenden Seltenen Erden mitbestimmt worden.

5.11.5 Bedarf an Seltenen Erden 2030

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind folgende zusätzliche Rohstoffbedarfe geschätzt worden:

5.11.5.1 Scandium

Tabelle 5-56: Scandiumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2006	Bedarf 2030
SOFC	0	3
Al-Sc-Legierungen für die Flugzeugkonstruktion	-	-
Bedarfssumme	0	3
Bedarf / Rohstoffproduktion 2006	0	2,3

Aufgrund seiner geringen Verfügbarkeit wird Scandium trotz interessanter technischer Eigenschaften nur selten eingesetzt. Alleine der Einsatz in der Brennstoffzelle (SOFC) könnte in dieser Vorausschau das 1 ½ -fache der heutigen Scandiumproduktion aufnehmen. Für den Einsatz von Al-Sc-Legierungen für die Flugzeugkonstruktion ist keine Quantifizierung gelungen. Es ist eher wahrscheinlich, dass auch dieses Segment große Scandiummengen abnehmen könnte, wenn Angebot und Nachfrage aufeinander abgestimmt werden können. Al-Sc-Legierungen aus der Flugzeugkonstruktion sind leicht rezyklierbar, nicht aber das Scandium aus SOFC.

5.11.5.2 Yttrium

Tabelle 5-57: Yttriumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2006	Bedarf 2030
Hochtemperatursupraleitung	0	75
Laser für die Materialbearbeitung	1	8
SOFC	0	2
Bedarfssumme	1	85
Bedarf / Rohstoffproduktion 2006	0	0,01

Für das ausgewählte Segment an Zukunftstechnologien ist Yttrium wenig bedeutsam. Auch bis 2030 wächst es nur bis auf 1 % der heutigen Minenproduktion, vor allem aufgrund der Hochtemperatursupraleitung. Die Rezyklierbarkeit der untersuchten Zukunftstechnologien ist eingeschränkt, fällt aber auch nicht groß ins Gewicht.

Wesentliche zukünftige Anwendungen von Yttrium mit Einfluss auf die Rohstoffnachfrage sind also in etablierten Bereichen und ggf. in anderen Zukunftstechnologien zu sehen.

5.11.5.3 Neodym

Tabelle 5-58: Neodymbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2006	Bedarf 2030
Laser für die Materialbearbeitung	gering	gering
Hochleistungs-Permanentmagnete	4.000	27.900
Bedarfssumme	4.000	27.900
Bedarf / Rohstoffproduktion 2006	0,55	3,82

Das untersuchte Segment der Zukunftstechnologien deckt knapp 55 % des heutigen Neodymbedarfs ab. Diese Menge wird sich bis 2030 dramatisch erhöhen, wenn Hochleistungs-Permanentmagnete insbesondere in Elektromotoren weiterhin ein starkes Marktwachstum haben⁹⁶. Neodym zur Dotierung in Laser-Kristallen ist dagegen mengenmäßig ein untergeordneter Markt, für den 2030 auch nur 0,2 t Neodym benötigt werden.

⁹⁶ Die elektrischen Traktionsmotoren wurden als Teilmarkt der Hochleistungspermanentmagnete analysiert. Um Doppelzählungen zu vermeiden gehen die dort abgeschätzten Mengen hier nicht in die Bestimmung des Faktors Bedarf / Rohstoffproduktion 2006 ein.

Da keine auslaufenden Neodym verwendenden Technologien bekannt sind, ist von dieser Seite keine Entlastung der Neodymnachfrage zu erwarten. Das Recycling von Neodym in Elektromotoren könnte jedoch perspektivisch erheblich zur Deckung der Neodymnachfrage beitragen. Hierfür sind die Voraussetzungen zu schaffen. Sollte der Neodympreis stark steigen, so ist in Teilbereichen auf ein Ausweichen auf Samarium-Magnete zu rechnen, allerdings erreichen sie nicht die Stärke von Nd-Fe-B-Magneten.

Aus der Analyse der Zukunftstechnologien lässt sich ableiten, dass Neodym das wesentliche Target beim Abbau von Seltenen Erden bleiben wird.

5.12 Selen

5.12.1 Eigenschaften

Selen mit dem chemischen Zeichen Se⁹⁷ ist es aufgrund seiner Vergesellschaftung mit Tellur (tellus: Erde) nach der griechischen Mondgöttin Selene benannt.

Selen ist ein Halbmetall, bei Zimmertemperatur von fester Konsistenz und hat ein grau glänzendes Aussehen. Als Festkörper ist es relativ weich (Mohshärte 2). Es hat die Ordnungszahl 34, eine relative Atommasse von 78,96 u, kann die Oxidationsstufen -2, +4 und +6 einnehmen und hat eine relativ geringe Schmelztemperatur von 490° K. Seine Siedetemperatur liegt bei 958,1° K.

Selen steht dem Schwefel chemisch sehr nahe und wird auch in der Natur in Begleitung des Schwefels gefunden. Selen gehört neben Sauerstoff, Schwefel und Tellur zur Gruppe der Chalkogene (Erzbildner), die gemeinsam mit dem instabilen Polonium die VI. Hauptgruppe des Periodensystems der Elemente bilden. Chemisch verhalten sich die Chalkogene überwiegend wie Nichtmetalle. Tellur verhält sich ähnlich wie ein Metall, seine Verbindungen entsprechen aber mehr denen eines Nichtmetalls.

Selen kommt wie Schwefel in mehreren Modifikationen vor⁹⁸:

- ▶ Rotes Selen besteht zu etwa 30 % aus Se₈-Ringen und zu 70 % aus Se_{8+n}, welches sich oberhalb 80 °C in das graue Halbleitermetall umwandelt. Elementares rotes Selen ist ein Isolator.
- ▶ Schwarzes amorphes Selen, das sich oberhalb 60 °C in das schwarze, glasartige Selen umwandelt. Beide Formen wandeln sich beim Erwärmen oberhalb von 80 °C in die graue, halbmimetallische Modifikation um.
- ▶ Graues "metallisches" Selen ist die stabilste Modifikation und verhält sich wie ein Halbmetall. Selen zeigt starke Halbleitereigenschaften nicht nur in idealen Monokristallen, sondern auch in polykristallinen Strukturen.

Das graue, metallische Selen zeigt einen ausgeprägten Photoeffekt. Durch Belichtung ändert es seine elektrische Leitfähigkeit. Während es im Dunkeln ein schlechter Leiter

⁹⁷ Selen wurde 1817 von Jöns Jakob Berzelius im Bleikammerschlamm einer Schwefelsäurefabrik entdeckt.

⁹⁸ Oberhalb des Schmelzpunktes von 220 °C bildet es eine schwarze Flüssigkeit. Der bei weiterer Temperaturerhöhung entstehende Selendampf ist gelb. Bei Abscheidung aus der Dampfphase an einer kühleren Oberfläche (um einiges unter dem Schmelzpunkt) scheidet es sich in Form hexagonaler, metallisch-grauer Kristallnadeln ab.

für elektrischen Strom ist, nimmt seine Leitfähigkeit bei Belichtung um den Faktor Tausend zu⁹⁹. Aufgrund dieses Effekts eignet sich das Metall zur Herstellung von lichtempfindlichen elektronischen Bauteilen wie Photodioden oder Phototransistoren.

Das chemische Verhalten von Selen ist dem Schwefel ähnlich, allerdings ist Selen schwerer oxidierbar.¹⁰⁰ Aufgrund dieser chemischen Ähnlichkeit wird bei manchen biologischen Prozessen nicht zwischen Selen und Schwefel unterschieden.

Selen ist nach Sauerstoff und Schwefel das dritthäufigste Chalkogen. Das Element ist auf der Erde recht selten und mit lediglich 0,05 ppm am Aufbau der Erdkruste beteiligt. Damit besitzt es eine Häufigkeit in derselben Größenordnung wie Silber und Indium. In kleinen Mengen kommt Selen metallisch (gediegen) vor. Bekannte Selen-Mineralien sind Clausthalit und Naumannit, die üblicherweise mit Schwefelmineralien vergesellschaftet sind. Selenide finden sich spurenweise in verschiedenen natürlichen Sulfiden wie Pyrit, Zinkblende und Kupferkies.

5.12.2 Vorkommen

Selen wird vorwiegend als Kuppelprodukt der Kupferraffination gewonnen. Die Reserven liegen bei rund 82.000 t, was eine statische Reichweite von 53 Jahren ergibt.

Tabelle 5-59: Versorgungssituation bei Selen 2006

Reserven:	82.000 t
Ressourcen:	k. A.
Statische Reservenreichweite:	53 Jahre
Statische Ressourcenreichweite:	-
Wichtige Förderländer:	Japan (48 %), Kanada (20 %) und Belgien (13 %)
Länderkonzentration der Reserven:	Herfindahlindex 0,34

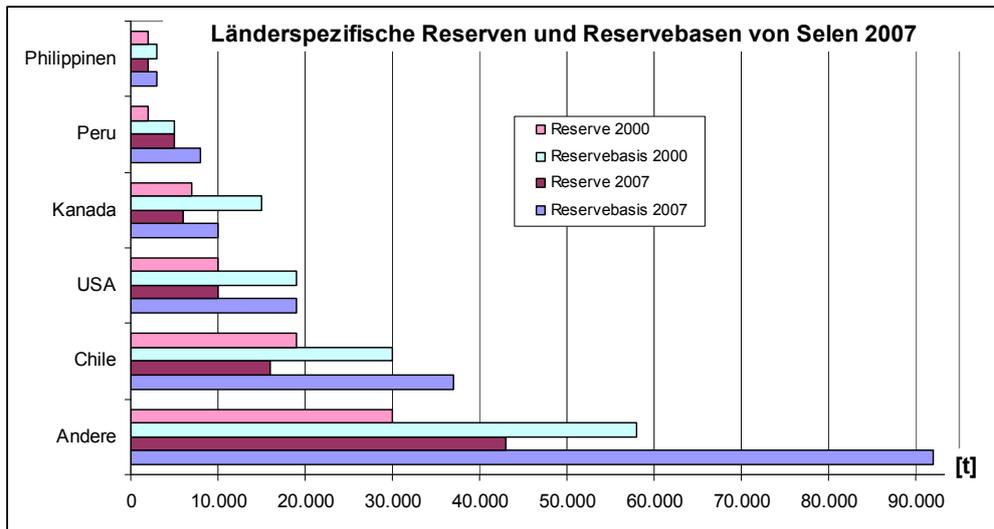
Quelle: USGS 2008 und eigene Berechnungen

⁹⁹ Die Leitfähigkeit wird dabei nicht durch Elektronen in einem Leitungsband verursacht, sondern durch Leitung von Löchern also positiv geladenen Elektronenfehlstellen, wodurch unter anderem das Vorzeichen des Hall-Effekts negativ wird. Als Mechanismus für diese Löcherleitung wird eine so genannte "Hopping-Leitfähigkeit" (der Löcher von einer Kristallfehlstelle zur nächsten) vorgeschlagen.

¹⁰⁰ Beim Erhitzen in Luft verbrennt Selen mit blauer Flamme zum Selendioxyd, SeO_2 . Oberhalb von 400 °C setzt es sich mit Wasserstoff zum Selenwasserstoff, H_2Se , um. Mit Metallen bildet es in der Regel Selenide, zum Beispiel Natriumselenid, Na_2Se . Die Reaktion mit Salpetersäure bildet "nur" selenige Säure, eine Selen(IV)-Verbindung.

Einen detaillierteren Blick auf die geografische Verteilung von Reserven und Reservebasen sowie deren Veränderungen zwischen 2000 und 2007 bietet folgende Abbildung:

Abbildung 5-9: Länderspezifische Reserven von Selen für 2006 und 2007



Quellen: USGS 2008, USGS 2007.

Die wichtigsten Vorkommen liegen in Chile, den USA und Kanada. Die Reserven und die Reservebasis von Selen sind relativ breit gestreut. Insgesamt sind die Angaben zur Reserven und Reservebasis von Selen mit leicht steigender Tendenz nahezu unverändert geblieben. So betrug laut USGS im Jahr 2000 die weltweite Reserve 70.000 t und die Reservebasis 130.000 t. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Reservebasis von Selen auf den identifizieren wirtschaftlich förderwürdigen Lagerstätten von Kupfer basieren. Eine um den Faktor 2,5 höhere zusätzliche Menge an Selen wird für die bis jetzt noch nicht entdeckten Kupfer- und andern Metallerzvorkommen angenommen. Schon in den letzten Jahren wurden bei steigenden Selenpreisen auch die Schlämme aus der Nickel- und Kobaltraffination zur Selenerzeugung genutzt.

5.12.3 Produktion

In der nachfolgenden Tabelle sind die Produktionsdaten der Jahre 2003 bis 2007 (vorläufige Werte) sowie die Preise für Selen aufgeführt:

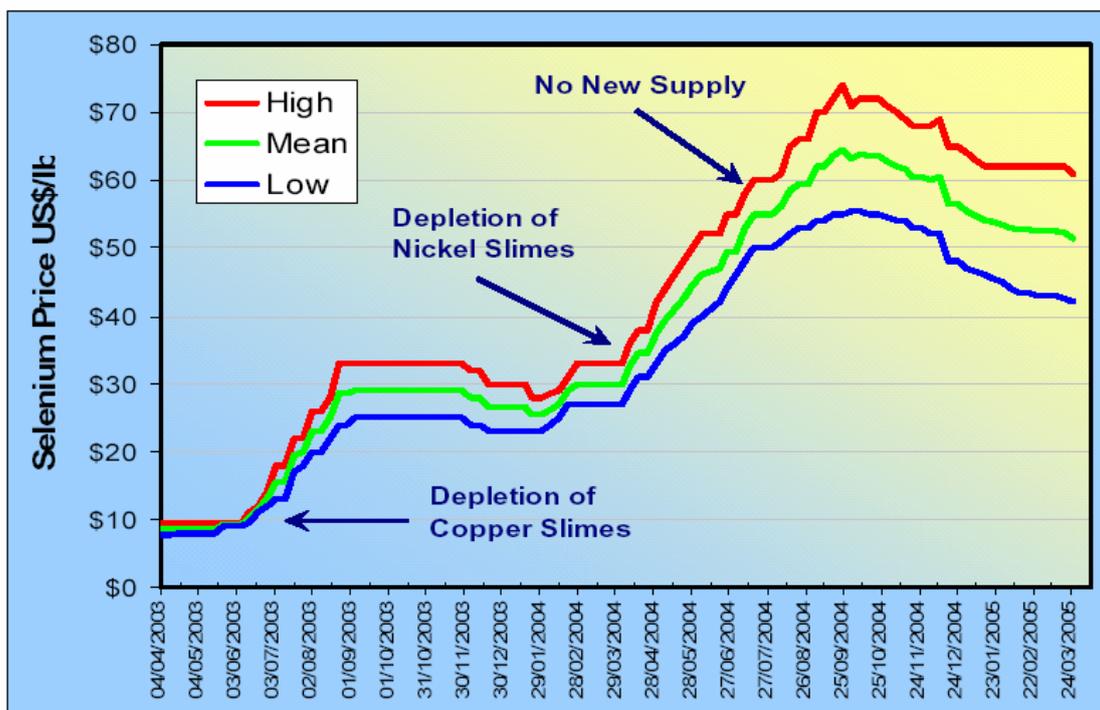
Tabelle 5-60: Weltweite Raffinerieproduktion und Preisentwicklung von Selen

	2003	2004	2005	2006	2007
Globale Raffinerieproduktion in t Selenmetall	1.413	1.323	1.387	1.541	1.550
Preis in US \$/ kg raffiniertes Selenmetall	12,51	54,76	113,30	54,12	72,67

Quellen und Anmerkung: USGS 2008, USGS 2007, USGS 2006a, USGS 2005; Preise für Gebinde zu 100 Pfund umgerechnet auf kg

Der dramatische Anstieg des Selenpreises in 2004 resultiert aus einer hohen Nachfrage nach Selen, die nicht durch entsprechende Angebote bedient werden konnte. Abbildung 5-10 zeigt die Entwicklung des Selenpreises zwischen 2003 und 2005 im Detail.

Abbildung 5-10: Entwicklung des Selenpreises in US \$/lb Selen



Quelle: MetalPrices.com (May 16, 2005), zitiert nach Yukon Zink 2005

Es wird deutlich, dass die Preisschübe durch die Erschöpfung zunächst der Kupfer- und dann der Nickelschlämme erfolgte. Gründe für die Nachfragesteigerung lagen in den großen Einkäufen Chinas in der zweiten Hälfte des Jahres 2003, welche die Bestände der Raffinerien geleert haben. Die Übernachfrage resultiert insbesondere aus der gestiegenen weltweiten Nachfrage nach Konstruktionsglas und elektronischen Pro-

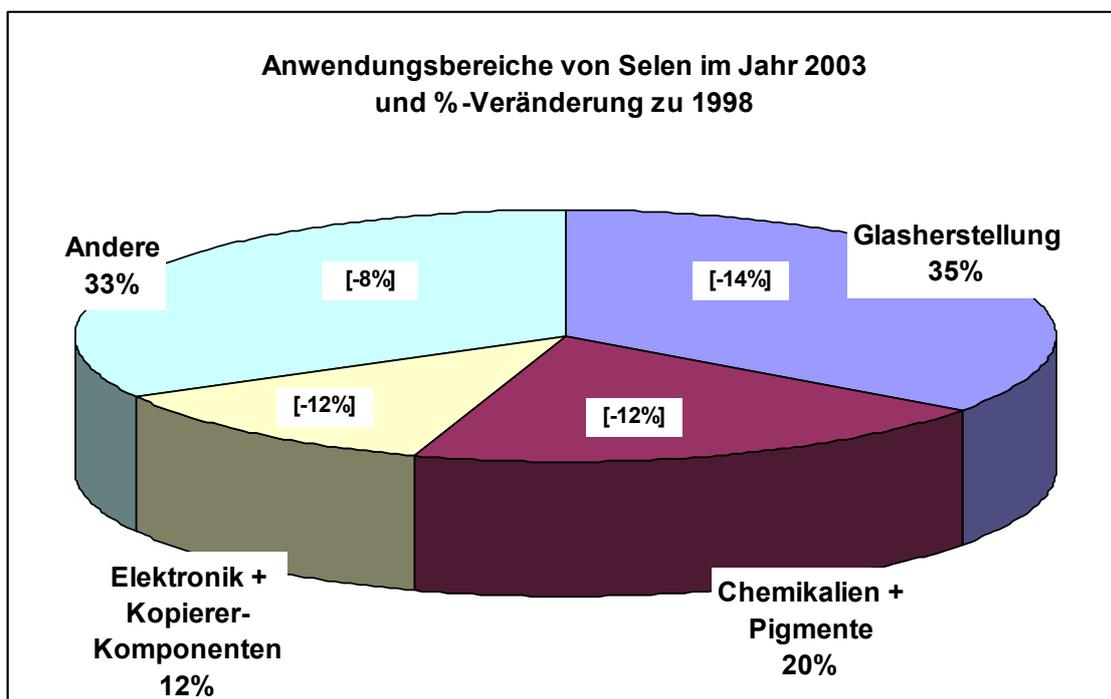
dukten und zum Teil auch durch neue Anwendungen wie PV-Zellen. Da diese hohe Nachfrage anhält und auch nicht durch kurzfristige Angebote vom Spot Markt bedient werden kann, gehen Käufer zunehmend dazu über, langfristige Lieferverträge mit Raffinerien zu schließen. Diese Versorgungslücke wird kurz und mittelfristig solange anhalten bis neue Versorgungsangebote entwickelt worden sind oder die Nachfrage einbricht (vgl. Platts 2004).

Selen wird vor allem in Japan (49 %), Kanada (19 %) und Belgien (13 %) produziert. Nur Kanada besitzt eigene Minen. Die meisten anderen großen Erzeuger stellen Selen aus importierten Erzen her.

5.12.4 Verwendungen

Die folgende Abbildung stellt die wichtigsten Anwendungsfelder von Selen für das Jahr 2003 im Überblick dar (Matos 2005). Die Angaben basieren auf einem Selenverbrauch in Höhe von 424 t im Jahre 2003 und 488 t im Jahre 1998. Aktuellere Aufschlüsselungen liegen nicht vor.

Abbildung 5-11: Anwendungsbereiche von Selen im Jahr 2003



Quelle: Matos 2005

Selen ist für alle Lebensformen essenziell. Selenverbindungen werden daher als Nahrungsergänzung und als Diätpräparat angeboten und zu Futter- und Düngemittelzusätzen verarbeitet.

In der Glasindustrie wird es zum Entfärben grüner Gläser sowie zur Herstellung rotgefärbter Gläser eingesetzt. Ferner wird Selen in architektonischem Flachglas zur Reduktion der Transmission der solaren Wärmestrahlung genutzt.

Traditionell wird Selen in Belichtungsstrommeln für Fotokopierer und Laser-Drucker sowie als Toner für Schwarz-Weiß-Fotografien zur Kontrasterhöhung und zur Haltbarkeitserhöhung sowie zur leichten Färbung der dunklen Bildbestandteile eingesetzt.

Ein weiteres wichtiges Einsatzfeld ist die Verwendung von Selen in der elektrolytischen Manganherstellung zur Erhöhung der Prozessausbeuten.

Weitere Anwendungen von Selen sind:

- ▶ Chemikalien und Pigmente: in Katalysatoren zur Erzeugung selektiver Oxidation, als Bestandteil von Sprengkapseln und Nervenkampfgasen; Latexzusatz zur Erhöhung der Abrasionsbeständigkeit; zur Herstellung roter Farbpigmente für Kunststoffe, keramische Produkte und Spezialgläser auf der Basis von Cadmiumselenid.
- ▶ Elektronikkomponenten: Verwendung in Selen-Gleichrichter und Selen-Zellen, heute allerdings weitgehend durch Silizium (Halbleiter) abgelöst; in analogen Belichtungsmessern für die Fotografie; Halbleiterherstellung; mit Kupfer und Indium Bestandteil der photoaktiven Schicht von CIS-Solarzellen.
- ▶ Metallurgisch: Legierungszusatz zur Verbesserung der mechanischen Bearbeitbarkeit für Automatenstähle und Kupfer-Legierungen; zur Brünierung / Passivierung von Aluminium, Messing o.ä. (Selen-dioxid); metallurgisches Additiv zur Verbesserung der Bearbeitbarkeit von Kupfer-, Blei- und Stahl-Legierungen.
- ▶ Sonstiges: Anti-Schuppen-Haarshampoos und Vorbeugung / Therapie von Pityriasis versicolor, einer durch einen Hefepilz verursachten Hauterkrankung; unterstützend in der HIV-Therapie.

China ist Hauptnachfrager von Selen. Das Land nutzt das Element hauptsächlich als Düngemittel und als Bestandteil der Glasherstellung sowie Selen-Dioxid anstelle von Schwefeldioxid in der Mangan-Raffination. Es wird davon ausgegangen, dass der Selenverbrauch Chinas weiter ansteigen wird, da die Mangannachfrage Chinas weiter wächst.

Zukunftstechnologien

Selen ist als potenziell knapper Rohstoff bei der Analyse der Dünnschicht-Solarzellen CIS identifiziert worden.

5.12.5 Selenbedarf 2030

Tabelle 5-61: Rohstoffbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2007	Bedarf 2030
Dünnschicht-Photovoltaik	1	165
Bedarfssumme	1	165
Bedarf / Rohstoffproduktion 2006	0	0,11

Die durch CIS-Dünnschicht-PV nachgefragte Selenmenge wird bis 2030 ein zusätzlicher wichtiger Selen-Abnehmermarkt. Das Recycling von CIS-Dünnschicht-PV steckt in den Kinderschuhen, so dass hier kein nennenswerter Sekundärrohstoffmarkt zu erwarten ist.

Die Nutzung von Selen in der Glasherstellung wird in Zukunft auf demselben Niveau bestehen bleiben, während die Nutzung in Kopierern durch technische Entwicklungen auslaufen wird. Eine zukünftig zunehmende Anwendung wird in der Nutzung von Selen als Substitut von Blei zur Herstellung von leichter bearbeitbaren Metalllegierungen angenommen. Die Nutzung von Selen in der Düngungskette Pflanze-Tier-Nahrung sowie als Nahrungsergänzungsmittel wird zunehmen. In Gleich- und Wechselrichtern in Hochspannungsanwendungen ist Selen bereits weitgehend durch hoch-reines Silizium substituiert worden. Dasselbe wird für die Zukunft auch für Gleich- und Wechselrichtern im Bereich von Niedrig- und Mittelspannung angenommen. Das frei werdende Selen in konventionellen Anwendungen steht Zukunftstechnologien wie der Dünnschicht-PV zur Verfügung.

5.13 Indium

5.13.1 Eigenschaften

Indium¹⁰¹ hat das chemische Zeichen In und besitzt die Ordnungszahl 49. Indium ist das vierte Element der Borgruppe (III. Hauptgruppe des Periodensystems), zwischen den chemisch verwandten Elementen Gallium und Thallium.

Indium kommt in der Natur nicht elementar vor. Aufgrund seiner geo-chemischen Eigenschaften ist Indium in der Natur mit Elementen aus der I. Nebengruppe (Kupfer, Silber), der II. Nebengruppe (Zink, Cadmium), der IV. Hauptgruppe (Zinn, Blei) und der V. Hauptgruppe (Wismut) des Periodensystems vergesellschaftet. Indium hat zwei natürliche Isotope: ¹¹⁵In (96 %) und ¹¹³In (4 %).

Die größten Konzentrationen erreicht Indium mit bis zu einem Prozent in sulfidischen Erzen. Die wichtigsten Minerale für die Indiumgewinnung sind Zinksulfid (Sphalerit oder Zinkblende), Kupfersulfid (Chalkopyrit oder Kupferkies) und Bleisulfid (Galenit oder Bleiglanz).¹⁰² Zinkblende weist überdurchschnittlich hohe Indiumkonzentrationen auf; allerdings sind die regionalen Unterschiede groß¹⁰³.

Physikalisch ist Indium ein kristallines, silbrig weißes und sehr weiches Metall (1½ Mohs), das bei Zimmertemperatur mit dem Messer geschnitten werden kann. Es besitzt eine hohe Duktilität und leichte Kaltformbarkeit. Als Legierungsbestandteil steigert Indium bereits in geringeren Konzentrationen die Härte und die Korrosionsbeständigkeit. Indium besitzt mit 429,75 K einen niedrigen Schmelzpunkt. Sein Siedepunkt ist dagegen mit 2.353,15 K relativ hoch.

Chemisch wird metallisches Indium bei Raumtemperatur nicht durch Luftsauerstoff oxidiert. Es reagiert jedoch bei Erwärmung direkt mit Arsen, Antimon, Halogenen, Sauerstoff, Phosphor, Schwefel, Selen und Tellur. Erst bei hohen Temperaturen verbrennt Indium mit Sauerstoff zu Indium-(III)-Oxid. In schwachen mineralischen Säuren löst sich Indium nur sehr langsam. Die Löslichkeit erhöht sich rasch bei Erwärmung und niedrigerem pH-Wert.

¹⁰¹ Der Name Indium rührt von der indigo-blauen Linie dieses Elements in der Spektralanalyse her.

¹⁰² Die Indium-Mineralien Indit (Eisenindiumsulfid, FeIn₂S₄), Lafonit (Silberindiumsulfid, AgInS₂) und das wohl am häufigsten vorkommende Roquésit (Kupferindiumsulfid, CuInS₂) spielen technisch keine Rolle, da sie zwar weitverbreitet, aber unter derzeitigen ökonomischen Rahmenbedingungen nicht abbauwürdig sind.

¹⁰³ Die weltweit höchsten Indiumkonzentrationen wurden in Zink- und Silbererzen im Erzgebirge nachgewiesen (Seifert, Sandmann 2006).

Der Gehalt an Indium in der Erdkruste wird auf etwa 0,05 ppm für die kontinentale und 0,072 ppm für die ozeanische Kruste geschätzt. Damit liegt Indium an 68. Stelle der Elementhäufigkeit, direkt hinter Silber.

5.13.2 Vorkommen

Indium wird gewöhnlich aus Zinksulfiderzen über die Zinkraffination gewonnen. Die Angaben zu den Indiumreserven basieren deshalb meist auf dem Indiumgehalt von Zinkerzen. Insgesamt sind die Angaben zu Indiumreserven sehr unsicher. Die Versorgungssituation bei Indium zeigt die Tabelle.

Tabelle 5-62: Versorgungssituation bei Indium 2006

Reserven:	2.800 t (2007: 11.000 t)
Ressourcen:	k. A.
Statische Reservenreichweite:	5 Jahre (2007: 19 Jahre)
Statische Ressourcenreichweite:	k. A.
Wichtige Förderländer:	China, Republik Korea, Kanada und Japan (zusammen 85 %)
Länderkonzentration der Reserven:	Herfindahlindex 0,59

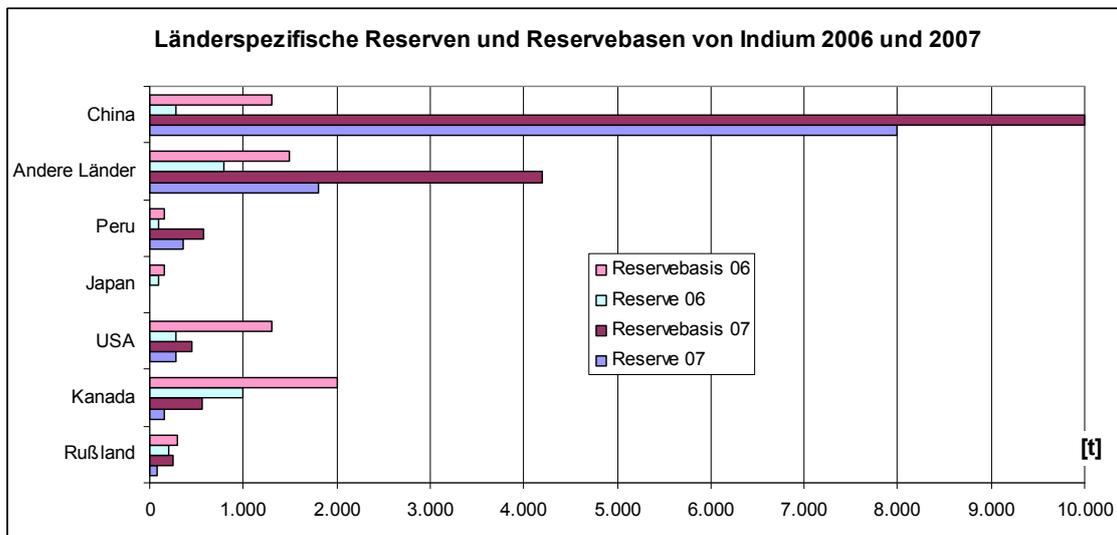
Quellen: USGS 2008, USGS 2007 und eigene Berechnungen

Die statische Reichweite der Reserven von Indium lag 2006 bei nur fünf Jahren; 2007 erholte sie sich auf knapp 19 Jahre. Insgesamt unterliegen die Angaben über Reserven und Reservenbasen von Indium starken zeitlichen Schwankungen. Diese Schwankungen ergeben sich unter anderem aus der Neubewertung bislang nicht quantifizierter Reserven und Reservenbasen, der Erschließung neuer Vorkommen und aus der erheblichen Preisvolatilität von Indium.

Nach USGS lagen die Indiumreserven im Jahr 2006 bei 2.800 t, im Folgejahr aber bereits bei 11.000 t. Hauptgrund für diesen Anstieg sind die Reservenangaben für China, die von 1.000 t auf 8.000 t gestiegen sind. Die Reserven von Kanada sind dagegen im gleichen Zeitraum von 1.000 t auf 150 t reduziert worden (USGS 2007, USGS 2008).

Die folgende Abbildung stellt die unterschiedlichen länderspezifischen Angaben des USGS über die Reserven und Reservenbasen in den Jahren 2006 und 2007 dar.

Abbildung 5-12: Länderspezifische Reserven von Indium für 2006 und 2007



Quellen: USGS 2008, USGS 2007

Mit einem Herfindahlindex von 0,59 sind die Indiumreserven stark konzentriert, was vor allem auf die hohen Reserven in China zurückzuführen ist.

5.13.3 Produktion

Die Produktion von Indium ist aufgrund seiner volatilen Preisentwicklung Schwankungen unterworfen. Tendenziell nimmt die Produktion jedoch stetig zu. Die folgende Tabelle stellt die Entwicklungen bei Produktionsmenge und Preis dar:

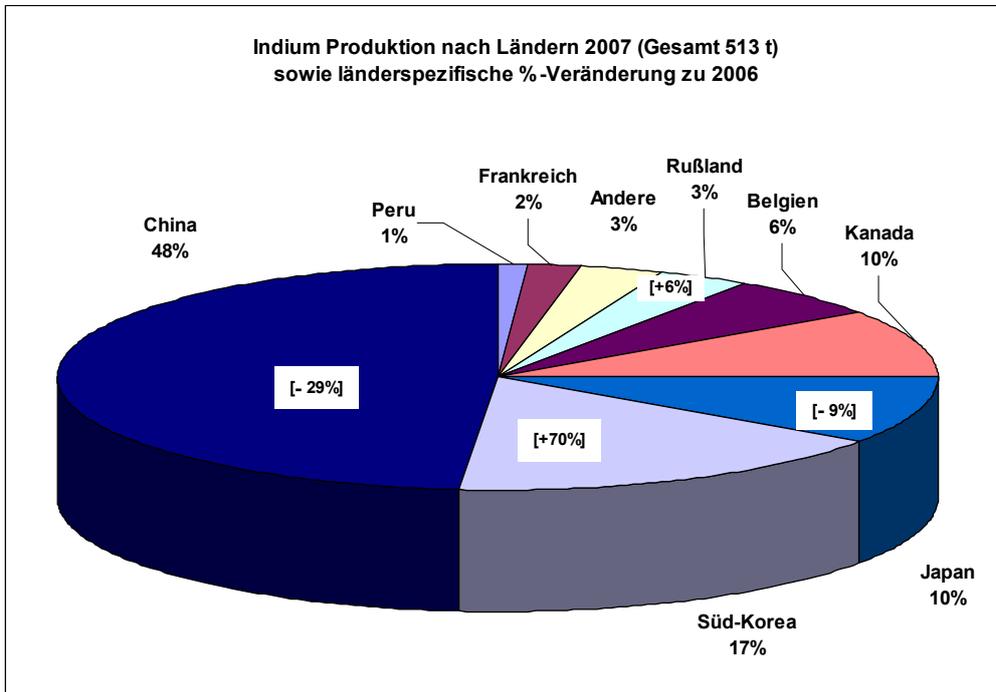
Tabelle 5-63: Weltweite Raffinerieproduktion und Preisentwicklung von Indium

	2003	2004	2005	2006	2007
Globale Raffinerieproduktion in t Indiummetall	370	405	500	580	510
Preis in US \$/kg Indiummetall	170	643	827	918	795

Quellen und Anmerkung: USGS 2008, USGS 2007, USGS 2006a, USGS 2005; Indium Corporation's price for 99.97 % purity metal; 1-kg bar in lots of 10,000 troy ounces

Die Erzeugerländer von Indium sind relativ breit gestreut. Aufgrund der Herstellung von Indium als Kuppelprodukt der Zinkherstellung finden sich unter den Erzeugerländern vor allem diejenigen Länder, die über eine Zinkraffination verfügen.

Abbildung 5-13: Länderspezifische Verteilung der Indiumproduktion 2007

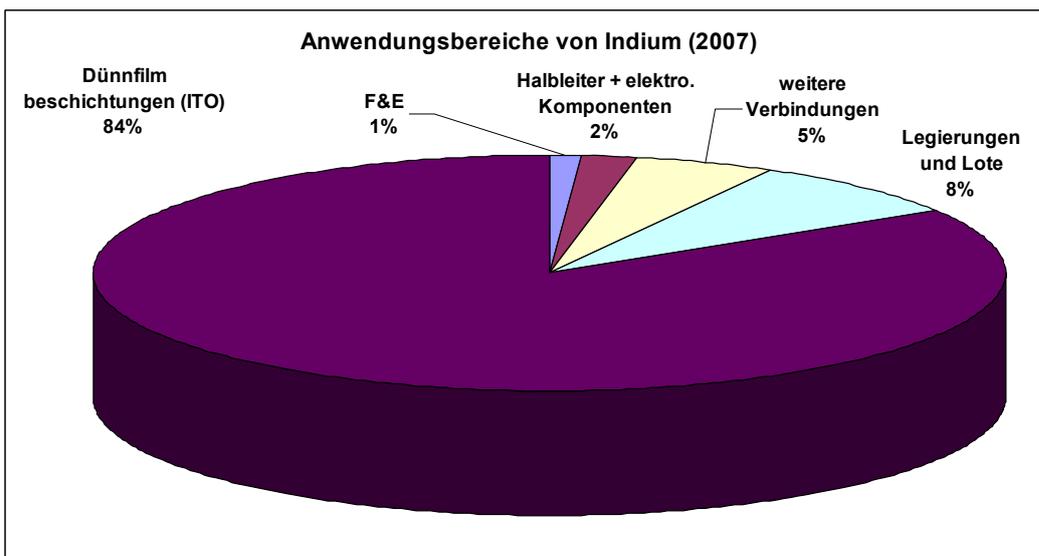


Quelle: USGS 2008: Indium.

5.13.4 Verwendungen

Die folgende Abbildung stellt die wichtigsten Anwendungsfelder von Indium für das Jahr 2007 im Überblick dar.

Abbildung 5-14: Anwendungsbereiche von Indium im Jahr 2007



Quelle: USGS 2008: Indium.

ITO: Der Großteil des weltweit produzierten Indiums wird in Indium-Zinn-Oxid (ITO) gebunden. Die Verbindung Indiumoxid und Zinnoxid ist leitfähig wie Metall und dennoch transparent, darüber hinaus hitzeabweisend. Es lässt als dünne Schicht sichtbares Licht im Wellenlängenspektrum zwischen 0,4 und 0,8 μm durch. Aufgrund dieser besonderen Eigenschaft hat ITO bei der Herstellung von LCDs hohe Bedeutung erlangt. LCDs wiederum finden sich neben den Großsegmenten Flachbildschirme und Mobilfunk in einer sehr breiten Produktpalette der IuK-Industrie.

Photovoltaik: Die Photovoltaik-Branche verbraucht zwar nur einen Bruchteil des verfügbaren Indiums und ist daher statistisch noch der Halbleiteranwendung zugeordnet, doch sind hier erhebliche Wachstumspotenziale zu erwarten. Insbesondere in Deutschland wird die so genannte Kupfer-Indium-Selenid bzw. Sulfid (CIS-Zelle) erforscht. Es handelt sich um ein hochabsorbierendes Halbleitermaterial, welches aufgrund der im Vergleich zur herkömmlichen polykristallinen Zellen zehnmal dünneren Absorberschicht, welche zudem noch direkt auf Fensterglas aufgedampft werden kann, besonders energie- und ressourceneffizient und somit kostengünstig hergestellt werden kann. Eine weitere photovoltaische Anwendung von Indium findet sich in den Cadmium-Tellurid-Zellen, in denen Indium wie bei den LCDs als 200 nm starke Dünnschicht eingesetzt wird, die das Licht zur eigentlichen Cadmium-Tellurid Zellen durchlässt.

Halbleiterapplikationen: Insgesamt 12 % des Indiums werden in allerhöchster Reinheitsstufe (99,9999 %) in diesem Bereich eingesetzt. Abnehmer ist hier vor allem die Elektrotechnik. Neben der CIS-Solarzelle findet sich Indium auch als beigemischtes Element in Germanium- und Galliumhalbleitern. Als Aluminium-Indium-Gallium-Phosphid und als Indium-Gallium-Nitride wird Indium auch zur Herstellung von Leuchtdioden in unterschiedlichen Farben verwendet.

Legierungen: Als Legierungsbestandteil wird Indium zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit und zur Herabsetzung des Schmelzpunktes eingesetzt. Ein potenzieller Markt besteht auch bei bleifreien Spezialloten aus Indium, Zinn und Silber, da in Europa, Japan und Nordamerika zunehmend umweltrechtliche Restriktionen gegen bleihaltige Lote entwickelt werden. In der Zahnmedizin wird Indium den Gold-Palladium-Dentallegierungen beigemischt um deren Verarbeitbarkeit zu verbessern. Weitere Legierungsanwendungen von Indium finden sich in Indium-Gallium-Legierungen in Hochtemperaturthermometer sowie Silber-Indium-Cadmium-Legierungen in nuklearen Steuerstäben.

Sonstiges: Neben Indiumzinnoxid werden weitere chemische Verbindungen von Indium mit Nichtmetallen für die Industrie benötigt. Beispiele hierfür sind Indiumborate, Indi-

umnitrate, Indiumsulfide bzw. -sulfate oder Indium(hydro)oxide. Die Anwendungszwecke sind mannigfaltig, wie z. B. Spezialbatterien oder Infrarot-Reflektoren. Weitere Verwendung findet Indium in *Dichtungen* und *Überzügen* auf Blei-, Stahl- oder Cadmiumgleitlagern zur Erhöhung der Resistenz gegen Oberflächenabrieb. Schließlich ist vor dem Hintergrund der geringen Gesamtproduktionsmengen von Indium auch der Verbrauch von Indium für *Forschung und Entwicklung* von Relevanz.

Zukunftstechnologien

Schon die heutige Verwendungsstruktur von Indium wird stark von Zukunftstechnologien dominiert. Mit Blick auf zukünftige Rohstoffbedarfe sind vor allem folgende Zukunftstechnologien, in vermutlich abnehmender Rangfolge, hervorzuheben:

- ▶ ITO auf Displays
- ▶ CIS Dünnschicht-Solarzellen
- ▶ InGaN in Weißer LED

Aufgrund der Dominanz von Zukunftstechnologien an der Verwendungsstruktur von Indium eignet sich dieser Rohstoff in besonderem Maße für die Abschätzung des Rohstoffbedarfs durch Zukunftstechnologien.

5.13.5 Indiumbedarf 2030

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind folgende zusätzliche Rohstoffbedarfe geschätzt worden:

Tabelle 5-64: Indiumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2006	Bedarf 2030
Dünnschicht-Photovoltaik	1	285
ITO auf Displays	230	1.580
Weißer LED	3	46
Bedarfssumme	234	1.911
Bedarf / Rohstoffproduktion 2006	0,40	3,29

Das untersuchte Segment der Zukunftstechnologien deckt 40 % des heutigen Indiumbedarfs ab. Alleine diese Menge wird bis 2030 nach der vorliegenden Schätzung auf das mehr als Dreifache der gesamten heutigen Indiumproduktion anwachsen.

Das größte Mengenwachstum der untersuchten Zukunftstechnologien bis 2030 ist beim essenziellen Einsatz von Indium für ITO auf Displays zu erwarten, gefolgt von

CIS-Dünnschicht-PV und WLED. Starkes Wachstum ist auch bei zahlreichen anderen Zukunftstechnologien wie z. B. der Blue Ray DVD zu erwarten.

Die von Zukunftstechnologien dominierte Verwendungsstruktur von Indium und die eingeschränkte Rezyklierbarkeit lassen fortgesetzt starke Nachfrageimpulse auf die Primärrohstoffgewinnung erwarten. Aufgrund der ressourcen-ökonomischen Besonderheiten von Indium sind zur Erklärung der Entwicklungen bei Preisen und Reserven bzw. Reservenbasen die Verfügbarkeit, Produktion und Verwendung von Zink zu berücksichtigen.

5.14 Germanium

5.14.1 Eigenschaften

Germanium hat das chemische Zeichen Ge und die Ordnungszahl 32. Germanium ist das 3. Element der 4. Hauptgruppe des Periodensystem. Es steht im Periodensystem zwar in der Serie der Halbmetalle, wird aber nach neuerer Definition als Halbleiter klassifiziert. Von Germanium gibt es eine Reihe natürlicher Isotope (^{70}Ge bis ^{74}Ge)¹⁰⁴.

Elementares Germanium ist ein grauweiß glänzender, in Form von Oktaedern ausgezeichnet kristallisierender, sehr spröder Festkörper (Mohshärte 6) mit einem Schmelzpunkt bei 938,3 °C und einem Siedepunkt bei 2.820 °C. Seine Struktur entspricht der des ebenfalls kubisch kristallisierenden Diamanten. Germanium weist als einer der wenigen Stoffe die Eigenschaft der Dichteanomalie auf. Seine Dichte ist in festem Zustand niedriger als in flüssigem Zustand. Beim Erwärmen über den Schmelzpunkt steigt die Dichte von Germanium um 4 % an, beim Erstarren dehnt sich das Volumen um 6 % aus.

Germanium ist relativ reaktionsträge und ähnelt in seinem chemischen Verhalten dem Silizium. Germanium tritt 2- und 4-wertig auf. Die Ge(IV)-Verbindungen sind am beständigsten. An der Luft und bei Raumtemperatur ist es sehr beständig. Erst bei starkem Glühen in einer Sauerstoff-Atmosphäre oxidiert es als sandiges weißes Pulver zu Germanium(IV)-oxid (GeO_2)

In seiner bevorzugte Oxidationsstufe +4 hat Germanium die Eigenschaften eines Halbleiters der den elektrischen Strom leitet. Die elektrische Leitfähigkeit beträgt nur 0,00034 % des Silbers. Dabei sinkt sein elektrischer Widerstand beim Erwärmen und steigt mit zunehmender Reinheit. Beim Dotieren mit Fremdatomen, z. B. mit Aluminium oder Antimon, kann die Leitfähigkeit ebenfalls erhöht werden. Wird ein Germanium-Kristall mit Gallium dotiert, besteht ein Elektronenloch (*p*-Halbleiter); dotiert man es dagegen mit Arsen, entsteht ein überschüssiges Elektron (*n*-Halbleiter).

Germanium ist zwar verbreitet, kommt aber nur in sehr geringen Konzentrationen vor. Sein Anteil am Aufbau der Erdkruste wird auf 0,0006 Gewichtsprozent geschätzt. Damit liegt Germanium an 53. Stelle der Elementhäufigkeit.

¹⁰⁴ Außerdem existiert eine Reihe radioaktiver Isotope (^{65}Ge bis ^{78}Ge) mit Halbwertszeiten zwischen 20 Millisekunden und 288 Tagen.

5.14.2 Vorkommen

Traditionell dient zur Darstellung von Germanium das südafrikanische Mineral Germa- nit, in dem es in Konzentrationen bis zu 8 % vorliegt. Weitere wichtige Germanium- Mineralien sind Argyrodit, Canfieldit und Reniérit. Daneben sind noch Maikainit und Ovamboit bekannt.

Germanium ist oft vergesellschaftet mit Kupfer- und Zinkerzvorkommen und findet sich überwiegend in Mineralien der Klasse der Sulfide und Sulfosalze. In Deutschland sind die bekanntesten Germanium führenden Erze, der Mansfelder Kupferschiefer und die Freiburger Zinkblende.

Tabelle 5-65: Versorgungssituation bei Germanium 2006

Reserven:	450 t (nur USA)
Ressourcen:	k. A.
Statische Reservenreichweite:	unbekannt
Statische Ressourcenreichweite:	unbekannt
Wichtigste Produktionsländer 2006:	USA, Russland, China
Länderkonzentration der Reserven:	Herfindahlindex unbekannt

Quelle: USGS 2008, USGS 2007

Die Daten zu den Reserven beziehen sich nur auf die USA. Die angegebenen Daten berücksichtigen nur Germaniumgehalte in Zinkerzen. Die Germaniumgehalte in Erzen anderer Metalle wie Blei und Kupfer sowie Germaniumgehalte in den Flugstäuben und Aschen der Kohleverbrennung sind bei den Reserven ebenfalls nicht berücksichtigt.

Auffällig ist, dass die Schätzungen über die verfügbaren Reserven in den USA für Germanium konstant sind. So wird bereits in den USGS Mineral Commodity Summaries 1997 von Reserven gleicher Menge ausgegangen.

5.14.3 Produktion

Tabelle 5-66: Weltweite Raffinerieproduktion und Preisentwicklung von Germaniummetall

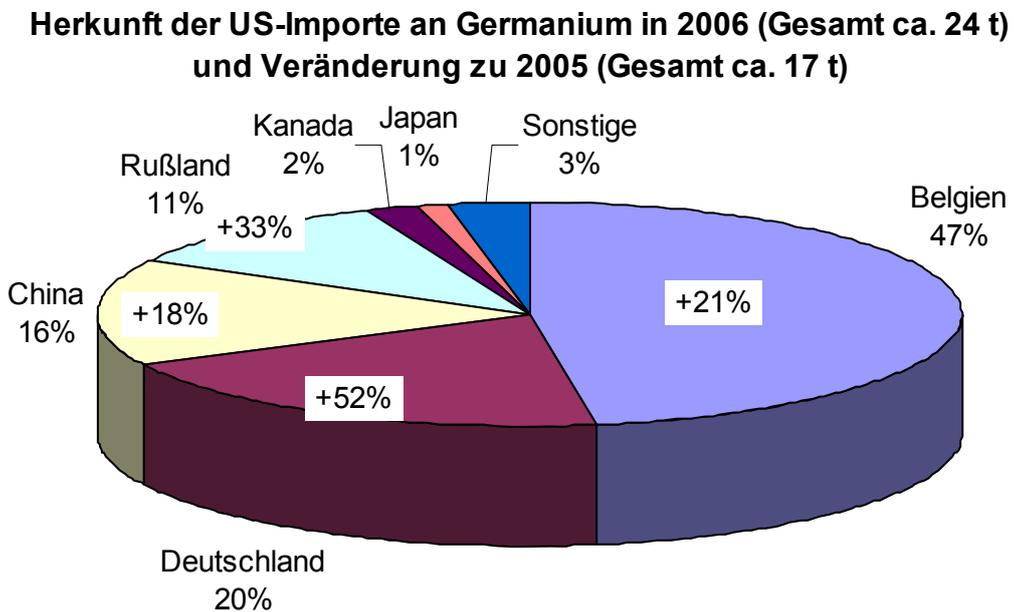
	2003	2004	2005	2006	2007
Globale Raffinerieproduktion in t Germaniummetall	44	87	90	90	100
Preis in US \$/kg Germaniummetall	380	600	660	950	1.240

Quellen und Anmerkung: Kelly et al 2007, USGS 2008, USGS 2007, USGS 2006a, USGS 2005; jährlicher Produzentenpreis in US \$ pro kg Schmelzzonen-Germanium.

Die Nachfrage nach Germanium ist in den letzten Jahren erheblich angestiegen. In dessen Folge ist seit ca. 2005 ein Versorgungsengpass entstanden, der zu entsprechenden Preissteigerung geführt hat. Für das Jahr 2007 wird aufgrund steigender Produktionsmengen und Recyclingaktivitäten von einer Verbesserung der Versorgungssituation ausgegangen. Insbesondere das Recycling von germaniumhaltigen Neuschrotten hat sich zu einem spürbaren Versorgungsfaktor entwickelt. Gleichwohl hinkt die Primärproduktion hinter dem Verbrauch zurück. Für die Zukunft wird angenommen, dass primäres Germanium die zukünftigen Bedarfe decken wird. Zusätzlich ist zu beobachten, dass die gestiegenen Preise zu einem verstärkten Interesse an der Gewinnung von Germanium aus der Flugasche der Kohleverbrennung führen.

USGS gibt an, dass ca. 5 % der weltweiten Germaniumherstellung in den USA erfolgt. Die restlichen 95 % werden nicht weiter differenziert, sondern lediglich unter der Gruppe "Other Countries" subsumiert. Eine Anhaltspunkt, wer sich hinter der Kategorie "Andere Länder" verbirgt, ergibt sich aus den Herkunftsländern der US-Importen an Germanium. Folgende Abbildung stellt die Verteilung dieser Herkunftsländer für das Jahr 2006 sowie die Veränderung gegenüber dem Jahr 2005 dar.

Abbildung 5-15: Herkunftsländer US-amerikanischer Germaniumimporte



Quelle: USGS 2006b

Die aufgetragenen Importdaten umfassen bearbeitetes und unbearbeitetes Germanium sowie germaniumhaltiger Abfälle und Schrotte. Auffällig ist, dass die US-Importe von Germanium zwischen den Jahren 2005 und 2006 insgesamt um ca. 30 % zugenommen haben. Dabei haben alle Herkunftsländer Zuwächse zu verzeichnen.

Die folgende Abbildung illustriert die Entwicklung von Preis und Produktionsmengen für Germanium im Langzeitverlauf.

Abbildung 5-16: Weltweite Raffinerieproduktion und Preisentwicklung von Germaniummetall in der Langfristperspektive



Quelle und Anmerkung: Kelly et al. 2007. Die Daten basieren auf der Berichterstattung für die USGS Minerals Yearbooks

Insbesondere die Preisentwicklung zeigt ausgeprägte Schwankungen, die binnen Jahresfrist bis zu 100 % betragen.

Technisch wird Germanium heutzutage fast ausschließlich als Nebenprodukt bei der Gewinnung anderer Metalle (Zn, Cu, Pb) oder aus Flugasche bzw. Flugstäuben hergestellt. Überwiegend erfolgt die Herstellung aus den GeO_2 -haltigen Rauchgasen der Zinkerzaufbereitung. Die Anreicherung von Germanium zu Konzentraten daraus ist relativ aufwändig, außerdem ist der weltweite Jahresbedarf an Germanium so gering, dass nur in wenigen Minen eine Verarbeitung von Zinkerzen hin zu Germaniumkonzentraten erfolgt.

Zinkvorkommen mit hohen Germaniumgehalten, die auch zur Germaniumherstellung genutzt werden, existieren in den USA (Ruby Creek in Alaska und Apex in Utah), Russland und China. In Namibia (Tsumeb-Komplex im Otavi-Bergland), Kongo (Kipushi) und Sambia (Kabwe) existieren zudem Zinkerze in schichtgebundenen Lagerstätten in massiver Form mit hohen Germaniumanteilen sowie zusätzlich größere Mengen an Germaniummineralen. Die Gewinnung von Germanium wurde dort allerdings bislang nicht betrieben, die lagernden Schlacken der letzten 50 Jahre Zinkerzverarbeitung sind

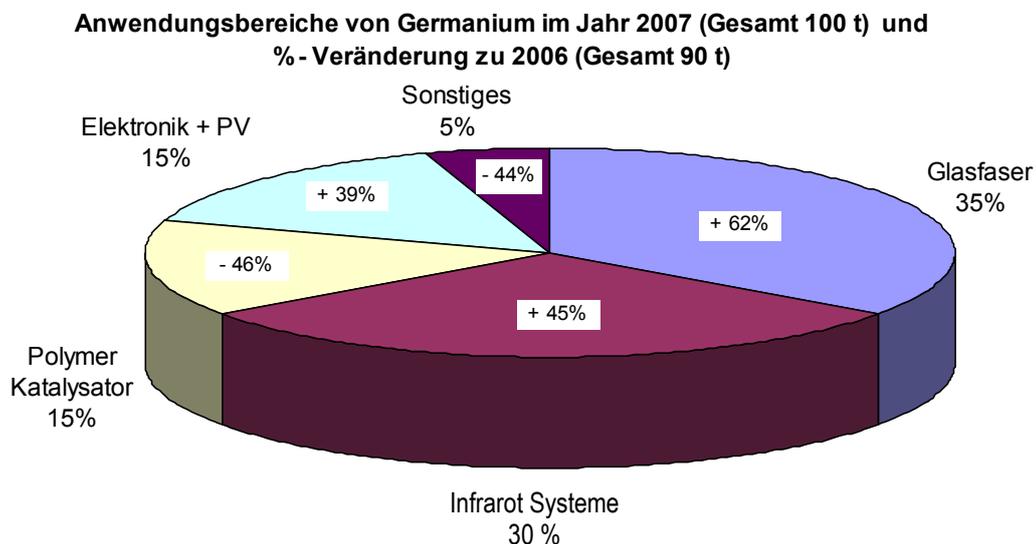
aber sowohl im Tsumeb-Komplex als auch in Kipushi mit Germanium und Gallium angereichert¹⁰⁵.

Weltweit werden ca. 30 % des genutzten Germaniums aus Recyclingmaterial hergestellt. Während der Herstellung von optischen Anwendungen werden ca. 60 % des eingesetzten Germaniums als Neuschrott recycelt.

5.14.4 Verwendungen

Die folgende Abbildung stellt die wichtigsten Anwendungsfelder von Germanium für das Jahr 2007 sowie die jeweiligen Veränderungen zum Vorjahr dar.

Abbildung 5-17: Anwendungsbereiche von Indium im Jahr 2007

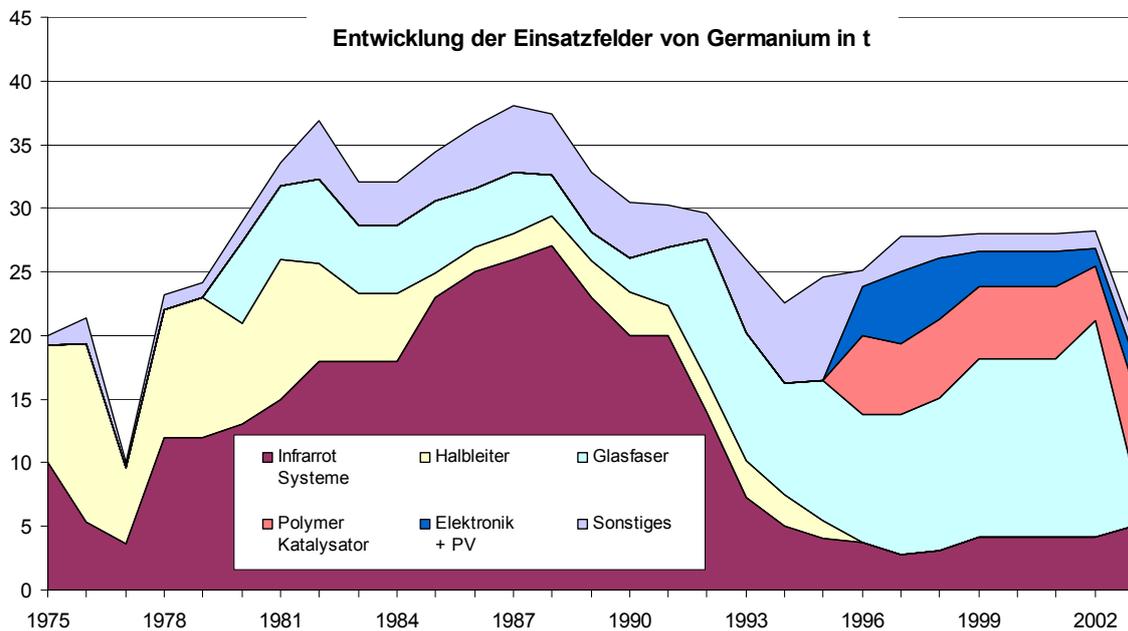


Quellen: Kelly et al 2007

Die folgende Abbildung stellt die Entwicklung der Einsatzfelder von Germanium über einen längeren Zeitraum dar:

¹⁰⁵ Die Firma ZincOx aus Großbritannien hat in 2002 insgesamt 2,9 Millionen Tonnen Tsumeb-Schlacken für die Extraktion von Gallium, Germanium und Indium erworben. Die Gehalte an Germanium in den Schlacken liegen bei durchschnittlich 180 ppm. Der prozentuale Anteil an gewinnbarem Germanium wird mit 94 % angegeben.

Abbildung 5-18: Entwicklung der Einsatzfelder von Germanium



Quelle: Matos et al 2005b

Dotiert mit geringen Mengen an Arsen, Gallium, Indium, Antimon oder Phosphor wird Germanium in Transistoren für zahlreiche elektronische Bauteile eingesetzt. In dieser Anwendung wird es jedoch zunehmend durch Silizium oder GaAs ersetzt. Zur Herstellung von Germanium-Dioden und Transistoren benötigt man Germanium-Einkristalle mit weniger als 10 – 100 Atomteilen Fremdstoffgehalt. Der Vorteil sind die um über 50 % kleineren Durchlassspannungen als bei der Verwendung von Silizium. Dennoch findet sich Germanium als Halbleiter heute zunehmend nur noch in Spezialanwendungen. Dazu zählen Transistoren in musikalischen Effektgeräten¹⁰⁶, in Photodioden, als SiGe-Verbindungshalbleiter in Dioden und anderen Spezialanwendungen der Hochfrequenztechnik in Breitband-Verstärkern mit Silizium-Germanium-Transistoren. In Zukunft könnte Germanium durch die neue Germanium-Kohlenstoff-Silizium-Technologie als Halbleitermaterial erneut an Bedeutung gewinnen. Dies gilt insbesondere für integrierte Schaltungen in Hochgeschwindigkeitsanwendungen, da die Eigenschaften von Si-SiGe-Verbindungen wesentlich schnellere Schaltungen ermöglichen.

Aufgrund einer für Halbleiter eher unüblich schmalen Bandlücke im Infrarot-Bereich, sind sowohl Germanium als auch Germaniumoxid (GeO) transparent für infrarotes Licht. Daher werden sie in der Infraroptik in Form von Fenstern und Ge-Linsen-

¹⁰⁶ Ziel ist das Erreichen so genannter Vintager Effekte wie z. B. der unverwechselbare "fuzz"-Ton, wie er für die frühe Rock and Roll Ära kennzeichnend war.

Systemen aus poly- oder monokristallinem Germanium sowie optischen Gläsern mit Infrarotdurchlässigkeit – so genannte Chalkogenidgläsern – eingesetzt. Zudem lassen sich germaniumhaltige Gläser und Linsen leicht schneiden und polieren. Typische infraroptische Anwendungen auf Germanium-Basis sind extrem leistungsfähige Infrarot-Spektroskopen und –Detektoren oder militärische und zivile Infrarot-Nachtsichtgeräte. Germanium wird ferner in Thermografiekameras im Arbeitsbereich von 8 – 14 μm Wellenlänge eingesetzt. Eingesetzt werden solche Kameras, um Wärmebilder zur Identifizierung von Wärmeverlusten zu erzeugen, im militärischen Sektor oder bei der Waldbrandbekämpfung. Aufgrund des hohen Refraktionsindex von 4,0 des germaniumhaltigen Linsenmaterials sind allerdings sehr harte Anti-Reflexions Beschichtungen (DLC) notwendig. Der hohe Refraktionsindex führt auch zum Einsatz in Linsen für Weitwinkel-Objektive von Kameras und in Linsen von Mikroskopen.

Das hohe Refraktionsvermögen von Germanium wird in Lichtwellenleitern (Glasfasern) für die Telekommunikation ausgenutzt. Dafür wird bei der Herstellung von Lichtwellenleitern im Inneren des 125 μm dicken SiO_2 Quarzglas ein "Kern" mit etwa 10 % GeO_2 eingebaut, um die Lichtreflexion im Leiter zu erhöhen. Eine andere Möglichkeit ist es, mit Hilfe von Germaniumtetrachlorid eine Germaniumdioxid-Beschichtung des inneren Faserkerns zur Erreichung der Totalreflexion von Lichtwellen herbeizuführen.

Germanium ist als nützlicher Legierungsbestandteil zwar schon länger bekannt, hat aber keine weite Verbreitung gefunden. So verdoppelt beispielsweise ein 0,35 %iger Germanium-Zusatz die Härte von Zinn. In letzter Zeit hat allerdings die Nutzung von Germanium in Legierungen von Edelmetallen zugenommen¹⁰⁷.

In der Polyesterchemie kommt Germaniumdioxid als Katalysator bei der Herstellung von bestimmten nicht vergilbenden Polyesterfasern und -granulaten zum Einsatz, speziell für recyclingfähige PET-Flaschen (PET = Polyethylenterephthalat).

In der Photovoltaik wird Germanium als Substrat oder in Wafern als Siliziumersatz in Hochleistungszellen genutzt. Für Solarzellen aus Galliumarsenid (GaAs) werden überwiegend Wafer aus Germanium als Trägermaterial verwendet. Denn die Gitterkonstan-

¹⁰⁷ In Legierungen von Sterling Silber führt der Zusatz von Germanium zur Erhöhung der Oxidationsbeständigkeit (kein "Anlaufen"), erleichtert die Metallhärtung und reduziert die insbesondere bei Silber-Kupfer Mischungen auftretende so genannte Feuerbeize. In derartigen Legierungen von Sterlingsilber liegt der Germanium Anteil bei 1,2 %. Ebenfalls im Bereich der Legierung von Edelmetallen ist die Nutzung der 12 %igen Germanium-Gold-Legierung, die aufgrund ihres günstigen Schmelzpunktes von 359 °C von Juwelieren als Lot für die Herstellung von Edelmetallschmuck genutzt wird. Die gleiche Legierung wird auch in der Halbleiterindustrie zum Aufdampfen von Kontakten verwendet.

te von Germanium ist der von Galliumarsenid sehr ähnlich, so dass GaAs epitaktisch¹⁰⁸ auf Germanium-Einkristallen aufwächst. Auch wenn Wafer aus Germanium erheblich zerbrechlicher sind als Wafer aus Silizium, weist Germanium häufig bessere Eigenschaften als das verwandte Silizium auf. So haben Solarzellen aus Germanium beispielsweise deutlich höhere Wirkungsgrade von bis zu 40 %. Als so genannte multijunction Zellen (Stapelzellen) werden sie insbesondere in Satelliten und in der Raumfahrt eingesetzt, wo geringer Flächenverbrauch, hohe Effizienz und sichere Stromversorgung gefordert sind.

Hochreines Germanium wird als Einkristall in der Gammaskopie zum Nachweis von Gammastrahlung genutzt. Einsatz finden derartige Strahlungsdetektoren z. B. in der Flugsicherung oder in der physikalischen Grundlagenforschung bei der Suche nach der schwarzen Materie.

Die Germanium-organischen Verbindungen gewinnen in der Nahrungsergänzung und medizinischen Nutzung zunehmend an Interesse, haben bisher jedoch noch keine größere kommerzielle Verwendung gefunden¹⁰⁹.

- ▶ Magnesiumgermanate dienen als Leuchtstoff in fluoreszierenden Lampen.
- ▶ Im Teilchenbeschleuniger werden Einkristalle aus Germanium in Monochromatoren für Röntgen- und Neutronenstrahlung zur gezielten Selektion von Strahlung mit definierter Wellenlänge eingesetzt.
- ▶ Bei Germanium lässt sich, im Gegensatz zu Stahl, nicht durch Neutronenstrahlung die Kristallstruktur zerbrechen. Es fängt den Stoß des Neutrons elastisch auf. Bisher findet diese Entdeckung jedoch keine Nutzung in Reaktoren.

¹⁰⁸ Als Epitaxie wird ein geordnetes Kristallwachstum auf einer Trägerschicht bezeichnet. Die von einem einkristallinen Substrat vorgegebene atomare Ordnung wird auf eine wachsende Schicht übertragen. Abhängig davon, ob Substrat und Schicht aus gleichem oder unterschiedlichem Material bestehen, werden auch die Bezeichnungen Homo- beziehungsweise Heteroepitaxie verwendet.

¹⁰⁹ Germanium ist zwar für Menschen nicht essenziell, es wird aber in Pflanzen (Knoblauch, Bohnen, Tomatensaft Ginseng, Aloe und Wasserkresse) und auch in einigen Tieren (Austern und Thunfisch) besonders akkumuliert. In einigen Nahrungsergänzungsmitteln ist es in Form von Spirogermanium (Carboxyethylgermanium-Sesquioxid, Ge-132) enthalten. Germanium und dabei insbesondere Ge-132 wird dabei eine positive Wirkung gegen Krebs, AIDS, Bluthochdruck, Arthritis, Lebensmittelallergien und Malaria zugeschrieben. Die Wirksamkeit ist allerdings umstritten, zumal Vergiftungen bei Menschen nach der Einnahme von anorganischem Germanium als Nahrungsergänzungsmittel berichtet werden. Nachgewiesen ist eine schwache Toxizität für Säugetiere aber signifikante toxische Effekte für Bakterien. Diese Eigenschaft hat zur Nutzung von organischer Germaniumverbindung in der Chemotherapie geführt. In der Homöopathie ist die Nutzung von Germanium Metallicum als Globuli üblich.

- ▶ Germanium wird vereinzelt auch als Supraleiter eingesetzt.

Der Anstieg der Nachfrage nach Germanium in 2006 ist insbesondere auf den Produktionsanstieg bei Glasfaser, den Zuwächsen bei Infrarotanwendungen bei Nachtsichtgeräten für Luxusfahrzeuge, dem militärischen Sektor sowie der Expeditionsausstattung zurück zu führen. Spürbar ist auch die verstärkte Nachfrage nach Infrarotdetektoren für den Sicherheitssektor. Insbesondere in den USA ist im Zuge der Terrorismusabwehr im Zivilschutzsektor eine spürbare Nachfragezunahme von staatlicher Seite (Homeland-Security) festzustellen. Steigende Bedarfe sind auch bei Detektoren für Röntgenstrahlungen zu beobachten. Der Verbrauch von Germanium als Katalysator für die Herstellung von PET-Kunststoff ist dagegen annähernd stabil.

Die Bedeutung von Silizium-Germanium-Verbindungen (SiGe) als Halbleitermaterial nimmt weiterhin zu. Dies gilt insbesondere für das Vermögen, integrierte Schaltungen weiter zu miniaturisieren und dabei die elektromagnetische Strahlung, insbesondere für ultra hochfrequente Anwendungen zu verringern. Silizium-Germanium verdrängt dabei zunehmend Galliumarsenide (GaAs) in den Geräten der schnurlosen Kommunikation. SiGe-Chips für den Hochgeschwindigkeitseinsatz können dabei unter Nutzung etablierter Produktionstechnologie der Silizium-Chips kosteneffizienter hergestellt werden. Forschungsaktivitäten zielen auf eine weitere Substituierung von Silizium durch Germanium. Zu nennen ist Silizium in miniaturisierten Chips, in denen germaniumhaltige Isolatoren als Substrate zum Einsatz kommen. Ferner ist bei germaniumbasierten LEDs eine Zunahme aufgrund ihrer hohen Stabilität zu verzeichnen.

Die zunehmenden Energiepreise haben die Wirtschaftlichkeit der Photovoltaik erheblich erhöht. Daher wird in der Photovoltaik ein zukünftiger Hauptabnehmer von Germanium gesehen.

Der Anstieg des Germaniumpreises hat sich auch im Jahr 2007 fortgesetzt, da eine wachsende Nachfrage einem gleichbleibenden Angebot gegenüber steht. Insbesondere die weitere Verschärfung der fiskalischen Maßnahmen in China hat zu einer Verringerung des weltweiten Angebots an chinesischem Germanium geführt. In deren Folge ist ein steigendes Interesse an der Wiedereröffnung von Minen mit germaniumhaltigen Metallerzen zu beobachten. Beispiele dafür sind das Engagement kanadischer Firmen in Aufbereitungstechnologien für Zinkkonzentrate zur verbesserten Germaniumgewinnung sowie das gestiegene Interesse an der Germaniumgewinnung aus dem Flugstaub der Kohleverbrennung.

5.14.5 Germaniumbedarf 2030

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind folgende zusätzliche Rohstoffbedarfe geschätzt worden:

Tabelle 5-67: Germaniumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2006	Bedarf 2030
Glasfaserkabel	28	220
Bedarfssumme	28	220
Bedarf / Rohstoffproduktion 2006	0,31	2,44

Glasfaserkabel beanspruchen knapp ein Drittel des heutigen Germaniumbedarfs. Diese Menge wird sich bis 2030 vervielfachen. Eine Quantifizierung des Germaniumbedarfs in Nachtsichtgeräten für Fahrzeuge ist nicht gelungen.

Starkes Wachstum ist bei zahlreichen anderen Zukunftstechnologien zu erwarten. Ihre absoluten Beiträge zur Germaniumnachfrage addieren sich vermutlich zu nennenswerten Mengen. Aus dem Recycling von post-consumer Produkten ist keine nennenswerte Entlastung zu erwarten.

5.15 Gallium

5.15.1 Eigenschaften

Gallium, chemisches Zeichen Ga, Ordnungszahl 31, wurde bereits bei der Erstellung des Periodensystems von Mendelejew und Meyer 1869/1870 als Eka-Aluminium vorhergesagt¹¹⁰.

Festes Gallium ist ein weißes, leicht blaugrau glänzendes Metall mit einer orthorhombischen Kristallstruktur. Gallium von großer Reinheit hat eine silbrig weiße Farbe. Es ist bei Raumtemperatur ein Feststoff, wird aber wie auch Quecksilber, Cäsium und Rubidium bei langsamem Erhitzen flüssig. In fester Form ist es ein sehr weiches, mit einem Messer schneidbares Metall (Mohshärte 1,5). Seine absolute Atommasse beträgt 69,723 u. Besonders auffallend ist der mit 29,8 °C sehr niedrige Schmelzpunkt und der mit 2.403 °C sehr hohe Siedepunkt. Damit hat Gallium den größten Flüssigkeitsbereich aller Metalle¹¹¹.

Von Gallium sind vier Normaldruck- und drei Hochdruckmodifikationen bekannt. In festem Zustand zeigt die bei Normalbedingungen beständige Modifikation einige Eigentümlichkeiten. So ist Gallium zwar relativ weich, kompakte Stücke splintern bei starker, plötzlicher mechanischer Belastung allerdings mit muscheligen Bruch, und es entstehen feine, scharfe Splitter. Bemerkenswert ist weiterhin die hohe Benetzungsfähigkeit von flüssigem Gallium. In Abhängigkeit von seiner Modifikation wird Gallium unterhalb seiner Sprungtemperatur zwischen 1,1 und 7,9 K supraleitend.

Gallium ist ein relativ unedles Metall, das sich unter Wasserstoffentwicklung in verdünnten Säuren und langsam auch in heißem Wasser löst¹¹². Gegenüber Laugen ist es unbeständig, wobei sich Gallat-Ionen ($\text{Ga}(\text{OH})_4$) bilden. An der Luft ist es beständig. Es verbrennt erst in reinem Sauerstoff unter hohem Druck. Mit den Halogenen reagiert es bereits bei Zimmertemperatur und bildet die entsprechenden Halogenide¹¹³.

110 1875 wies Paul Emile Lecoq de Boisbaudran Gallium durch seine charakteristischen Spektrallinien aus Zinkblende nach. Im selben Jahr gelang es Boisbaudran erstmals, metallisches Gallium elektrolytisch aus einer ammoniakalischen Galliumsulfat-Lösung herzustellen. In Anlehnung an den lateinischen Namen für Frankreich wurde es Gallium benannt.

111 Gallium hat ferner eine starke Tendenz, auch dann flüssig zu bleiben, wenn es unter seinen Schmelzpunkt abkühlt. Erst durch einen Kristallisationskeim oder durch weitere Abkühlung verfestigt es sich dann.

112 In kaltem Wasser und mit konzentrierter Salpetersäure erfolgt aufgrund einer Passivierung keine Reaktion.

113 Galliumhalogenide, wie beispielsweise Galliumchlorid, sind starke Lewissäuren, die in Wasser zu Chlorwasserstoff und Galliumhydroxid hydrolysieren.

Die Galliumverbindungen zeigen große Ähnlichkeiten mit den Aluminiumverbindungen. Mit Aluminium bildet Gallium Legierungen mit sehr niedrigem Schmelzpunkt, die bei geringem Aluminiumgehalt auch heftig mit Wasser reagieren.

Gallium kommt in der Natur stets in Kombination mit anderen Elementen vor. Es steht mit einem Anteil von 0,0014 % an 38. Stelle der Elementhäufigkeit der Erdkruste und findet sich zwischen Bor und Molybdän. Damit ist es etwas seltener als Blei.

Das Mineral mit dem höchsten Galliumanteil von max. 35,32 % ist das sehr seltene Mineral Gallit, ein Kupfer-Gallium-Sulfid (CuGaS_2); auch Germanit führt 0,1 - 1 % Gallium. In geringen Mengen (25 – 100 ppm) findet sich Gallium auch im Aluminiumerz Bauxit, aus dem es als Nebenprodukt anfällt. Gleichwohl ist Bauxit das wichtigste Erz der Galliumgewinnung, dem es als Begleitmetall während der Schmelzflusselektrolyse bei der Aluminiumgewinnung entzogen wird. Eine weitere Herstellung von Primärgallium erfolgt aus den Reststoffen der Zinkherstellung. Auch Zinkblende, Magnetit, Pyrit und Flugaschen können Spuren von Gallium enthalten.

5.15.2 Vorkommen

Belastbare Daten über Produktion, Reserven und Reservenbasis von Gallium sind nicht verfügbar. Im Wesentlichen begründet sich dies durch die wenigen Hersteller von Gallium, welche Daten über ihre Produktion sehr vertraulich behandeln.

Tabelle 5-68: Versorgungssituation bei Gallium 2006

Reserven:	k. A.
Ressourcen:	> 1.000.000 t
Statische Reservenreichweite:	-
Statische Ressourcenreichweite:	ca. 10.000 Jahre
Wichtige Produzenten:	China (32 %), Deutschland (19 %), Kasachstan (14 %), Japan (11 %), Rußland (10 %)
Länderkonzentration der Reserven:	Herfindahlindex unbekannt

Quelle: USGS 2008, USGS 2007 und eigene Berechnungen

Die hier angeführten Angaben über Gallium-Ressourcen basieren auf dem durchschnittlichen Anteil von Gallium in Bauxit und in Zinkerzen (ca. 50 ppm). Nur ein geringer Teil der Galliumgehalte in Bauxit und Zinkerzen ist jedoch nutzbar. Die Bauxit Ressourcen sind sehr groß. Erhebliche Teile davon werden für Jahrzehnte wirtschaftlich nicht förderwürdig sein. Daher wird auch ein großer Teil des im Bauxit und Zink enthaltenen Galliums nicht kurzfristig zur Verfügung stehen. Damit ist eine Schätzung der derzeitigen Galliumreserven nicht vergleichbar mit Angaben über Reserven anderer

mineralischer Ressourcen. Die wichtigsten Lagerstätten liegen in Chile, USA und Kanada.

5.15.3 Produktion

Tabelle 5-69: Weltweite Raffinerieproduktion und Preisentwicklung von Gallium

	2003	2004	2005	2006	2007
Globale Raffinerieproduktion in t Galliummetall	83	86	91	99	103
Preis in US \$/kg Galliummetall	411	550	538	443	460

Quellen und Anmerkung: USGS 2008, USGS 2007, USGS 2006a, USGS 2005; Preis für 99,9999 % reines Galliummetall

Es wird geschätzt, dass im Jahre 2007 weltweit ca. 80 t primäres Gallium produziert wurde. Einschließlich der eingesetzten Gallium-haltigen Neuschrotte wurde im Jahr 2007 weltweit 103 t Gallium raffiniert. Die wichtigsten Produktionsländer waren 2007 China, Deutschland, Japan und die Ukraine. Weitere Produktionsländer sind Ungarn, Kasachstan, Russland und die Slowakei.

In den letzten 10 Jahren lagen diese Produktionsdaten in einer ähnlichen Größenordnung. Bereits im Jahr 2000 wurden 110 t Gallium raffiniert, inklusive einer Primärgallium-Herstellung von 100 t. In den Jahren 2002 bis 2004 sank die Menge raffinierten Galliums zwischenzeitlich auf 81 bis 86 t.

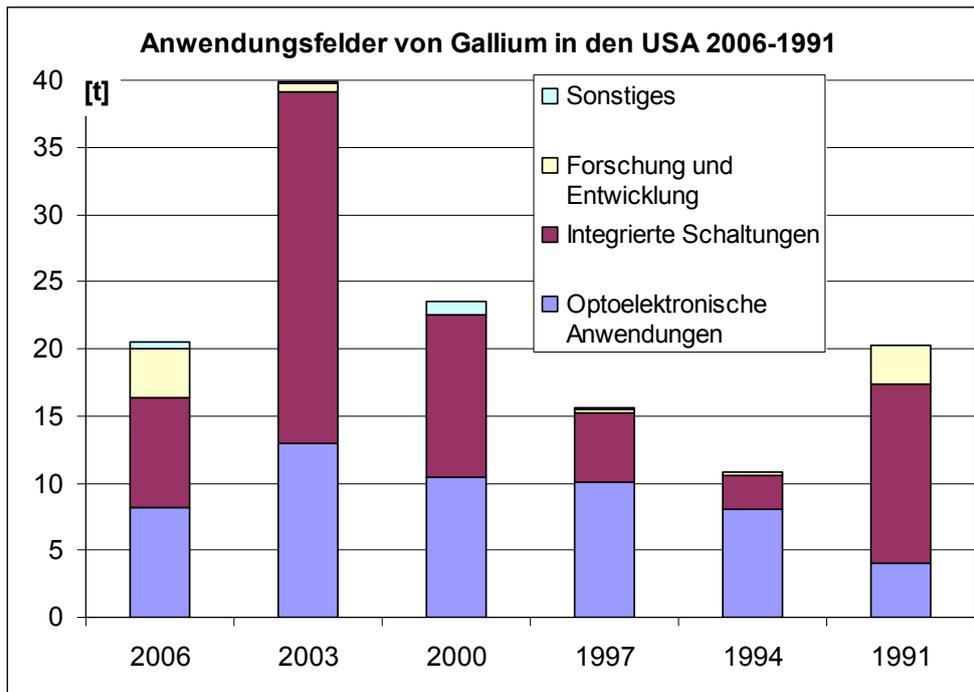
Auffällig sind die Änderungen bei den Haupterzeuger-Ländern. So fand im Jahr 1999 die Herstellung von primärem Gallium überwiegend in den Ländern Australien, Kasachstan und Russland statt, untergeordnete Produzenten waren zu diesem Zeitpunkt die Länder China, Deutschland, Ungarn, Japan, Slowakei und die Ukraine. Damit sind China, Deutschland und Japan zu den Haupterzeugern aufgestiegen und haben Kasachstan und Russland diesbezüglich den Rang abgelaufen. Australien zählt heute überhaupt nicht mehr zu den galliumproduzierenden Ländern.

Hinsichtlich der Raffination von Gallium sind ebenfalls Änderungen festzustellen. So fand die Raffination von Gallium im Jahr 1999 überwiegend in Frankreich, Japan und den USA statt. Insbesondere in Frankreich wurde primäres Gallium aus Australischen Erzen gewonnen. Heute spielt Frankreich als Erzeugerland von Gallium keine Rolle mehr. Dies dürfte wiederum mit dem Niedergang der Raffination von Zinkerzen in Frankreich zusammen hängen. Stattdessen zählt heute China neben Japan und den USA zu den Haupterzeugern von raffiniertem Gallium.

5.15.4 Verwendungen

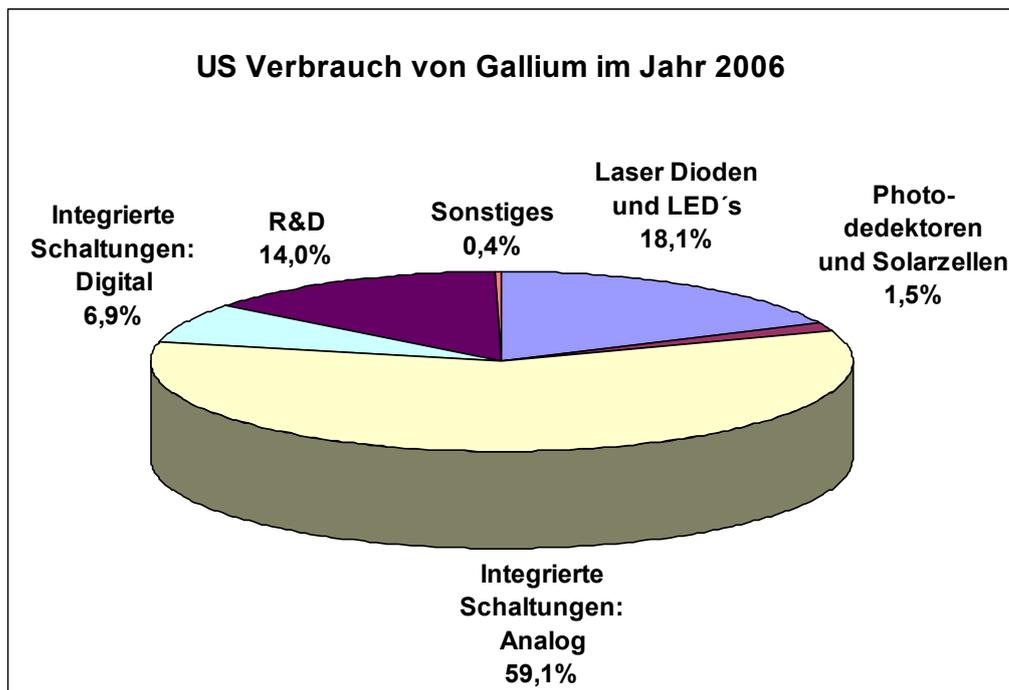
Die folgende Abbildung stellt die wichtigsten Anwendungsfelder von Gallium in den USA für die Jahre 1991 – 2006 im Überblick dar.

Abbildung 5-19: Anwendungsbereiche von Gallium für die Jahre 1991 – 2006 in den USA



Quelle: Matos, Kramer 2005a, USGS 2007

Die obige Abbildung kategorisiert die Anwendungsfelder von Gallium nur sehr grob. Zudem geben sie lediglich Auskunft über die US-amerikanische Verwendungsstruktur. Für die USA lässt sich lediglich sagen, dass in den letzten Jahren die Anwendung von Gallium in integrierten Schaltungen (analog und digital) stark und für optoelektronische Anwendungen (u. a. Laserdioden und LEDs) mäßig abgenommen haben. Währenddessen ist der Gallium Einsatz in Forschung und Entwicklung stark angestiegen. Etwas differenzierter zeigt die folgende Abbildung die Verwendungsstruktur:

Abbildung 5-20: Anwendungsbereiche von Gallium für das Jahr 2006 in den USA¹¹⁴

Quelle: Kramer 2007

Der größte Anteil des gewonnenen Galliums dient zur Herstellung von Galliumverbindungen wie Galliumarsenid, Galliumnitrid, Galliumphosphid oder Galliumantimonid. Aus diesen lassen sich Leuchtdioden, Transistoren oder Laserdioden herstellen.

In den USA wurden im Jahr 2006 ca. 95 % des Galliums in Form von Galliumarsenid (GaAs) oder Galliumnitrid (GaN) eingesetzt. Eine weitere wichtige Anwendungsform ist das Galliumphosphid.

- ▶ Galliumarsenid (GaAs) wird insbesondere im optoelektronischen Bereich (Laserdioden, LED's, Photodetektoren und Solarzellen) sowie für integrierte Schaltungen eingesetzt. GaAs zählt zu den so genannten intermetallischen III-V-Verbindungen mit guten Halbleitereigenschaften¹¹⁵. GaAs-Einkristalle dienen daher u. a. als Grundmaterial für Gunn-Dioden, Injektionslaser und Lumineszenzdiode.
- ▶ Galliumnitrid (GaN) ist ein III-V-Halbleiter mit großer elektronischer Bandlücke (wide bandgap), der in der Optoelektronik insbesondere für blaue, weiße und grüne LEDs und für Hochleistungs-, Hochtemperatur- und Hochfrequenzfeld-

¹¹⁴ End-Verbrauch. Gerundete Werte. Inklusive Gallium und Gallium-Komponenten.

¹¹⁵ Es bildet dunkelgraue Kristalle, die einen ausgeprägten Gunn-Effekt zeigen.

fekttransistoren Verwendung findet. Darüber hinaus ist es für Sensorikanwendungen geeignet. Es lässt sich vermutlich durch Dotieren, mit z. B. Mn, ein bei Raumtemperatur magnetischer Halbleiter realisieren, wie er für die Spintronik von Interesse ist.

- ▶ Galliumphosphid (GaP) ist ebenfalls ein III-V-Halbleiter. GaP-Einkristalle dienen als Grundmaterial für Lumineszenzdioden, wobei der p-n-Übergang durch Legieren oder Eindiffundieren von Zinn hergestellt wird. Das Galliumtriiodid GaI_3 kann zur Herstellung von Galliumphosphid GaP für rote und grüne Leuchtdioden verwendet werden.

Galliumlegierungen mit Indium, Zink und Kupfer erstarren unter 0°C , besitzen eine hohe Oberflächenspannung, einen sehr hohen Siedepunkt und einen sehr niedrigen Dampfdruck. Eine derartige Legierung besitzt ähnliche Eigenschaften wie Quecksilber, was die Oberflächenspannung betrifft. Mit Zinn, Blei, Wismut oder Cadmium entstehen leicht schmelzbare Legierungen. Als Legierungszusatz wird Gallium ferner im dental-technischen-edelmetallverarbeitenden Bereich eingesetzt.

Forschung und Entwicklung nimmt einen relativ hohen Anteil an der Galliumverwendung ein. Zu nennen sind insbesondere:

- ▶ Gallium wird als GaAs in hocheffizienten Solarzellen mit Wirkungsgraden $> 20\%$, für Konzentratorzellen und in extraterrestrischen Anwendungen (Stromversorgung für Satelliten) verwendet. Außerdem wird Gallium in der Dünnschicht Photovoltaik in CIGS-Zellen eingesetzt.
- ▶ Galliumtrichlorid (GaCl_3) wird in Neutrinodetektoren eingesetzt, beispielsweise beim GALLEX-Experiment (GALLium EXperiment) unter dem Gran Sasso.
- ▶ Galliumoxide lassen sich zu speziellen, stark lichtbrechenden Kristallmaterialien verarbeiten. In Kristallen ist ein lückenloser Austausch von Galliumionen durch Aluminiumionen möglich.
- ▶ In der Nuklearmedizin wird das radioaktive ^{68}Ga in der Diagnostik für Aufnahmen in der Positronen-Emissions-Tomographie verwendet¹¹⁶.

Gallium eignet sich als ungiftiger, nichtflüchtiger Quecksilberersatz (Galinstan) auch für Thermometerfüllungen mit sehr breitem Anzeigebereich. Thermometer mit schwer schmelzbarem Quarzglas und einer Galliumfüllung können Temperaturbereiche von -15 bis 1200°C messen. Eine relativ neue Anwendung ist der Einsatz als Flüssigmetall-

¹¹⁶ Es wird dabei in einem so genannten $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ -Generator erzeugt und hat eine Halbwertszeit von 68 Minuten.

Wärmeleitpaste im PC-Bereich. Bei automatischen Feuerlöschvorrichtungen wird das Metall aufgrund seiner niedrigen Schmelztemperatur als Sperrverschluss eingesetzt.

Zukunftstechnologien

Gallium ist als Halbleitermaterial in einer Reihe von Zukunftstechnologien einsetzbar, darunter, in vermutlich abnehmender Rangfolge:

- ▶ GaAs und GaN für ICs
- ▶ GaAs, GaN, GaP in LEDs
- ▶ GaAs in hocheffizienten Solarzellen (extraterrestrisch, Dünnschicht-PV)

Ähnlich wie bei Indium wird die Verwendungsstruktur von Gallium stark durch Zukunftstechnologien geprägt.

5.15.5 Galliumbedarf 2030

Tabelle 5-70: Galliumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2006	Bedarf 2030
Weißer LED	9	143
Hochleistungs-Mikrochips	18	209
Dünnschicht-Photovoltaik	1	251
Bedarfssumme	28	603
Bedarf / Rohstoffproduktion 2006	0,28	6,09

Das untersuchte Segment der Zukunftstechnologien deckt gut ein Viertel des heutigen Galliumbedarfs ab. Diese Menge wird sich bis 2030 vervielfachen.

Das größte Mengenwachstum der untersuchten Zukunftstechnologien bis 2030 ist beim Einsatz Gallium für Dünnschicht-PV und für Mikrochips zu erwarten, gefolgt vom Galliumbedarf für Weiße LED. Starkes Wachstum ist auch bei zahlreichen anderen Zukunftstechnologien zu erwarten.

Auch angesichts der sehr eingeschränkten Rezyklierbarkeit der dominierenden Zukunftstechnologien ist deshalb bis 2030 mit einer deutlichen Nachfrageausweitung für Gallium zu rechnen.

6 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie geht der Frage nach, welche Impulse die künftige industrielle Nutzung von Zukunftstechnologien auf die Rohstoffnachfrage auslöst und auf welche Rohstoffe solche Innovationen besonders angewiesen sind. Die Analyse von 32 Zukunftstechnologien und 22 Rohstoffen lässt profunde Rückschlüsse auf das Wechselspiel zwischen technischem Wandel und dem Rohstoffbedarf zu. Die seit Beginn dieses Jahrzehnts verstärkter zu beobachtenden Turbulenzen auf den Rohstoffmärkten haben ihre Ursache nicht, wie oft irrtümlich angenommen wird, in der Erschöpfung von Rohstoffvorkommen. Die statische Ressourcenreichweite von Chrom beträgt 600 Jahre, von Titan 280 Jahre, von Kobalt 220 Jahre, der Platinmetalle 190 Jahre, und trotzdem sind die Preise dieser Metalle hoch volatil. Die Marktturbulenzen entstanden aus einem Ungleichgewicht von Angebot und Nachfrage. Die Fehleinschätzung der Märkte geht zum einen auf die stürmische Entwicklung der chinesischen Wirtschaft und dem davon ausgelösten Boom der Rohstoffnachfrage zurück, der für viele Marktteilnehmer unerwartet kam. Zum anderen resultiert die Fehleinschätzung aus nicht rechtzeitig antizipierten technischen Entwicklungen. Ein Beispiel ist der Umstieg der Elektro- und Elektronikindustrie auf bleifreie Lote, die einen höheren Zinngehalt aufweisen. Dies hat die Zinnnachfrage und die Zinnpreise stark anziehen lassen.

Der Treiber technischer Wandel

Die Analyse der von der Nutzung neuer Technologien ausgehenden Impulse auf die Rohstoffnachfrage lässt deutlich die gestaltende Kraft des technischen Wandels erkennen. Dies zeigt Tabelle 6-1. Sie gibt rohstoffspezifisch das Verhältnis des Rohstoffbedarfs für die analysierten Zukunftstechnologien zur heutigen gesamten Weltproduktion des jeweiligen Rohstoffs wider. Die Zahlen für 2006 zeigen, welcher Anteil der jeweiligen Weltrohstoffproduktion durch die analysierten Technologien erfasst wird. Die Zahlen für 2030 zeigen, welcher Anteil der heutigen Weltproduktion des jeweiligen Rohstoffs für diese Technologien 2030 benötigt werden wird. Sie sind ein Indikator für den Ausbaubedarf der Minenproduktion, der durch Recycling gemildert werden kann. Der Indikator erreicht bei Gallium den Faktor 6 und bei Neodym 3,8. Das heißt, der von absehbaren technischen Innovationen ausgehende Bedarf nach diesen beiden Rohstoffen wird 2030 6- bzw. 3,8-mal so hoch sein, wie deren gesamte heutige Weltproduktionsmenge. In diesen Zahlen ist die Rohstoffnachfrage aus Verwendungssegmenten außerhalb der analysierten Zukunftstechnologien nicht enthalten. Bedarfstreiber bei Gallium sind die Dünnschicht-Photovoltaik und schnelle integrierte Schaltungen. Bedarfstreiber bei Neodym sind Hochleistungs-Permanentmagnete. Der Indikator erreicht bei Indium den Faktor 3,3, bei Germanium 2,4, bei Scandium 2,3, bei Platin 1,6 und bei Tantal 1. Für Silber und Zinn beträgt er immerhin noch jeweils 0,8, bei Kobalt 0,4 und

bei Palladium und Titan jeweils 0,3 und bei Kupfer gut 0,2. Aufgrund der hier erkennbaren Dominanz des technischen Wandels auf die Rohstoffnachfrage sind dies zugleich jene Rohstoffe des Projektportfolios, die für die künftige Technologieentwicklung und ihre Nutzung in marktfähigen Produkten besonders wichtig sind.

Tabelle 6-1: Globaler Rohstoffbedarf für die analysierten Zukunftstechnologien im Jahr 2006 und 2030 im Verhältnis zur gesamten heutigen Weltproduktionsmenge des jeweiligen Rohstoffs

Rohstoff	2006	2030	Zukunftstechnologien (Auswahl)
Kupfer	0,09	0,24	Effiziente Elektromotoren, RFID
Chrom	gering	gering	Meerwasserentsalzung, marine Techniken
Kobalt	0,19	0,40	Lithium-Ionen-Akku, Xtl
Titan	0,08	0,29	Meerwasserentsalzung, Implantate
Zinn	0,62	0,77	Bleifreie Weichlote, transparente Elektroden
Antimon	gering	gering	ATO, Mikrocondensatoren
Niob	0,01	0,03	Mikrocondensatoren, Ferrolegierung
Tantal	0,39	1,01	Mikrocondensatoren, Medizintechnik
Platin	gering	1,56	Brennstoffzellen, Katalyse
Palladium	0,10	0,34	Katalyse, Meerwasserentsalzung
Ruthenium	0	0,03	Farbstoffsolarzellen, Ti-Legierungselement
Silber	0,26	0,78	RFID, Bleifreie Weichlote
Scandium	gering	2,28	SOFC Brennstoffzellen, Al-Legierungselement
Yttrium	gering	0,01	Hochtemperatursupraleitung, Lasertechnik
Neodym	0,55	3,82	Permanentmagnete, Lasertechnik
Selen	gering	0,11	Dünnschicht-Photovoltaik, Legierungselement
Indium	0,40	3,29	Displays, Dünnschicht-Photovoltaik
Germanium	0,31	2,44	Glasfaserkabel, IR optische Technologien
Gallium	0,28	6,09	Dünnschicht-Photovoltaik, IC, WLED

Dagegen stehen technische Innovationen, die nur marginale Auswirkungen auf die künftige Rohstoffnachfrage entfalten. So ist beispielsweise die Herstellung von orthopädischen Implantaten ein stark wachsender Markt in einer alternden Gesellschaft. Davon gehen jedoch keine nennenswerten Nachfrageimpulse nach Rohstoffen aus. Auch die Zukunftstechnologie Farbstoffsolarzelle wirkt sich kaum auf die Rohstoffnachfrage aus. Zu wissen, von welchen Innovationen und aus welchen Marktsegmenten die Nachfrage bestimmter Rohstoffe getriggert wird, sind strategische Informationen für die Rohstoffkonzerne. Sie bilden die Grundlage einer vorausschauenden Anpassung der Produktionskapazitäten an die Nachfrage des Markts.

Der Treiber Weltwirtschaft

Vor allem China hat das Wachstum der Weltwirtschaft von einem moderaten Durchschnitt von 3,8 % pro Jahr in den zurückliegenden zwanzig Jahren auf 5 % pro Jahr seit 2004 hochschnellen lassen. Wenn es gelingen soll, Angebot und Nachfrage im Gleichgewicht zu halten, dann muss als zweiter Faktor neben dem technischen Wandel auch die Entwicklung der Weltwirtschaft im Auge behalten und antizipiert werden. Das zurzeit herrschende Wohlstandsgefälle zwischen Regionen der Welt ist nicht zukunftsfähig. Afrika, beispielsweise, trägt mit einer Milliarde Menschen kaum 1,6 % zum globalen Inlandsprodukt bei. Es ist keine konfliktfreie Zukunft vorstellbar, in der die entwickelten Regionen ihren Wohlstand stetig mehren, während die armen Regionen auf ihrem Niveau verharren. Das wirtschaftliche Aufholen der weniger entwickelten Regionen ist Voraussetzung für eine friedliche Zukunft und liegt im Interesse aller Nationen der Welt. Der Ausgleich des Wohlstandsgefälles in einer angemessenen Zeitspanne wird zwangsläufig das Weltwirtschaftswachstum über das langfristige Mittel der Vergangenheit steigen lassen. Aber selbst, wenn nur eine künftige jährliche Wachstumsrate von 3,8 % zugrunde gelegt wird, erreicht die Weltwirtschaftsleistung im Jahre 2030 das 2,4-fache von 2006. Von diesem Wachstum werden ohne Zweifel starke Impulse auf den zukünftigen Bedarf nach Rohstoffen ausgehen.

Welches der dominierende Treiber der Nachfrage ist, lässt sich nicht generell beantworten, sondern hängt vom spezifischen Rohstoff ab. Commodities, das sind in großen Mengen hergestellte Massenrohstoffe mit breitem Verwendungsspektrum wie Eisen, Stahl, Kupfer und Chrom, scheinen eher vom Weltwirtschaftswachstum getrieben zu werden. Für Spezialitäten, wie Gallium, Neodym, Indium, Germanium und Scandium, dürfte eher die technologische Entwicklung bedarfsbestimmend sein. Bei den Platinmetallen, Tantal, Silber, Titan und Kobalt wirken beide Treiber dominant.

Das Spiel von Nachfrage und Angebot

Ist angesichts der absehbaren Nachfragesteigerung überhaupt eine sichere Rohstoffversorgung vorstellbar? Grundsätzlich schon. Je nach Komplexität der Technologie vergehen 5, 10 und mehr Jahre, bis eine neue Technik aus dem Forschungs- und Entwicklungsstadium in die breite Anwendung gelangt. Toyota hat als Pionier in der Hybridtechnologie des Fahrzeugbaus einen Entwicklungsvorsprung von mindestens 5 Jahren. Dies, obwohl die Herausforderung hier "nur" darin besteht, bekannte Komponenten, nämlich Verbrennungsmotor und Elektromotor, zu einem System zu integrieren. Die Entwicklungsanstrengungen der Industrie, Brennstoffzellen praktisch nutzbar zu machen, lassen sich bis in die sechziger Jahre zurückverfolgen. Der Beherrschung der Energiegewinnung aus der Kernfusion und die Bereitstellung eines funktionierenden

Fusionskraftwerks dürfte nahezu ein Jahrhundert benötigen. Die Zeitspanne für die Umsetzung von Bergbauprojekten, in der Branche als "Lead Time" bezeichnet, beträgt fünf bis zehn Jahre. Den Rohstoffkonzernen steht also ausreichend Anpassungszeit zur Verfügung, dem technischen Wandel zu folgen. Technische Entwicklungen rechtzeitig zu erkennen und ihre Richtung und Stärke sicher einzuschätzen, ist allerdings nicht trivial. Hier kann ein regelmäßiger Informationsaustausch zwischen den Rohstoffkonzernen und den ihre Rohstoffe verarbeitenden Industrien helfen, realistische Zukunftsbilder zu erarbeiten.

Zu den Besonderheiten der Gewinnung metallischer Rohstoffe gehört häufig ihr vergesellschaftetes Vorkommen in Erzen. Steigt der Bedarf nach einem Metall stark an, so ändert sich das gesamte Wertschöpfungs- und Preisgefüge von Haupt-, Kuppel- und Nebenprodukten. Vergesellschaftet kommen beispielsweise die für die Technologieentwicklung wichtigen Metalle der Seltenen Erden vor, darunter Scandium und Neodym. Indium, ein extrem knapper Rohstoff, wird als Koppelprodukt von Zink gewonnen. Die Schließung der japanischen Zinkhütte Toyoha im Jahre 2006 verringerte das Indiumangebot deutlich, mit entsprechenden Preisreaktionen.

Auf den Rohstoffmärkten agieren nicht nur die Marktteilnehmer der Realwirtschaft, die Märkte sind auch Ziel von Spekulationsgeschäften. Welche Rolle letztere bei der Preisbildung spielen, ist offen. Hier besteht wie bei den Energierohstoffen Analyse- und möglicherweise auch Regulierungsbedarf. Dominante, Preis treibende Spekulationsgeschäfte würden einen gesellschaftspolitisch unerwünschten Wohlstandstransfer herbeiführen, weil die Konsumenten mehr für Rohstoffe aufwenden müssen, als ihrem realen Gegenwert entspricht.

Die Vulnerabilität des Rohstoffe verarbeitenden Gewerbes

Die Rohstoffversorgung muss als vulnerables System verstanden werden. Sie ist global hoch vernetzt und dadurch vielfältigen Einflüssen ausgesetzt, die von einzelstaatlichen Politiken nur beschränkt gesteuert werden können. Dabei dürften Marktstörungen weniger in einem Stopp der Rohstoffzufuhr zu sehen sein, sondern eher in Lieferverzögerungen, in Konzentrationsbewegungen globaler Konzerne, die Marktmacht erzeugen und den Wettbewerb aushebeln, in der Instabilität von Förderländern, die schlagartig die Minenproduktion lahmlegt, weil der gesellschaftliche Konsens hoch fragil ist (Coltan Krise, südafrikanisches Chrom). Marktstörungen entstehen auch, wenn unvorhergesehene Prosperität in Schwellen- und Entwicklungsländern die Nachfrage puscht (China, Indien, Brasilien) oder revolutionäre Technologieschübe Bedarfsspitzen oder -einbrüche verursachen.

Die Empfindlichkeit der Rohstoffe verbrauchenden Wirtschaftssektoren ist dort besonders groß, wo die Möglichkeit fehlt, knappe und teure Rohstoffe zu substituieren. Nicht substituierbar ist beispielsweise Chrom in rostfreien Stählen, Kobalt in verschleißfesten Legierungen, Scandium in schlagfesten Aluminium-Scandium-Legierungen, Silber in gedruckten RFID-Labels, Indium in transparenten Indium-Zinn-Oxid-Elektroden für Displays, Neodym in starken Permanentmagneten und Germanium in Linsen der Infraroptik. Zwischen den Wirtschaftssektoren bestehen zugleich Nachfragekonkurrenzen um Rohstoffe. So wird Tantal für die Herstellung miniaturisierter Kondensatoren in elektronischen Schaltungen, als Ferrolegierung für die Stahlveredelung und als hoch biokompatibles Metall für Stifte, Drähte und Schrauben in der Chirurgie benötigt. Platin ist in der Katalyse der Chemietechnik, in Abgaskatalysatoren für Kraftfahrzeuge, in Brennstoffzellen und in vielen anderen Anwendungen unverzichtbar. Silber wird in nanoskaliger Form als Biozid genutzt, ist Bestandteil von Weichloten und wird für hochwertige Verspiegelungen eingesetzt, beispielsweise für hocheffiziente solarthermische Rinnenkollektoren. Kobalt bedient zum einen die vielfältigen und stark wachsenden Anwendungen der Lithium-Ionen-Technik, wird als Katalysator in der Fischer-Tropsch-Synthese genutzt, beispielsweise bei der Kraftstoffsynthese, und ist essenzieller Bestandteil hoch verschleißfester Bauteile in Fahrzeugbau, Maschinenbau und Medizintechnik.

Die starke Vernetzung und Verästelung der Rohstoffnutzungen in den Wirtschaftssektoren wurde bisher nicht ansatzweise systematisch untersucht. Zu den offenen Fragen zählen unter anderem

- ▶ die vollständige Identifikation essenzieller Rohstoffe, also Verwendungen in denen bestimmte Rohstoffe nicht substituierbar sind,
- ▶ das Potenzial systemischer Innovationen, die Verwendungen von nicht substituierbaren Rohstoffen ersetzen. Beispielsweise faserverstärkte Kunststoffe anstelle von rostfreien Stählen, die essenziell auf Chrom angewiesen sind,
- ▶ bestehende Substitutionspotenziale bei nicht essenziellen Rohstoffnutzungen und Kosten ihrer Erschließung,
- ▶ vorhandene Effizienzpotenziale beim Materialeinsatz, beispielsweise durch Miniaturisierung und die Nachahmung bionischer Konstruktionsprinzipien,
- ▶ die Möglichkeiten der Nutzung nachwachsender Rohstoffe, sowie
- ▶ ungenutzte Recyclingpotenziale und Kosten ihrer Erschließung.

Erst solche Informationen machen eine Einschätzung der Vulnerabilität der Wirtschaftssektoren und die vorsorgliche Entwicklung von Ausweichstrategien möglich. Von besonderem Interesse einer nationalen Analyse sind dabei die Schlüsselsektoren

der deutschen Wirtschaft, das sind der Fahrzeugbau, der Maschinenbau, die Chemietechnik und die Medizintechnik.

Leistungsfähige Recyclingtechniken für High-tech-Materialverbünde

Materialverbünde gewinnen mehr und mehr an Bedeutung. Sei es um die Leistungsfähigkeit von Bauteilen zu steigern (Milchverbundkarton), Gewicht einzusparen (Tailored Blanks), sie zu miniaturisieren (integrierte Schaltkreise), spezifische Stoffeigenschaften einzustellen (Hybridpolymere, ORMOCER®) oder aus anderen Gründen. Die Trennung hoch komplexer Materialverbünde, wie sie beispielsweise in integrierten Schaltkreisen realisiert sind, und die Rückgewinnung der enthaltenen Wertstoffe stellt höchste Anforderungen an die Recyclingtechnik, die gegenwärtig aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen oft noch nicht erreicht werden. Hier gilt es, leistungsfähige Recyclingtechniken bereit zu stellen, die kosteneffizient Sekundärrohstoffe in der Qualität von Primärrohstoffen gewinnen. Sekundärrohstoffe sind bei den Metallen die einzige nennenswerte heimische Rohstoffquelle Deutschlands.

Der Bau transnationaler Institutionen

Für die Bearbeiter dieser Untersuchung stellte die Beschaffung von Informationen und valider quantitativer Daten über die Rohstoffverwendungen eine besondere Herausforderung dar. Die Informationen über Rohstoffe *und* ihre Verwendungen sind breit verstreut und den Marktteilnehmern nur mit erheblichem Aufwand zugänglich. Hier könnte eine transnationale Institution die Märkte beobachten und den Bergbaukonzernen *und* den Rohstoffe verarbeitenden Industrien verdichtete Informationen zur Verfügung stellen. Eine solche Institution sollte, stärker als im United States Geographical Survey (USGS), welche die derzeit besten öffentlich zugänglichen Rohstoffdaten und -analysen bereitstellt, neben der Bergbaukompetenz auch Know-how über die Rohstoffverwendungen, ihre Industrien und Technologien unter einem Dach vereinen. Dies wäre zugleich eine Institution, die Round-Table-Gespräche zwischen Bergbaukonzernen und den Rohstoffe verarbeitenden Industrien organisieren und moderieren könnte. Informationsaustausch zwischen den Wirtschaftssektoren ist geeignet, eine bessere Abstimmung von Rohstoffangebot und -nachfrage herbeizuführen und die Rohstoffmärkte zu beruhigen.

Der Nutzen technisch fundierter Marktanalysen

Aufgabe der vorliegenden Studie war es, den künftigen Rohstoffbedarf, der von der Nutzung technischer Innovationen ausgeht, anhand ausgewählter Zukunftstechnologien exemplarisch zu beleuchten. Dabei war es nötig, die Zahl der einbezogenen Rohstoffe und Technologien auf ein bearbeitbares Maß zu begrenzen. Es war nicht Aufga-

be der Studie, den zukünftigen Gesamtbedarf an bestimmten Rohstoffen aus allen Verwendungen zu ermitteln. Letztlich bestimmt der Gesamtbedarf über den notwendigen künftigen Ausbau der Produktionskapazitäten durch die Rohstoffkonzerne. Rohstoffspezifische, technisch fundierte Gesamtvorschauen, die mit den Stakeholdern konsistente Szenarien entwerfen, verbleiben eine Aufgabe für die Zukunft.

Die Wegweisung fundamentaler Marktdaten

Niemand kann die künftige Entwicklung der Rohstoffmärkte prognostizieren. Die eingehende Analyse ihrer Treiber und die Herausarbeitung der fundamentalen Marktdaten erlauben es jedoch, mögliche zukünftige Entwicklungen einzugrenzen und sich vorsorglich auf sie einzustellen. Die in der vorliegenden Untersuchung erarbeiteten fundamentalen Marktdaten zeigen deutlich in die Richtung einer insgesamt steigenden Rohstoffnachfrage. Der im Zuge der globalen Finanzkrise eingetretene Preisrückgang bei den Rohstoffen sollte die Anstrengungen, die Rohstoffabhängigkeit zu reduzieren, nicht in Frage stellen.

Den Unternehmen wird empfohlen, die technologische und weltwirtschaftliche Entwicklung ständig zu beobachten und rechtzeitig vorsorgende Maßnahmen der Rohstoffsicherung zu ergreifen. Die vorliegende Studie möchte zur Methodik und Vorgehensweise der Marktbeobachtung Anregungen liefern.

Quellen

- AAOS: Case price bidding cuts joint replacement cost. Academy News of the American Academy of Orthopaedic Surgeons. New Orleans, 21 March 1998, <http://www2.aaos.org/aaos/archives/acadnews/98news/case-21.htm>.
- Ahrens, T.: Die Umstellung auf bleifreie Elektronikfertigung. Veranstaltungsreihe Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie ISIT. Itzehoe 2004.
- Allegheny Ludlum: Corrosion-Resistant Titanium Alloys. Technical Data Sheet. Allegheny Ludlum, 1999.
- Angerer, G.: Zukunftsmarkt synthetische Biokraftstoffe. Umweltbundesamt, Dessau. November 2007.
- Anwar, A.: Markets for Bulk and Epitaxial GaAs Substrates: Participant Summary. Strategy Analytics, Oktober 2006.
- Anwar, A.; Taylor, C.; Entwistle, S.: Are Silicon Technologies Poised to Displace GaAs? CS MANTECH Conference, Chicago, Illinois, USA, 14.-17. April 2008.
- APC: General review of lead free solder options. American Piezo Corp. Mackeyville, Pennsylvania, 2008. http://www.americanpiezo.com/news/lead_free.html.
- ARC Electronics: Fiber Optics - The basics of fiber optic cable: a Tutorial. <http://www.arcelect.com/fibercable.htm>; Zugriff am 12. Juni 2008.
- AIM: Association for Automatic Identification and Mobility AIM (Rich Vossel): RFID Experts Group. Presentation at eWaste: Environmental & Recycling Issues 27 October 2005.
- Audi: ASR - Die Revolution im automobilen Leichtbau. Werbeprospekt, 2008.
- BCC Research: Sinton, Ch. W.; Study on Rare Earth Resources and Markets for the Mt. Weld Complex. For Lynas Corporation Ltd. BCC Research 2006. http://www.lynascorp.com/content/upload/files/press_releases/BCC_FINAL_REP_ORF.pdf, Zugriff am 1.2.2009
- Behrendt, S.; Erdmann, L.: Roadmap Displays. Neuorientierungen für Umweltschutzstrategien. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. IZT-Werkstattbericht, Berlin 2004; Download unter <http://www.izt.de>.

Behrendt, S.; Fichter, K.; Nolte, R.; Kamburow, C.; Antes, R.; Neuhäuser, V.: Nachhaltigkeitsinnovationen in der Display-Industrie - Aktivierung von Umweltentlastungspotenzialen durch Akteurskooperationen in der Display-Branche, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT), Berlin, März 2008.

Berger, Thomas: Fraunhofer Institut für Chemische Technologie ICT. Persönliche Mitteilung vom 27.3.2008. Pfinztal 2008.

Berger: Umweltpolitische Innovations- und Wachstumsmärkte aus Sicht der Unternehmen. Roland Berger Strategy Consultants. München 2007.

Beucker, Severin; Fichter, Klaus: Trends und Rahmenbedingungen für das Innovationssystem Farbstoffsolarzelle – Perspektive 2020. Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit, Berlin 2007.

BGR: Resources of fuel and other materials essential for fusion. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover, 1989.

BGR: Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien Bundesrepublik Deutschland. Rohstoffsituation 2003. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover 2004.

BGR: Bundesrepublik Deutschland 2005 - Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien, Hannover 2006.

BGR: Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien Bundesrepublik Deutschland. Rohstoffsituation 2006. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover 2007.

BINE: Kohlendioxid abtrennen und lagern. *BINE Informationsdienst*, 2007 (12). <http://www.bine.info/pdf/publikation/projekt1207internetx.pdf>.

Blaser S.A. (2006): Environmental Risk Analysis for Silver-containing Nanofunctionalized Products. Diplomarbeit Oktober 2006, ETHZ, Zürich.

BMW Group: Annual Report 2006.

BMWi: Auswirkungen der weltweiten Konzentrierung in der Bergbauproduktion auf die Rohstoffversorgung in der deutschen Wirtschaft. Bericht Nr. 463 – Kurzfassung. Berlin: BMWi.

BP: Statistical review of world energy June 2007.

http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2007/STAGING/local_assets/downloads/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_report_2007.pdf.

Bridge: LogicaCMG und GS1: European Passive Smart Label Market Sizing 2007 – 2022. Bridge Project 2007.

Briseno, C.: Ernten statt verschwenden. Fraunhofer Magazin 3.2008.

Brüggemann: Interview mit Brüggemann, H., Laser 2000 Germany, geführt von Marwede, M., Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 12. August 2008.

Buchkremer, H. P.: Interview mit Buchkremer, H. P., Forschungszentrum Jülich, "SOFC", geführt von Marwede, M., Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 11. September 2008.

Buchmann, Isidor: What is the best battery? Battery University, 2006a.
<http://www.batteryuniversity.com/partone-3.htm>.

Buchmann, Isidor: Is lithium-ion the ideal battery? Battery University, 2006b.
<http://www.batteryuniversity.com/partone-5.htm>.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Bundesrepublik Deutschland - Rohstoffsituation 2007. Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien Heft XXXVII. Hannover, 2008 (Im Erscheinen).

Burchardt, U., Interview mit Burchardt, 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", 1. Oktober 2008 in Dübendorf.

Bush, S.: "Transparent inkjet conductor method uses antimony tin oxide to cut costs." *Electronics Weekly*, 22. November 2006.
<http://www.electronicsweekly.com/Home/Default.aspx>.

Büttner: Interview mit C. Büttner, Autoliv Inc., geführt von Marwede, M., Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 24. Juni 2008.

BWK. Das Energie Magazin. ISSN 1618-1934, Bd. 60, Nr. 5, 2008.

- Carner: Interview mit E. Carner, Laser Monitoring Systems (LMS), geführt von Marwede, M., Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 12. August 2008.
- CDA: Technology Transfer Report - The Die-Cast Copper Motor Rotor. Copper Development Association. New York 2004a.
- CDA: Copper Motor Rotor Project. Copper Development Association. New York 2004b. <http://www.copper-motor-rotor.org/>.
- CDA: Copper Motor Rotor Project. Update November 2006. Copper Development Association. New York, July 2007. http://www.copper-motor-rotor.org/update/Nov_06/index.html.
- CDI: Cobalt and gas to liquid technology. Cobalt News 04/3, July 2004, p 10 - 11. Cobalt Development Institute. Guildford, UK, 2004a. <http://www.thecdi.com/cobaltnews.php>.
- CDI: Battery Recycling - A perspective from a nickel and cobalt producer. Cobalt News 04/4, October 2004, p 7 - 11. Cobalt Development Institute. Guildford, UK, 2004b. <http://www.thecdi.com/cobaltnews.php>.
- CDI: The impact of the EU regulation on the collection and recycling of rechargeable batteries. Cobalt News 04/3, July 2004, p 7 - 9. Cobalt Development Institute. Guildford, UK, 2004c. <http://www.thecdi.com/cobaltnews.php>.
- CDI: Cobalt alloys in orthopaedic implants. Cobalt News 05/4, October 2005, p 5 – 7. <http://www.thecdi.com/cobaltnews.php>.
- CDI: Cobalt Facts. Cobalt Development Institute. Guildford, UK, 2006. <http://www.thecdi.com/cobaltfacts.php>.
- CDI: Cobalt consumption from a GTL perspective. Cobalt News 07/1, January 2007, p 6 - 8. Cobalt Development Institute. Guildford, UK, 2007a. <http://www.thecdi.com/cobaltnews.php>.
- CDI: Recycling GTL - A new challenge. Cobalt News 07/2, April 2007, p 5 - 6. Cobalt Development Institute. Guildford, UK, 2007b. <http://www.thecdi.com/cobaltnews.php>.
- CDI: Cobalt production and market. Cobalt News 07/1, January 2007, p 9 - 12. Cobalt Development Institute. Guildford, UK, 2007c. <http://www.thecdi.com/cobaltnews.php>.

- CDI: Cobalt in Electronics. Cobalt Development Institute. Guildford, UK, 2008a.
- CDI: Outlook of the global cobalt market. Cobalt News 08/1, January 2008, p 3 - 7. Cobalt Development Institute. Guildford, UK, 2008b.
<http://www.thecdi.com/cobaltnews.php>.
- CellTech: Fuel Cells for Real Fuels. CellTech Power, Inc. Westborough, MA, USA, 2008, <http://www.celltechpower.com/technology.htm>.
- CEPI: Pira International for CEPI: Possible Issues Surrounding the Recycling of Boxes with RFID Tags, London, December 2005.
- Chedid, R. et al.: The potential of gas-to-liquid technology in the energy market: The case of Qatar. Energy Policy 35 (2007) 4799 – 4811.
- Chen, Q.; Chen, Z.; Shi, L.; Li, X.; Zhou, G.; Zhang, Y.: Thin Solid Films. 272 (1996) 1 – 3.
- ChenYang-Technologies GmbH & Co. KG: NdFeB Magnete – Neodym Eisen Bor Magnete. Internet-Angebot http://www.ndfebmagnets.de/DE_index.htm Zugriff: 17.10.2008.
- Clinton Global Initiative: Solar Thermal Power Commitment, 2007.
<http://commitments.clintonglobalinitiative.org/projects.htm?mode=view&rid=209734>, Zugriff am 25. September 2008.
- CM: Cobalt and Cobalt Alloys. Key-to-Metals AG, Zürich 2008.
<http://www.key-to-metals.com/>.
- compoundsemiconductor.net: Handset evolution ensures GaAs HBT's dominance. 4. Mai 2007. <http://www.compoundsemiconductor.net>, Zugriff am 18. August 2008.
- COMTES700: Technical Concept, Objectives and Host Plant.
<http://www.comtes700.org/concept.xhtml>, Zugriff am 11. August 2008.
- Conectus Konsortium: Global Market for Superconductivity. 2007.
- Continental Automotive: ISAD und EHB machen Autos sparsamer und umweltfreundlicher. Continental: Hannover 2002. Online: http://www.conti-online.com/generator/www/de/de/cas/cas/themen/presse_service/hidden/pressemitteilungen/produkte/antriebe/hybridantriebe/pr_2002_03_07_genf_isad_de.html.

Continental: Hybrid- und Elektrofahrzeuge bei Autofahrern weltweit im Ansehen im Vormarsch. Continental: Hannover 2008. Online: http://www.conti-online.com/generator/www/de/de/cas/cas/themen/presse_service/hidden/pressemitteilung/produkte/antriebe/hybridantriebe/pr_2008_06_27_studie/pr_2008_06_27_studie_de.html.

crazy magnet: DER wirklich stärkste Magnet der Welt! Hält bis ca. 400 kg. <http://www.crazy-magnet.de>, Zugriff am 7. Juli 2008.

Cremer, C.: "Zukunftsmarkt CO₂-Abscheidung und Speicherung." *Umwelt, Innovation, Beschäftigung*, 2007 (04), Fallstudie im Auftrag des Umweltbundesamtes im Rahmen des Forschungsprojektes Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern durchgeführt von Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe.

Dadgar: Interview mit A. Dadgar, Universität-Magdeburg - Abteilung Halbleiterepitaxie, geführt von Marwede, M., Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 16. Juni 2008.

DaimlerChrysler: "Annual Report 2006."

Delzeit, R.; Bleischwitz, R. Tantal – A Case Study on Sustainable Resource Management, in: Martens, P.N. (Hg.), Aachen International Mining Symposia "Sustainable Development Indicators in the Minerals Industry" 18 – 20. Mai 2005 S. 917 – 942.

Deutsche Meerwasserentsalzung e.V.: Abbildungen zur Meerwasserentsalzung. Download. <http://www.dme-ev.de>, Zugriff am 2. Mai 2008.

DFG: MAK- und BAT-Werte Liste 2008. Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2008.

DGM: "Aluminium Congress 2006, Programme". Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V. (DGM), Zugriff am 30. September 2008. <http://www.dgm.de/past/2006/aluminium/program/>.

DGS, Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie: Lithium bewegt die Welt. München 2008. http://www.dgs.de/164.0.html?&tx_ttnews%5Btt_news%5D=1330&tx_ttnews%5BbackPid%5D=2&cHash=9aa1d10391.

- Dietzel, Y. (2004): Beschichtung von textilen Flächen mit den PVD-Technologien reaktives Vakuumbogen-Verdampfen und reaktives Magnetron-Sputtern. Dissertation an der Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden.
- DKI: Kupfer – Werkstoff der Menschheit. Düsseldorf: Deutsches Kupferinstitut, (o.J.).
- DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Institut für Technische Thermodynamik): Solarthermische Kraftwerke für die Meerwasserentsalzung. I.A. des BMU. Stuttgart, November 2007.
- Döring, Harry: Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung. Persönliche Mitteilung vom 19.3.2008. Stuttgart 2008.
- DSV: Feinmechanik und Optik. Branchenreport 2007 - WZ-Code 33. Deutscher Sparkassen- und Giroverband e. V. Berlin 2007.
- Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer Verlag, 1983.
- Eaglefield: Submission: Inquiry into developing Australia's non-fossil fuel energy industry. Eaglefield Holdings Pty Ltd. Submission to the House of Representatives Australia. 2005.
- ECN: Concentrating Solar Power – From Research to Implementation. European Commission (ECN), 2007. http://ec.europa.eu/energy/res/publications/doc/2007_concertrating_solar_power_en.pdf.
- EE Times Asia: Tantalum capacitors bank on reliability. Posted:03. March 2008. <http://www.eetasia.com>.
- Eggert, Peter: Niob – ein junges Legierungsmetall hat sich auf dem Weltmarkt etabliert. DIW Wochenbericht 45/99 DIW: Berlin. Online: http://www.diw.de/deutsch/99_45_2/30967.html#FN2. Zugriff: Januar 08.
- Elbaz, M.: Silicon Germanium Hetrojunction Bipolar Transistor Amplifiers Replace Gallium Arsenide for Wireless and Broadband Applications. Global Semiconductor Alliance (GSA), April 2008.
- Electrochemistry Encyclopedia: "SOLID OXIDE FUEL CELLS", Zugriff am 25. September 2008, <http://electrochem.cwru.edu/ed/encycl/art-f02-sofc.htm>.
- EMPA (Switzerland), ZAE-Bayern (Germany), NRC (Canada), CSTB (France), Fraunhofer IVV (Germany), TU Delft (Netherlands), Dr.Eicher+Pauli AG (Switzerland) "Vacuum Insulation Panels – Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications", 2005.

Enghag, Per: Lexikon der Elemente. Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2004.

epcos: Wo Keramik Vorsprung schafft. Dezember 2006.

http://www.epcos.com/web/generator/Web/Sections/Components/Page,locale=nn,r=247996,a=371442.html?_requestid=325847 Zugriff: 17.10.2008.

Erdmann, L.; Handke, V.; Klinski, S.; Behrendt, S.; Scharp, M.: Nachhaltige Bestandsbewirtschaftung knapper Ressourcen am Beispiel von Kupfer und Blei. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Werkstattbericht Nr. 68, Berlin 2004. Download unter <http://www.izt.de>.

Erdmann; Georg et a.: DRIVE - The Future of Automotive Power. Broschüre, McKinsey Company, 2006.

http://autoassembly.mckinsey.com/html/resources/publication/b_DRIVE.asp.

EURECA: Datenblatt Thermoelektrische Generatoren. EURECA Messtechnik GmbH. Köln 2008.

European Copper Institute: Copper & cars – Driving with copper! Press Kit. 2004 Online: <http://www.eurocopper.org/kupfer/kupfer-ressemitteilungen.html>.

European Copper Institute: Kupfer. 2000. Online:

<http://www.eurocopper.org/kupfer/kupfer-broschuren.htm.l>.

European Copper Institute: Roadmap Copper. 2007.

FLOG: Fachgebiet Logistik FLOG der Universität Dortmund. Auswirkung eines RFID-Masseneinsatzes auf Entsorgungs- und Recyclingsysteme. Gefördert durch BMBF. Dortmund 2007.

Falk, F.: Physik und Technologie von Solarzellen. Institut für Photonische Technologien. Institut für Physikalische Hochtechnologie Bereich Lasertechnik. IPHT Jena 2006.

FC Bulletin: CellTech wins Darpa/Army R&D contract. Fuel Cell Bulletin, April 2007.

FHA: Hybridantrieb. Fachhochschule Augsburg. 2006. <http://mb.international-master.net/downloads/hybridantrieb.pdf>.

Fialka, J. J. et al.: Big players race to farm waste into your gas tank. The Wall Street Journal, 29 June 2006.

Fischle, H. (2005) Superkondensatoren, made by WIMA", Sonderdruck, 2005.

- Fleurial, J.-P.: Selection and evaluation of materials for thermoelectric applications. Conf. Short Course on Thermoelectrics. Yokohama, 1993.
- Fokus Money: Goldene Zukunft prophezeit. (o.J.) Online:
http://www.focus.de/finanzen/boerse/aktien/tid-8730/rohstoffe_aid_235833.html.
- Fortis Bank / VM Group: The silver book. January 2008.
- Fraunhofer IZM et al.: Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Berlin, Hueck-Foils, Motorola & Zeiler. Analysis Methods and First Results of Si-based Transponders. PolyApply IST-IP-507143, WP D5.1.1 final. 2006.
- Fraunhofer IZM: Fraunhofer-Institute für Zuverlässigkeit und Mikrointegration. EuP Preparatory Studies "Televisions", 2007.
- Fraunhofer Magazin, 1.2006a.
- Fraunhofer Magazin, 2.2006b.
- Fraunhofer Magazin, 2.2008.
- Fraunhofer Magazin, 4.2005.
- Fraunhofer Magazin, 4.2006.
- Freiberger: Interview mit Freiberger, Freiberger Compound Materials GmbH, geführt von Marwede, M., Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 17. September 2008.
- Freudenrich, C.: How Fiber Optics Work. <http://www.howstuffworks.com/fiber-optic.htm>. Zugriff am 12. Juni 2008.
- Frost & Sullivan: World Supercapacitors Market, A 396. London 2003.
- Frost & Sullivan: World consumer secondary lithium battery. London 2005a.
- Frost & Sullivan: World industrial secondary lithium Battery. London 2005b.
- Frost: European Integral Horsepower Motors Markets. Frost & Sullivan. London 2003.
- Frost: Developments in Tomography Technologies. Frost & Sullivan Technical Insights. San Antonio, TX, USA, 2007.
- Garche, J. (2006): Elektrochemische Energiespeicher: Stand, Probleme, Perspektiven. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 56(10), S. 61–70.
- Gautschi, G. (2002): "Piezoelectric Sensoric", Springer.

- Gebel, J.; Yüce, S.: Aktuelle Trends und Märkte in der Meerwasserentsalzung und ihre Bedeutung für deutsche Unternehmen und Hochschulen. S.T.E.P. Consulting GmbH, 2007.
- Geyer, M.: CSP Projects Worldwide. European Solar Thermal Electricity Association (ESTELA), 2008. http://213.133.109.5/video/energy1tv/Jan%20NEU/Konferenz/Wirtschaft/10,000_SGW/23_AS/23_04_AS_02_Desertec_CSP_Worldwide.pdf.
- GFMS Limited: World Silver Survey 2007. A Summary. Produced for The Silver Institute. GFMS, London 2007.
- Gloor: Datenblätter von Asynchronmotoren. Gloor Engineering, Sufers, CH, 2006. <http://www.energie.ch/at/asm/beispiel/daten.htm>.
- Grünwald, R.: CO₂-Abscheidung und -Lagerung bei Kraftwerken. Arbeitsbericht 120, Büro für Technikfolgenabschätzung des deutschen Bundestages, November 2007.
- Günther B. (2006): Nanosilber in Beschichtungen, 3. Fachkonferenz Nanotechnologie in der Lackpraxis. Farbe & Lack, 87 – 95.
- Hagelüken, Christian; Zuber, Ralf : Emissionsfreies Verfahren zum Edelmetall-Recycling aus Brennstoffzellen. http://www.preciousmetals.umicore.com/publications/presentations/fuel_cells/show_FCAward_092004.pdf. 2004.
- Hagelüken, C. et al.: Stoffströme der Platinmetallgruppe. GDMB Mediaverlag, Clausthal-Zellerfeld 2005.
- Hagelüken: Interview mit Herrn Dr. Christian Hagelüken von Umicore Precious Metals Recycling, geführt von Lorenz Erdmann und Siegfried Behrendt, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 22. Februar 2008.
- Hassan, Ali (2001): Rohstoffeinsparung durch Kreislaufführung von verbrauchten Katalysatoren aus der chemischen Industrie. Nr. 21/2001, Umweltbundesamt Berlin.
- Hautmann, G.: Interview mit G. Hautmann, Novatec BioSol AG, geführt von Marwede, M., Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 06. Mai 2008.
- Heinritzi, J.: Seltene Erden vor Nachfrageboom. Umweltbewusstsein und technischer Fortschritt treiben den Bedarf an so genannten Seltenen Erden. Wie Anleger profitieren. FOCUS-Money, 3.2.2008.

- Helmigh: Interview mit Herrn Martin Helmigh vom Fachgebiet Logistik der Universität Dortmund, geführt von Lorenz Erdmann, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 31. Januar 2008.
- Hischier, R.; Classen, M.; Lehmann, M.; Scharnhorst, W.: Life Cycle Inventories of Electric and Electrical Equipment: Production Use and Disposal - econinvent report Nr. 18. ecoinvent centre, EMPA, St. Gallen/Dübendorf, Dezember 2007.
- Hoek, Eric: Engineers develop revolutionary nanotech water desalination membrane. Physorg.com, 6 November 2006.
- Hoffmann, D.: Interview mit D. Hoffmann, DIAS Infrared Systems, geführt von Marwede, M., Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 24. Juni 2008.
- Holleman, Wiberg 1985: Holleman, A. F.; Wiberg, E.: Lehrbuch der anorganischen Chemie. de Gruyter 1985.
- Honda Motor Co., L. (2007): "Annual Report 2007".
- Hund-Rinke, K.; Marscheider-Weidemann, F.; Kemper, M. (2008): Beurteilung der Gesamtumweltexposition von Silberionen aus Biozid-Produkten. Gutachten für das Umweltbundesamt, FKZ: 360 04 020.
- Hüsing, Nicola; Ulrich Schubert: "Aerogele – luftige Materialien: Chemie, Struktur und Eigenschaften", 1998.
- Hybrid-Autos.Info: Hybridantrieb.org. (o.J.). Online: <http://www.hybridantrieb.org/>. Zugriff Juni 2008.
- IAO/ISI: Innovation durch Nanotechnologie in der Umwelttechnik. UM Baden-Württemberg. Stuttgart 2008.
- IBS Magnet (o.J.): Hochenergiemagnete. Online: <http://www.ibsmagnet.de/knowledge/hochenergie.php>. Zugriff: Juni 2008.
- ICDA: Chromium and its Uses. International Chromium Development Association. Paris, April 2008, <http://www.icdachromium.com/chromium-introduction.php>.
- ICDA: Statistical Bulletin 2007 Edition. Internationale Chromium Development Association. Paris, 2007.
- ICSG International Copper Study Group: Copper – Release of the Yearbook 2006, ICSG Press Release. Online: www.icsg.org (Zugriff: Dezember 2006).
- ICT, Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (2008): Persönliche Mitteilung.

- ICT: Lithium-Ion System. Produktinformation. Fraunhofer Institut für Chemische Technologie. Pfinztal 2007.
- IDTechEx: RFID Market projections 2007 – 2017 und 2008 – 2018.
<http://www.idtechex.com>, Zugriff am 5.3.2008.
- IEA International Energy Agency: Prospects for Hydrogen and Fuel Cells. Paris 2005.
- IEA, Potential for Building Integrated Photovoltaics, 2002.
- IEA: "World Energy Outlook 2007 - Factsheet China", International Energy Agency (IEA). http://www.iea.org/textbase/papers/2007/fs_china.pdf.
- IMF: "World Economic Outlook Database". International Monetary Fund (IMF), Zugriff am 09. Oktober 2008.
<http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2008/02/weodata/index.aspx>.
- IMF: World Economic Outlook, October 2007. International Monetary Fund. Washington 2007.
- Industrie Forum: Tailored Blanks im Aufwind. Schlütersche Verlagsgesellschaft, Hannover, August 2008. <http://www.industrie-forum.net/de/if/online/2809287/>.
- Informationsstelle Edelstahl Rostfrei: Edelstahl Rostfrei für die Wasserwirtschaft. Merkblatt 893. 2006.
- Institut für Energie FHBB, EMPA, ZAE-Bayern, TU Delft, Dr.Eicher+Pauli AG, Vakuum-Isolations-Paneele im Gebäudesektor, Systeme und Anwendungen, 2005.
- Institut für Energie FHBB, ESU-services, Ökobilanz eines Vakuum-Isolations-Paneels (VIP), 2003.
- INT (2006): INT (Fraunhofer Institut Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen) (2006): Auswertung des INT nach Daten von VDEW auf Basis des Endenergieverbrauchs in Deutschland 2004. Euskirchen.
- IPA: Newsletter Autumn 2007. International Platinum Group Metals Association. München 2007. <http://www.ipa-news.com/about/news/publications/newsletter.htm>.
- IPC: Cost of lead-free solders. Adhesives and Sealing Industries Association. Powell, OH, USA. 1 July 2007.
http://www.adhesivesmag.com/CDA/Archives/BNP_GUID_9-5-2006_A_1000000000000126906.

- ISEA (2008): Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA) der RWTH Aachen. <http://www.isea.rwth-aachen.de/eess/technology/redox-flow>.
- ISO/IEC TR 24729-2:2007: Information Technology – Radio frequency identification for item management – Implementation guidelines – Part 2: Recycling and RFID tags. Technical report, First edition, Proof/epreuve.
- ITA: Titanium 2008. International Titanium Association. Broomfield, USA. <http://www.titanium.org/librarysearch.cfm>.
- ITRI: ITRI report calls for increased investment in tin mining. ITRI Ltd., St. Albans, UK. Release 19 February 2008a. http://www.itri.co.uk/pooled/articles/BF_NEWSART/view.asp?Q=BF_NEWSART_299182, P:\DOWNLOAD\ROHSTOFFE\ZINN\ITRI_Supply_Demand.mht.
- ITRI: New ITRI study illustrates the reasons behind continued boom in tin use. ITRI Ltd., St. Albans, UK. 19 February 2008b, <http://www.tintechnology.com/>.
- IUTA, Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (2007): Untersuchung der Recyclingfähigkeit der verschiedenen Brennstoffzellen-Typen und deren Komponenten sowie Entwicklung geeigneter Verwertungsmethoden. Abschlussbericht AiF-Vorhaben-Nr. N 13869, Duisburg.
- IZT, EMPA, BSI: 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 2004.
- IZT, EMPA: Prognose möglicher Auswirkungen eines künftigen massenhaften Einsatzes von RFID-Chips im Konsumgüterbereich auf die Umwelt und die Abfallentsorgung. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Eidgenössische Materialprüfungs- und -forschungsanstalt, im Auftrag des Umweltbundesamtes. Unveröffentlichter Zwischenbericht. Berlin, 2008.
- Jan Cremers: "Vakuum-Dämmsysteme Einsatzmöglichkeiten und planerische Hinweise", 2005.
- Jochem E., Jäger C., Battaglini A., Köwener D., Schade W. et al. (2008): "Investitionen für ein klimafreundliches Deutschland." Endbericht des KlimaInvest 2020 Projektes im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Karlsruhe, Berlin.

Jochem, E.; M. Schön et al.: Werkstoffeffizienz. Einsparpotenziale bei Herstellung und Verwendung energieintensiver Grundstoffe. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2004.

Jochem, Eberhard; Bradke, Harald; Cremer, Clemens; Dreher, Carsten; Ebersberger, Bernd; Edler, Jakob;; Krebs, A.; Marscheider-Weidemann, Frank; von Oertzen, Jürgen; Radgen, Peter; Ruhland, Sascha; Som, Oliver; Mannsbart, Wilhelm; Frietsch, Rainer (2007): Developing an Assessment Framework to Improve the Efficiency of R&D and the Market Diffusion of Energy Technologies EduaR&D. Fraunhofer ISI, Karlsruhe.

Jörissen, L.: Interview mit Jörissen, L., Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung (ZSW), "SOFC", geführt von Marwede, M., Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 11. September 2008.

Kaiser, Oliver; Eickenbusch, Heinz; Grimm, Vera; Zweck, Axel: Zukunft des Autos. VDI Technologiezentrum, Düsseldorf 2008.

Källhammer, J.-E. (2006): "The road ahead for car night-vision." *Nature Photonics*, 2006 (5): S.12-13.
<http://npg.nature.com/nphoton/journal/vsample/nsample/full/nphoton.2006.5.html>.

Kamalasanan, M. N.: "Thin Solid Films" 288 (1996) 112 - 15.

Kanellos, M.; Greif, B.: LCD-TVs- verkaufen sich besser als Röhrenfernseher. ZDNet Deutschland News, 2006.
<http://www.zdnet.de/news/business/0,39023142,39149346,00.htm>. Zugriff am 10. April 2008.

Kathke, M.: Supraleitung. Eine Einführung. FH Aachen. 1999.

Katscher, U.: Schonender Blick in den Körper. Spektrum der Wissenschaft, Dezember 2003, p 16 – 19.

Kautsch, Peter; Matschullat, Jörg (Hg.): "Rohstoffe der Zukunft- Neue Basisstoffe und neue Energien" Frank&Timme Berlin 2005 ISBN:3865960464.

Kawaguchi, Y.: Recycling technology for LCD-TVs and closed-loop recycling of waste plastics; 6th International Electronics Recycling Kongress (IERC), Hamburg, 17.-19. Juni 2007.

Kempf, P.: SiGe BiCMOS Plays a Growing Role in the Mobile Platform. *WD&D*, 12 (2005): A. 20 – 26.

- Kester: Lead-Free Alloys. Kester Connecting Innovation. Itasca, IL, USA, 2008.
<http://www.kester.com/en-us/leadfree/alloys.aspx>.
- Kimmich, R.: Performance characteristics of drive motors optimized for die-cast copper cages. Proc. Conf. Energy Efficiency in Motor Driven Systems. Heidelberg, 5 - 8 September 2005.
- Kleinhempel, A.K.: "Innovative Dämmstoffe im Bauwesen Forschungsstand und Marktübersicht", Bremer Energie Institut, 2005.
- Knaak, Klein, Bilow, Auer: Fassaden, Fassaden der Zukunft, Birkhäuser, Basel, 2007.
- Knebel, O., Interview mit Knebel, O., Flabeg, "Solar Spiegel", geführt von Marwede, M., Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 15. September 2008.
- Kötz, R. (2002): Doppelschichtkondensatoren – Technik, Kosten, Perspektiven. 138 - 149. Tagungsband Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik 2002.
- Kötz, R.; Dietrich, P.; Hahn, M.; Büchi, F. (2005): Supercaps – Eigenschaften und Fahrzeuganwendungen. VDI-Berichte Nr. 1874, 175 – 188.
- Kramer, D. A.: U.S. Geological Survey Minerals Yearbook 2006, July 2007.
- Krewitt, Wolfram; Nast, Michael et al: Energiewirtschaftliche Perspektiven der Photovoltaik. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Stuttgart 2005.
- Kuphaldt, R. R.: Lessons In Electric Circuits -- Volume III - Diodes and Rectifiers. 2000.
<http://www.ibiblio.org>. http://www.ibiblio.org/kuphaldt/electricCircuits/Semi/SEMI_3.html. Zugriff am 23. Juni 2008.
- Lang, S. B.: Pyroelectricity: From Ancient Curiosity to Modern Imaging Tool. *Physics Today*, 60 (8), S. 31. 2005.
- Laser Materials Corporation: Neodymium YAG. Product Brochure. 2008.
- Leoni: Spezialleitungen für Hybrid-Fahrzeuge. Leoni in Team, Ausgabe 04/2005.
- Lexikon der Physik. Thermoelektrischer Generator. Frankh'sche Verlagsbuchhandlung. Stuttgart, 1970.
- Lindegger, Markus; Biner, Hans-Peter; Evéquo, Blaise; Salathé, Dominique: Effizienter IEC Permanent-Magnet Motor (3 kW). Schweizerische Eidgenossenschaft – Europäisches Departement für Umwelt, Energie und Kommunikation / Bundesamt für Energie BFE: Bern 2008.

- Lindegger, Markus; Salathé, Dominique; Gosteli, Yann Imgrüth, Daniel; Zumstein, Damian; Biner, Hans-Peter; Evéquo, Blaise; Emery, Marc: Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent-Magnetmotoren. Schweizerische Eidgenossenschaft – Europäisches Departement für Umwelt, Energie und Kommunikation / Bundesamt für Energie BFE: Bern. O.J. Online:
http://www.bfe.admin.ch/php/modules/enet/streamfile.php?file=000000009079_01.pdf&name=000000260028_Anhang.pdf. Zugriff am 15. Juli 2008.
- Lucas, Rainer; Röhr, Anja; Scharp, Michael: Das Rohstoffsystem Kupfer – Status Quo, Perspektiven und Handlungsbedarf aus Sicht einer nachhaltigen Ressourcenpolitik. Wuppertal-Institut: Wuppertal, 2007.
- Luo, Y.: Bonded magnet industry in China. UK Magnetics Society MagNews, Spring 2000, p. 20 – 40.
- Lutz, A. et al.: Umweltwirkungen der Farbstoffsolarzelle. Analyse des Ruthenium-Vorkommens und Bewertung des Ruthenium-Farbstoffs. Bericht aus dem BMBF-Projekt ColorSol. Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Stuttgart 2007a.
- Lutz, Andreas; Heubach, Daniel et al: Bericht aus ColorSol: Umweltwirkungen der Farbstoffsolarzelle – Analyse des Ruthenium-Vorkommens und Bewertung des Ruthenium-Farbstoffs, Fraunhofer Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, 2007b.
- manager-magazin: Ab 2025 nur noch Hybrid-Antriebe. 2008. Online:
<http://www.manager-magazin.de/unternehmen/artikel/0,2828,562317,00.html>.
- Manzel & Himmerich Consulting: Hochtemperatursupraleitung. Quo Vadis? Vortrag 2004.
- Marklines Co. Ltd: Worldwide HEV Sales. 2008. Online:
<http://www.marklines.com/en/numproduct/index.jsp>.
- Matos, G. R.; Kramer, D. A.: Gallium End-Use Statistics, USGS 2005a.
- Matos; G. R.; J.D. Jorgenson; M.W. George; P. Gabby: Germanium End-Use Statistic. USGS September 2005b.
- Merck KGaA: LCD-Explorer. Merck KGaA, Zugriff am 12. März 2008.
<http://www.merck.de/servlet/PB/menu/1235790/index.html>.
- Mertens, A.; M. Koch: Tailored Blank: Geschichte eines Erfolgs. SLT 2003, S169 – 172.

- Metal Suppliers Online: Stainless Steel 254 SMO™. Material Property Data. 2008.
<http://www.suppliersonline.com>.
- Mieritz, T.: Bewertung der Abscheidung und Lagerung von Kohlendioxid in Deutschland vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeit und Ansätze zur Integration in den Emissionshandel. Diplomarbeit, Fachhochschule Eberswalde, 2007.
- MII: Antimony. Minerals Information Institute. Golden, CO, USA. 2008.
<http://www.mii.org/Minerals/photoant.html>.
- Mildner: Interview mit Herrn Mildner von PolyIC, geführt von Lorenz Erdmann, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 13. März 2008.
- MMTA: Antimony. Minor Metals Trade Association. London 2008.
- MPG: Auf dem Weg zum Chip-Labor. Tätigkeitsbericht 2005 des Max-Planck-Instituts für Kohleforschung.
- Mulholland, J. ; Sheahan, T. P. ; McConnell, B. : Analysis of Future Prices and Markets for High Temperature Superconductors. Draft. 2001.
- Müllenmeister, Hans Jörg: Seltenerdmetalle: Nützliche Kobolde der Zukunftstechnologie. Rohstoffwelt vom 23.05.2007.
<http://www.rohstoff-welt.de/news/artikel.php?sid=776>.
- Müller, Nissen 2008: Interview mit Jutta Müller und Andreas Nissen vom Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, Berlin, geführt von Lorenz Erdmann, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 1. Februar 2008.
- Murata: Choosing between ceramic and tantalum capacitors. Dataweek, Electronics and Communications Technology, 31. Oct. 2007.
- Naujoks, Ildiko: Ökologischer und ökonomischer Vergleich von CuInS₂- und CuInSe₂-Dünnschichtsolarmodulen über den Lebenszyklus. Diplomarbeit im Studiengang Technischer Umweltschutz der TU-Berlin. Berlin, November 2000.
- Naumov, A.V.: Review of the World Market of Rare-Earth Metals. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2008, Vol. 49, No 1, pp. 14 – 22.
- NHS: Hip replacement. National Health Service, UK, 2008
<http://www.nhs.uk/conditions/hip-replacement/Pages/Questionstoask.aspx?url=Pages/Questionstoasktab.aspx>.

- Ningbo Tongchuang: Neodym-Magnet (Nd) für Windkraftturbinen Grade N42. www.directindustry.de/prod/ningbo-tongchuang-strong-magnets. Zugriff am 3. Mai 2008.
- NIST: Gallium Arsenide: a Faster Alternative to Silicon for Microprocessors and Telecommunications Applications. National Institute of Standards and Technology (NIST). <http://www.atp.nist.gov/eao/sp950-2/chapt4-19.htm>. Zugriff am 20. Oktober 2008.
- Nitsch, J.: Globale Energieszenarien – Langfristige Bedeutung erneuerbarer Energien. Deutsche Luft- und Raumfahrt, ZVEI – Branchenworkshop: Regenerativer Strom aus Kraftwerken – Trends, Bedarfe und Zukunftsmärkte für die Automation. Frankfurt am Main, 5. Juni 2008.
- Nitsch, Joachim: Leitstudie 2007: Ausbaustrategie Erneuerbare Energien. Aktualisierung und Neubewertung bis zu den Jahren 2020 und 2030 mit Ausblick bis 2050. Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Stuttgart 2007.
- Nitsch, Joachim; Krewitt, Wolfram; Nast, Michael: Energiewirtschaftliche Perspektiven der Fotovoltaik. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Stuttgart, März 2005.
- Oertel, D. (2008): Energiespeicher –Stand und Perspektiven. Sachstandsbericht zum-Monitoring "Nachhaltige Energieversorgung". Arbeitsbericht Nr. 123, TAB, Berlin.
- OICA International Organization of Motor Vehicle Manufacturers: Production Statistics. O.J.. Online: www.oica.net.
- Ökopol: Sander, Knut u. a.: Stoffbezogene Anforderungen an Photovoltaik-Produkte und deren Entsorgung. Ökopol, Institut für Ökologie und Politik GmbH, Hamburg IE, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Leipzig. Umwelt-Forschungs-Plan, FKZ 202 33 304. Endbericht. Hamburg / Leipzig, den 15.01.2004.
- ORNL: ORNL Superconducting Technology Program for Electric Power Systems. Annual report for FY 2006. published in 2007.
- OSRAM: LED Technik. OSRAM. http://www.osram.de/osram_de/Professionals/Opto-Halbleiter_%26_LED/Alles_ueber_LED/LED_Technik/index.html. Zugriff am 11. Juni 2008.
- Otterbach, Bernd: Die Gewichte verschieben sich. Automobilindustrie: Würzburg 2008. Online: <http://www.automobil-industrie.vogel.de/mixed/articles/111400/>.

Outokumpu: Rostfreie Coil Produkte von extra breit bis hauchdünn. Outokumpu Stainless, 2008.

Parks, W. ; Livengood, J. ; Daley, J.: Superconductivity for Electric Systems. Program Plan FY 2005 – 2009. January 2005.

PennWell: Fiber-optic cable is still going strong, finds study. 05. Juni 2007.
http://cim.pennnet.com/display_article/294512/27/ONART/none/CONTR/1/Fiber-optic-cable-market-still-going-strong,-finds-study/. Zugriff am 18. Juni 2008.

Periodensystem der Elemente - Kupfer. <http://www.periodensystem.info/index.htm>.
Zugriff im Januar 2008.

Periodensystem: Das Periodensystem der Elemente - Niob.
<http://www.periodensystem.info/index.htm>. Zugriff am 16. Januar 2008.

Photon 2008: Jährliche Markterhebung. Photon – Das Solarstrom-Magazin, Ausgabe Nr. 4/2008.

Philips: Schneller drehen mehr sehen: Hochleistungs-Computertomograph von Philips bietet neue Möglichkeiten in der Diagnostik. Hamburg, 23. April 2008.

Pictures of the Future. Siemens Zeitschrift, ISSN 1618-548X, Herbst 2003.

Pictures of the Future. Siemens Zeitschrift, ISSN 1618-548X, Herbst 2005.

Pictures of the Future. Siemens Zeitschrift, ISSN 1618-548X, Frühjahr 2006.

Pictures of the Future. Siemens Zeitschrift, ISSN 1618-548X, Herbst 2007.

Pictures of the Future. Siemens Zeitschrift, ISSN 1618-548X, Frühjahr 2008.

Platts' Metal Bulletin, Dec. 2004 Metal Bulletin Ltd London, UK.

Powerelectronics: China to overtake United States battery market. Power Electronics Technology, internet site. 2008.
http://powerelectronics.com/portable_power_management/batteries/power_china_overtake_united/.

Primas, A.: Life Cycle Inventories of new CHP systems - ecoinvent report No. 20. ecoinvent centre, Dübendorf, Zürich, Dezember 2007.

Prognos: Die Gesundheitsbranche: Dynamisches Wachstum im Spannungsfeld von Innovation und Intervention. Prognos AG, Basel 2007.

Prometheus: Thin film Forecast, Prometheus Institute PV-News The Industry's Oldest Newsletter Volumen 26, no 6, 2007.

Puschmann, Stefan: Kernspintomographie. Damme 2008.
<http://www.radiologie-damme.de/dkernspintomographie.htm>.

PVNET: Workshop Proceeding "RTD Strategy for Photovoltaik" Ispra 30/31 European Commission, DG JRC, Special Publication: S.P.I.02.117, 2002.

Raade, G.: Scandium. In: Chemical and Engineering News. American Chemical Society. 2003.

Ragwitz, M.: "Zukunftsmarkt Solarthermische Stromerzeugung." Umwelt, Innovation und Beschäftigung, 2007 (03).
<http://opus.kobv.de/zlb/volltexte/2008/6347/pdf/3446.pdf>.

Ram, S. K.: Dielectric-Emissive Coatings in High Definition Plasma Display Panels. Zugriff am 10. April 2008. <http://sanjaykram.blogspot.com/2007/10/dielectric-emissive-coatings-in-high.html>.

Reiche, M.; Christiansen, S.: Properties of sSOI wafers. <http://www.mpi-halle.mpg.de/departement2/research-topics/major-research-collaborations/tesin/abstract/properties-of-ssoi-wafers/>. Zugriff am 20. Oktober 2008.

Reichelt, J.: Interview mit J. Reichelt, PPM Pure Metals, geführt von M. Marwede, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 26. September 2008.

Rodewald, W.; Katter, M.; Reppel, G. W.: Fortschritte bei pulvermetallurgisch hergestellten Neodym-Eisen-Bor Magneten. 2002.

Roland Berger: Umweltpolitische Innovations- und Wachstumsmärkte aus Sicht der Unternehmen. 2007.

Roos, G.: Expect mixed prices, slow growth for tantalum capacitors. Purchasing 11/15/2007.

Roskill Reports: www.roskill.com/reports/rare.

Roskill: The Economics of Tin. Outline. Roskill Information Services. London, November 2004. <http://www.roskill.com/reports/tin>.

Roskill: The Economics of Chromium. Outline. Roskill Information Services. London, February 2005a. <http://www.roskill.com/reports/chromium>.

- Roskill: The Economics of Platinum Group Metals. Outline. Roskill Information Services. London, October 2005b. <http://www.roskill.com/reports/platinum>.
- Roskill: The Economics of Lithium. Outline. Roskill Information Services. London, July 2007a. <http://www.roskill.com/reports/lithium>.
- Roskill: The Economics of Cobalt. Outline. Roskill Information Services. London, January 2007b. <http://www.roskill.com/reports/cobalt>.
- Roskill: The Economics of Titanium Metal. Outline. Roskill Information Services. London, March 2007c. <http://www.roskill.com/report.html?id=85>.
- Roskill: The Economics of Antimony. Outline. Roskill Information Services. London, July 2007d. <http://www.roskill.com/reports/antimony>.
- Roth, F.: Hochtemperatursupraleiter. Hauptseminar Festkörperphysik. 20. Dezember 2006.
- Roth, M.: Intense Laser Beams. TU Darmstadt. O.J.
- Røyset, J.: Scandium in Aluminium Alloys. <http://www.home.no/al-sc/>. Zugriff am 30. September 2008.
- Røyset, J.; Ryum, N.: Scandium in Aluminum Alloys. *International Materials Reviews*, 50 (1), S. 19 - 44, Februar 2005.
- RS: Sustainable biofuels: prospects and challenges. Policy document 01/08. The Royal Society Policy Document. London, January 2008.
- Ruby: Lanthanoide. Vorlesung an der Universität Freiburg, http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/metalle_0.html. Zugriff am 3. Februar 2008.
- Rutherford: Silicium. Rutherford Online Lexikon der Elemente. Uniterra, Berlin 2006. <http://www.uniterra.de/rutherford/ele014.htm>.
- RWI/ISI/BGR: Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI), Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Essen, Karlsruhe, Hannover 2007.
- Sandmeyer Steel Company: SAF 2507®. Specification Sheet. Sandmeyer Steel Company, 2008.

- Sarazin: Matthias Fawer: Solarenergie 2007 – Der Höhenflug der Solarindustrie hält an. Sarazin Nachhaltigkeitsstudie. Sustainable Investment Bank Sarazin & Cie AG. November 2007.
- Scandium Information Center: Website www.scandium.org, Zugriff am 20. Oktober 2008.
- Schade, Wolfgang; Wietschel, Martin; Weaver, Paul M. (2007): Reframing Sustainable Transport: Exploring Hydrogen Strategies Using Integrated Sustainability Assessment. MATISSE Working Papers, 15 (7/2007). SERI Nachhaltigkeitsforschungs- und -kommunikations GmbH, Wien.
- Scharp, M.: Umweltrelevante metallische Rohstoffe – Metallauswahl. Unveröffentlichtes Arbeitspapier im Rahmen des Projektes Materialeffizienz und Ressourcenschonung (MaRes), gefördert von BMU und UBA 2008.
- Schöder, Tim: CT-Detektor-Know-how. Wie aus Keramik und Elektronik Medizintechnik wird. Medical Solutions Juli 2004, p62 – 68.
- Schuler, A.: Interview mit A. Schuler, Hexis AG, geführt von M. Marwede, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 11. September 2008.
- Seifert, Sandmann: Seifert, Thomas; Sandmann, Dirk: Mineralogy and geochemistry of indium-bearing polymetallic vein-type deposits: Implications for host minerals from the Freiberg district, Eastern Erzgebirge, Germany Ore Geology Reviews 28 (2006) 1 – 31.
- Sense Workshop: Life Cycle Assessment of PV Technology. Copernicus Institute for Sustainable Development and Innovation, Utrecht University. 2006.
- Sepold, G.; Grupp, M.: Laser Materials Processing – Quo Vadis? BIAS – Bremen Institute of Applied Beam Technology. 2002.
- Serjak, W. A.; Seyeda, H.; Cymorek, C. G.: Tantalum availability – 2000 and beyond, 2003. Online:
http://hcstarck.com/pages/88/tantal_information_brochure_0302.pdf, 27.11.2004.
- Shell: Deutsche Shell GmbH. Mehr Autos – weniger Verkehr?, Szenarien des Pkw-Bestands und der Neuzulassungen in Deutschland bis zum Jahr 2020, Hamburg 2001.
- Shell: Kraftstoff sparen in Deutschland Daten und Fakten. Shell in Deutschland. Hamburg 2007.

- Siemens: MAGNETOM Avanto. Produkt-Umweltdeklaration. Siemens Healthcare. München 2006.
- Siemens: Pictures of the Future. Frühjahr 2008.
- Siemens: SOMATOM Definition. Environmental Product Declaration. Siemens Healthcare. München 2007.
- Smandek, B.; Maßmann, B.: Diodengepumpte Nd:YAG-Laser für den Industrieinsatz. In: LTJ April/Mai 2004 Nr.1; www.laser-journal.de.
- Smolej, A.; Slacek, E.; Turk, R.: State and development of some wrought aluminium alloys for special and general applications. *Metalurgja*, 41 (3) 2002, S. 149 – 155.
- Socolof, M. L.; Overly, J. G.; Kincaid, L. E.; Geibig, J. R.: Desktop Computer Displays: A Life Cycle Assessment, University of Tennessee for Clean Products and Clean Technologies, Dezember 2001.
- Soldertec: Intel innovates new concepts in solder. Soldertec Global. St. Albans, UK, 2008.
- Spiegel Online: Ökonomen sagen Ölpreis von 200 Dollar voraus. Spiegel Internet vom 31.01.2008.
- Splettstößer, J.: Interview mit J. Splettstößer, United Monolithic Semiconductors, geführt von Marwede, M., Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 14. August 2008.
- Stama: Komplexe Medizin-Werkstücke von der Stange. Stama Maschinenfabrik, Schlierbach, CH, 2006. http://www.innotool.ch/S_AWR_SMM_0606.pdf.
- Steele, R. V.: "Emerging SSL Markets for General Illumination", Strategies Unlimited, DOE Solid-State Lighting Workshop, 23 - 24. April 2007.
- Steiger 2008: Interview mit Herrn Steiger vom Science to Business Center Druckbare Elektronik der Firma evonik, geführt von Lorenz Erdmann, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 13.3.2008.
- Steinberger-Wilckens, R.: Interview mit R. Steinberger-Wilckens, Forschungszentrum Jülich, geführt von Marwede, M., Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 11. September 2008.
- Steinfeldt, M.; Gleich, A. v.; Petschow, U.; Haum, R.; Chudoba, T.; Haubold, S.: Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Berlin, November 2004.

- Stephenson, R. et al.: Electrical Performance Characteristics of MLCC's with low Lay-down AgPd Powders. In "CARTS Europe 2004: 18th Annual Passive Components Conference, Oct. 18 – 21, 2004.
- Sterzel, H.-J.; K. Kuehling: Thermoelectric active materials and generators and Peltier devices comprising them. Patent EP1289026. 2002.
- Stieler, W.: Atomkraft zur Meerwasserentsalzung. Interview mit Anne Lauvergeon (Fa. Areva). 11.11.2005. <http://www.heise.de/tr/Atomkraft-zur-Meerwasserentsalzung-/artikel/66059>.
- Stryker: Prospekt "Endoprothetik Hüfte". Stryker GmbH & Co. KG. Duisburg, 2005.
- SUBAT: Sustainable Batteries. Final Public Report. Vrije Universiteit Brussel - ETEC. Brussels 2005. http://www.e-mobile.ch/pdf/2005/Subat_WP5-006.pdf.
- Syed et al. 2007: Syed, A.; Demarest, K., Deavours, D.D.: Effects of Antenna Material on the Performance of UHF RFID Tags. IEEE International Conference, 26 – 28 March 2007 Page(s):57 – 62.
- SynFuel: HTR Technology. SynFuel Technology Ltd. Presentation o.J. <http://synfueltechnology.com/1.html>.
- Technology Review, Das M.I.T.-Magazin für Innovation. ISSN 1613-0138. 1.2008.
- TEG: Lizenzen für Thermoelektrische Generatoren. Strom aus Wärme. Flyer der Fraunhofer-Technologie-Entwicklungsgruppe TEG. Stuttgart, 2008.
- Thail, Meridian: The trouble with lithium. Implications of future PHEV production for lithium demand. William. Meridian International Research. Martainville, FR, Dec. 2006. http://www.evworld.com/library/lithium_shortage.pdf.
- Thein, M. (o.J.): Kraftfahrzeug-Elektrik/Elektronik. Institut für Kraftfahrzeugtechnik. O.J. Online: www.fh-zwickau.de/mbk/kfz_ee/praesentationen/Elma-Starter-KSG-Hybrid.pps Zugriff: Juli 2008.
- ThyssenKrupp Stainless: NIROSTA® 4565 S. Krupp Thyssen NIROSTA, 2008.
- TIC - Tantalum-Niobium International Study Center: Tantalum – Raw Materials and Processing. o.J.. Online: <http://www.tanb.org/tantalum1.html>. Zugriff: Januar 08.
- TÜV: Orthopädische Implantate. Bestimmende Faktoren der mechanischen Charakteristik und der Biokompatibilität. TÜV SÜD Product Service GmbH. 2006.
- UBA: Zukunftsmarkt Synthetische Biokraftstoffe. Umweltbundesamt, Dessau 2007a.

UBA: Zukunftsmarkt Stofferkennung und Trennung. Umweltbundesamt, Dessau 2007b.

UBA: Zukunftsmarkt Biokunststoffe. Umweltbundesamt, Dessau 2007c.

UBA: Zukunftsmarkt Dezentrale Wasseraufbereitung und Regenwassermanagement. Umweltbundesamt, Dessau 2007d.

UBA: Zukunftsmarkt CO₂-Abscheidung und Speicherung. Umweltbundesamt, Dessau 2007e.

Ullmann: High-Temperature Materials. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag. Weinheim 2005.

Ullmann: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag GmbH Co. KGaA, Weinheim 2008.
<http://mrw.interscience.wiley.com/emrw/9783527306732/home/>.

Ulrich Heinemann: "Hocheffizienter Wärmeschutz durch evakuierte Elemente: Vakuumisulationspaneele und Vakuumisoliertgläser VIP und VIG", 2007.

UMBW: Innovation durch Nanotechnologie in der Umwelttechnik. Funktionelle Oberflächen und Farbstoffsolarzellen. Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart 2008.

University of California: Life-Cycle Energy Assessment of Alternative Water Supply Systems in California. Prepared for California Energy Commission. University of California, 2005.

USGS: Rare Earth Elements - Critical Resources for High Technology. USGS Fact Sheet 087-02.2002; <http://pubs.usgs.gov/fs/2002/fs087-02/fs087-02.pdf>. United States Geological Survey, Reston, VA, USA. 2002.

USGS: 2005 Minerals Yearbook. Volume I, Metals and Minerals. United States Geological Survey, Reston, VA, USA. 2005.

USGS: Mineral Commodity Summaries 2006. United States Geological Survey, Reston, VA, USA. 2006a.

USGS: 2006 Minerals Yearbook. Volume I, Metals and Minerals. United States Geological Survey, Reston, VA, USA. 2006b.

USGS: Mineral Commodity Summaries 2007. United States Geological Survey, Reston, VA, USA. 2007.

- USGS: Mineral Commodity Summaries 2008. United States Geological Survey, Reston, VA, USA. 2008.
- VARIOTEC Sandwich-Elemente GmbH & Co. KG. Technisches Datenblatt VIP-Vakuum-Isolations-Paneel, 2008.
- VdA Verband der Automobilindustrie: Autojahresbericht 2008. Verband der Automobilindustrie, Frankfurt 2008. Online: www.vda.de.
- VDI/VDE 2007: VDI/VDE Innovation + Technik GmbH: RFID: Potenziale für Deutschland. 2007.
- Venkel: Material Composition. Capacitor (MLCC). Venkel, Austin, TX 2008. <http://www.venkel.com>. Zugriff am 14. April 2008.
- VGB: Neue Werkstoffe für Dampferzeuger mit Wirkungsgraden über 50 % (MARCKO DE 2). http://www.vgb.org/fue_projekt198-highlight-700%C2%B0.html. Zugriff am 11. August 2008a.
- VGB: Pre-Engineering Study "NRW Power Plant 700 °C". http://www.vgb.org/fue_projekt297-highlight-700%C2%B0.html. Zugriff am 11. August 2008b.
- Viebahn, P.: "SOKRATES – Technologievergleich: Ökobilanzen von SEGS-, Fresnel- und DSG-Kollektoren", Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart, 2004. http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/projects/AP2_3_Oekobilanzen.pdf.
- VITO; Kreios; Laborelec: "Preparatory Studies for Eco-Design Requirements for EuPs - Final Report: Office Lighting", April 2007, www.eup4light.net.
- Vollmers, Florian: Maßgeschneiderter Stahl. Tailored Blanks senken Autogewicht um 20 Prozent. Wirtschaftswoche, 23.03.2008.
- Walter, A.: Interview mit Walter, A., Airbus Deutschland, "Al-Sc Legierung", geführt von Marwede, M., Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, am 07. Oktober 2008.
- Wang: Antimony Based III-V Thermophotovoltaic Devices. The Sixth Conference on Thermophotovoltaic Generation of Electricity. 14 - 16 June 2004, Freiburg, Germany.
- Wengel, Jürgen; Schirrmeister, Elna (Hrsg.) (2000): Innovationsprozess vom Verbrennungsmotor zur Brennstoffzelle – Chancen und Risiken für die baden-württembergische Industrie. Fraunhofer ISI, Karlsruhe.

- Werner, K; Weiss, H.: Schwarzbuch Markenfirmen. Die Machenschaften der Weltkonzerne. Deuticke 2001.
- Wikipedia: "Germanium", Zugriff am 23. Juni 2008a.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Germanium>.
- Wikipedia: "Indium gallium arsenide", Zugriff am 23. Juni 2008b.
http://en.wikipedia.org/wiki/Indium_gallium_arsenide.
- Wikipedia "Infrared detector", Zugriff am 23. Juni 2008c.
http://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_detector.
- Wikipedia "Microbolometer", Zugriff am 24. Juni 2008d.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Microbolometer>.
- Wikipedia "Thermographic camera", Zugriff am 23. Juni 2008e.
http://en.wikipedia.org/wiki/Thermographic_camera.
- Wikipedia: "Germanium arsenide", Zugriff am 20. September 2008f.
http://en.wikipedia.org/wiki/Gallium_Arsenide.
- Wikipedia: "Optical fiber", Zugriff am 20. Juni 2008g.
http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_fiber.
- Wikipedia: "Silicon-germanium", Zugriff am 21. August 2008h.
<http://en.wikipedia.org/wiki/SiGe>.
- Wikipedia: "Zirkondioxid", Zugriff am 25. September 2008i.
<http://de.wikipedia.org/wiki/Zirkondioxid>.
- Willems, W.M., Schild, K., Vakuumdämmung: schlanke Wände – warme Zimmer, Rubin, 2004.
- Wischnat, V.: Das Bessere ist des Guten Feind. Zwei Kondensator-Technologien im Vergleich. <http://www.elektroniknet.de/home/bauelemente/fachwissen>. Zugriff am 20. März 2008.
- Wuppertal Institut: Strukturell-ökonomisch-ökologischer Vergleich regenerativer Energietechnologien (RE) mit Carbon Capture and Storage (CCS). Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie GmbH; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik; Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoffforschung; Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, Wuppertal, Stuttgart, Potsdam, 28. Februar 2007.

Würfel, Uli: Untersuchung zum Elektronentransport im nanoporösen TiO₂ von Farbstoffsolarzellen, Universität Karlsruhe, 2006.

WVM Wirtschaftsvereinigung Metalle: Metallstatistik 2005. Wirtschaftsvereinigung Metalle, Düsseldorf 2006.

Yang, S. H. et al.: Nanostructures in high-performance (GeTe)_x(AgSbTe₂)_{100-x} thermoelectric materials. Nanotechnology 19 (2008) 245707. DOI 1088/0957-4484/24/245707.

Yatego: GIGANT Neodym Magnete – hebt 80 kg – Magnete.
<http://www.yatego.com/magnet-shop>. Zugriff am 2. Juli 2008.

Yi-Yuan Xie, Y. Chen, X. Xiong, X. Zhang, A. Rar, M. Martchevskii, Y. Qiao, A. Knoll, K.P. Lenseth, R.M. Schmidt, J. Herrin, D. Hazelton and V. Selvamanickam: Recent Results in 2G HTS Wire. Korea Superconductivity Society Annual Meeting, July 9 – 11, 2008.

Yukon Zink: Selenium Market Overview. November 10, 2005.
<http://www.yukonzinc.com/documents/Selenium2005-11-10.pdf>.

Zednicek, T.: Trends in Tantalum and Niobium Capacitors. AVX Czech Republic s.r.o. 2006.

ZVEI: CEMEP - Bill of materials - 20061127. Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. Frankfurt 2006.

ZVEI: Umbrella Specification. Passive Components: Ceramic Capacitors. 2003a.
http://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Fachverbaende/Electronic_Components/Umbrella_Specs/Passive_Components/Ceramic_Capacitors/USpecs_MLCC_DR_Ver02.pdf, Zugriff: 06. Oktober 2008.