

Working Paper Sustainability and Innovation
No. S 05/2016



Simon GLÖSER-CHAHOU
André KÜHN
Luis TERCERO ESPINOZA

Globale Verwendungsstrukturen der
Magnetwerkstoffe Neodym und Dysprosium:
Eine szenariobasierte Analyse der
Auswirkung der Diffusion der Elektromobilität
auf den Bedarf an Seltenen Erden

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung zu Seltenen Erden	1
1.1	Globales Angebot und Verwendungsstrukturen Seltener Erden	2
1.1.1	Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe	6
1.1.2	Anwendungsgebiete von NdFeB-Magneten	8
2	System Dynamics als Methode zur Modellierung von Rohstoffsystemen	19
2.1	Der System Dynamics Ansatz	19
2.1.1	Rückkopplungseffekte und zeitliche Verzögerungen	20
2.2	Dynamische Stoffkreisläufe und Produktverwendungszyklen	21
2.3	Modellierung von Marktdynamik	24
3	Globales Modell der Neodym- und Dysprosium-Materialflüsse	26
4	Ergänzung der physischen Stoffströme um Marktdynamik und Rückkopplungseffekte	29
4.1	Auswirkungen der Diffusion alternativer Fahrzeugantriebe	29
4.1.1	Das Globale Mobilitätsmodell (GloMo)	30
4.1.2	Prinzip der Kopplung des Flottenmodells mit den Stoffstrommodellen	33
4.1.3	Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe für Traktionsmotoren	34
5	Zusammenfassung	47
A	Anhang	49
A.1	Gewinnung und Aufbereitung Seltener Erden	50
A.2	Verwendungsstrukturen Seltener Erden	52
A.2.1	Zusatzdaten Anwendungsbereiche NdFeB-Magnete	54

Kurzfassung

Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB) haben als die derzeit stärksten Permanentmagnete in den vergangenen Jahren einen erheblichen Nachfrageschub erlebt, insbesondere für die Herstellung kompakter elektrischer Servomotoren mit hohem Wirkungsgrad und hoher Leistungsdichte, was vor allem für mobile Anwendungen in den Traktionsmotoren von Hybrid- und Elektrofahrzeugen oder für E-Bikes entscheidende Vorteile bietet. Aber auch im allgemeinen Maschinenbau (Förder- und Pumpsysteme, Werkzeuge, Klimaanlage, Liftmotoren etc.), in den elektrischen Kleinmotoren konventioneller Pkw oder in den Generatoren großer Windkraftanlagen mit permanentmagnetischem Direktantrieb werden vermehrt NdFeB-Magnete verbaut.

Dennoch besteht nach wie vor hohe Unsicherheit in den Verwendungsstrukturen von NdFeB-Magneten bzw. den enthaltenen Seltenerd-Elementen Neodym und Dysprosium. Ein wirkungsvolles Instrument zur Erhöhung der Markttransparenz und des Verständnisses von komplexen anthropogenen Stoffkreisläufen ist die dynamische Stoffflussmodellierung. Im vorliegenden Arbeitspapier wird dieses Instrument zur eingehenden Analyse der Verwendungsstrukturen von NdFeB-Magneten und den enthaltenen Seltenen Erden auf globaler Ebene eingesetzt. Über die dynamische Modellierung von Produkt-Verwendungszyklen werden heutige Verwendungsstrukturen offengelegt und zukünftige Magnetmengen in obsoleten Produktströmen quantifiziert. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Magnete im heutigen Schrottaufkommen hauptsächlich in obsoleten Elektronikanwendungen wie Festplatten (HDD), CD- und DVD-Laufwerken enthalten sind, woraus das Recycling auf Grund der kleinen Magnete und der hohen Materialstreuung kaum wirtschaftlich erscheint, in absehbarer Zukunft aber mit größeren Magnetmengen aus elektrischen Synchron-Servomotoren und Generatoren zu rechnen ist, was das Recyclingpotenzial erheblich steigert.

In einem weiteren Schritt wird unter Verwendung eines systemdynamischen Modells die Auswirkung der Diffusion alternativer Antriebe im Automobilmarkt auf den Dysprosiumbedarf analysiert und es werden mögliche Anpassungsmechanismen in Form verschiedener Substitutionseffekte am Markt für NdFeB-Magnete simuliert. Dysprosium ist für die Temperaturbeständigkeit der NdFeB-Magnete in Traktionsmotoren für Elektromobile ein entscheidender Bestandteil und gilt derzeit als besonders kritischer Rohstoff für die Elektromobilität.

Schlagworte

NdFeB-Magnete, Neodym, Dysprosium, Seltene Erden, Recyclingpotenziale, Stoffstromanalysen, Rohstoffabhängigkeiten, Zukunftstechnologien, Elektromobilität.

Anmerkungen

Dieses Manuskript ist im Zuge des Fraunhofer Leitprojekts "Kritikalität Seltener Erden" entstanden und enthält Elemente aus der Dissertation von Simon Glöser-Chahoud "Quantitative Analyse der Kritikalität metallischer und mineralischer Rohstoffe unter Verwendung eines systemdynamischen Modell-Ansatzes", Promotionsverfahren im April 2016 an der TU Clausthal eröffnet.

1 Einleitung zu Seltenen Erden

Die Stoffgruppe der Seltenen Erden ist wegen der einzigartigen chemisch-physikalischen Eigenschaften verschiedener Seltenerd-Elemente wichtige Rohstoffbasis für zahlreiche Technologien (siehe z.B. Moss et al., 2011; Parthemore, 2011). Aus geologischer Sicht ist der Begriff der "Seltenen Erden" eher irreführend, da ihr Vorkommen in der Erdkruste im Vergleich zu vielen anderen Metallen sehr hoch ist und die heute bekannten Reserven lange Reichweiten versprechen (ca. 112.000 t Jahresproduktion bei Reserven von 136 Mio. t, nach USGS, 2013). Die 17 Elemente der Seltenen Erden werden aber derzeit als besonders kritisch eingestuft, da ihre Bedeutung für die Wirtschaft hoch ist und ihre aktuelle Versorgungslage als unsicher einzustufen ist, was vor allem auf die Konzentration der Produktion auf China zurückzuführen ist (siehe z.B. Campbell, 2014). Auch ist die Aufkonzentrierung der Erze, die Aufbereitung und Trennung der Seltenen Erden ein komplexes Verfahren, das für jedes Vorkommen individuell ausgearbeitet werden muss und häufig mit erheblichen Umweltauswirkungen verbunden ist (siehe z.B. Kennedy, 2014; Schüler et al., 2011).

Die Schweren Seltenen Erden (**Heavy Rare Earth Elements, HREE**, siehe Abbildung 1) sind dabei

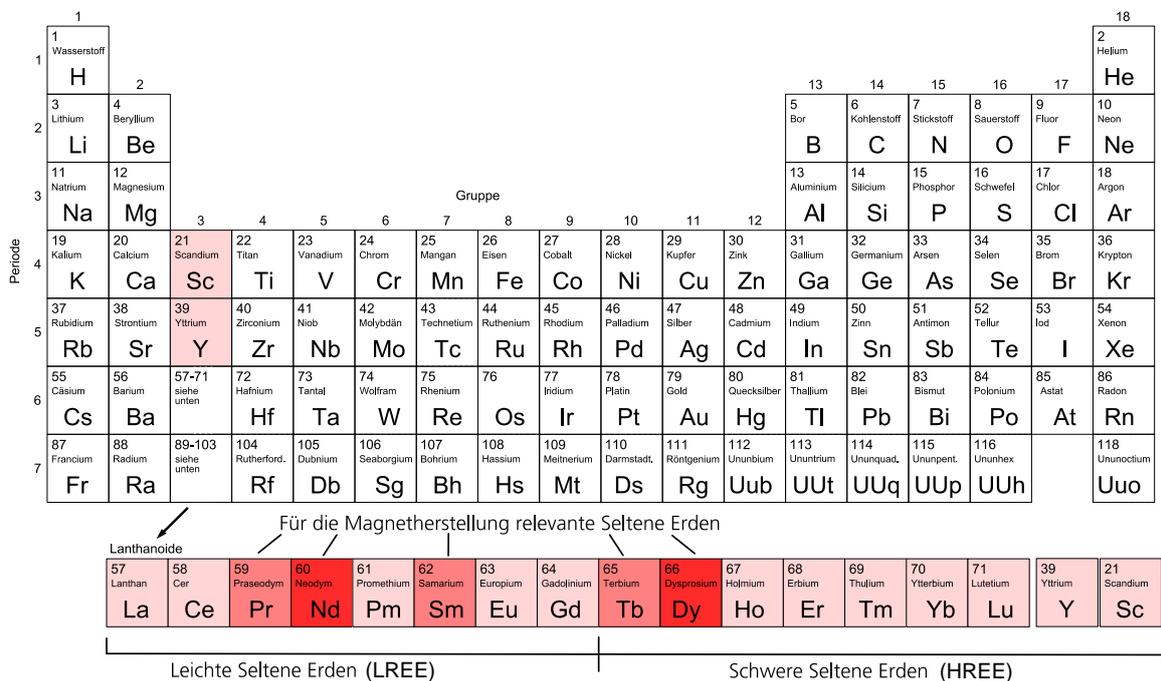


Abbildung 1: Die Elemente der Seltenen Erden im Periodensystem. Insgesamt gehören 17 verschiedene Elemente zur Gruppe der Seltenen Erden, wobei neben den Lanthanoiden, Yttrium und Scandium zu den Seltenen Erden gezählt werden. Die Aufteilung in die Unterkategorie der schweren- und leichten Seltenen Erden ist nicht immer eindeutig, erfolgt allerdings meist wie hier dargestellt (vergl. z.B. USGS, 2011; Zepf, 2013, S.15).

bezüglich der Versorgungslage am kritischsten, da sie im Vergleich zu einigen leichten Seltenen Erden (**L**ight **R**are **E**arth **E**lements, LREE), wie nachfolgend näher erläutert, im Gemisch der im Verbund gewonnenen Elemente in geringerem Umfang verfügbar sind, für einige Technologien, wie Permanentmagnete oder Leuchtstoffe aber kaum substituierbare Rohstoffe darstellen.

1.1 Globales Angebot und Verwendungsstrukturen Seltener Erden

Derzeit stammen knapp 90 % der global abgebauten Seltenen Erden aus China (vergl. Abbildung 2).

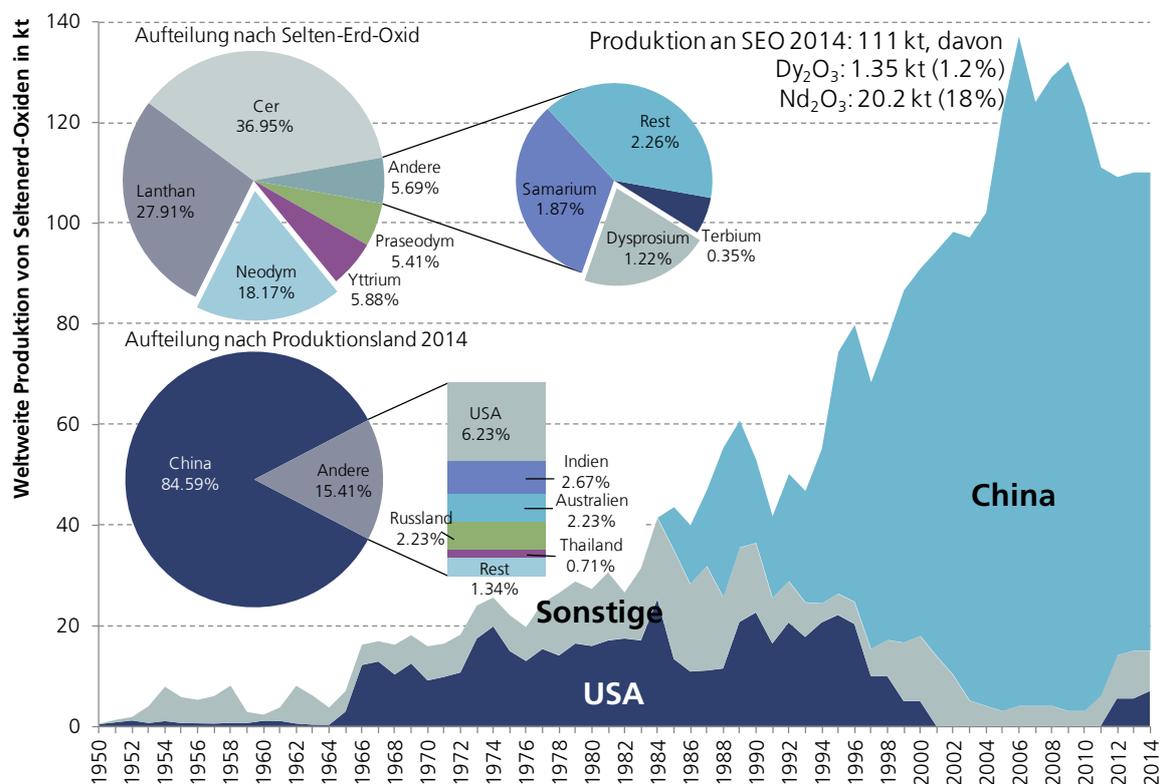


Abbildung 2: Globale Seltenerd-Produktion nach Ländern sowie Zusammensetzung der gewonnenen Elemente (Daten basieren auf USGS, 2011, 2014).

Die Volksrepublik hat allerdings zur Konsolidierung des heimischen Marktes und auf Grund der negativen Umweltauswirkungen ihre Produktion gedrosselt und Exportquoten gesetzt. Auch spielen hier wirtschaftsstrategische Aspekte eine Rolle, da durch die Wettbewerbsverzerrung auf Grund von Exportrestriktionen, Steuern und sonstigen Handelshemmnissen die heimische Wertschöpfung und der Technologietransfer aus dem Ausland gestärkt wird (Wübbecke, 2013). Zwar wurden die Exportquoten nach dem Urteil der WTO (World Trade Organization) im Jahr 2015 wieder aufgehoben, dennoch besteht durch das planwirtschaftliche System und die damit verbundenen Produktionsvorgaben nach

wie vor großer Einfluss auf den Markt für Seltene Erden seitens der chinesischen Regierung. Die bedeutendsten nicht chinesischen Projekte, welche die globale Seltenerdproduktion in jüngster Vergangenheit ergänzt haben¹ werden hauptsächlich leichte Seltene Erden (LREE) hervorbringen, wodurch die Versorgung mit einigen schweren Seltenen Erden (HREE) kaum verbessert wird. Da Dysprosium als wichtiger Bestandteil von Hochleistungs-Magneten eine zentrale Rolle für die Elektromobilität, aber auch für andere Wachstumsbranchen wie den Windenergiesektor spielt, insbesondere bei wartungsarmen, direkt-angetriebenen großen Offshore-Windanlagen, ist die Versorgungslage hier als besonders problematisch einzustufen, was im Folgenden näher untersucht wird (vergl. hierzu auch Habib und Wenzel, 2014; Hoenderdaal et al., 2013).

Obwohl das Gesamtangebot an Seltenen Erden die Gesamtnachfrage erwartungsgemäß übersteigen wird (siehe z.B. Alonso et al., 2012; Hatch, 2011; Kingsnorth, 2014), werden Engpässe bei der Versorgung mit HREE erwartet, da die verschiedenen Seltenen Erden nicht im gleichen Verhältnis gebraucht werden wie sie geologisch in den Erzen vorkommen. So ist davon auszugehen, dass die häufigsten leichten Seltenen Erden Cer und Lanthan (siehe Abbildung 2 oben) in Zukunft im Überfluss vorhanden sein werden (was sich schon heute in den Preisniveaus zeigt, vergl. Abbildung 3), Neodym als wichtigster Magnetrohstoff den Wachstumstreiber der Seltenerd-Förderung darstellen wird (Alonso et al., 2012) und die schweren Seltenen Erden Dysprosium, Terbium und Europium auch in Zukunft sehr knapp sein werden. Diese Einschätzung spiegelt sich auch in der aktuellen Kritikalitätsstudie der EU wider (European Commission, 2014), die die schweren Seltenen Erden (HREE) als versorgungskritischer einschätzt.

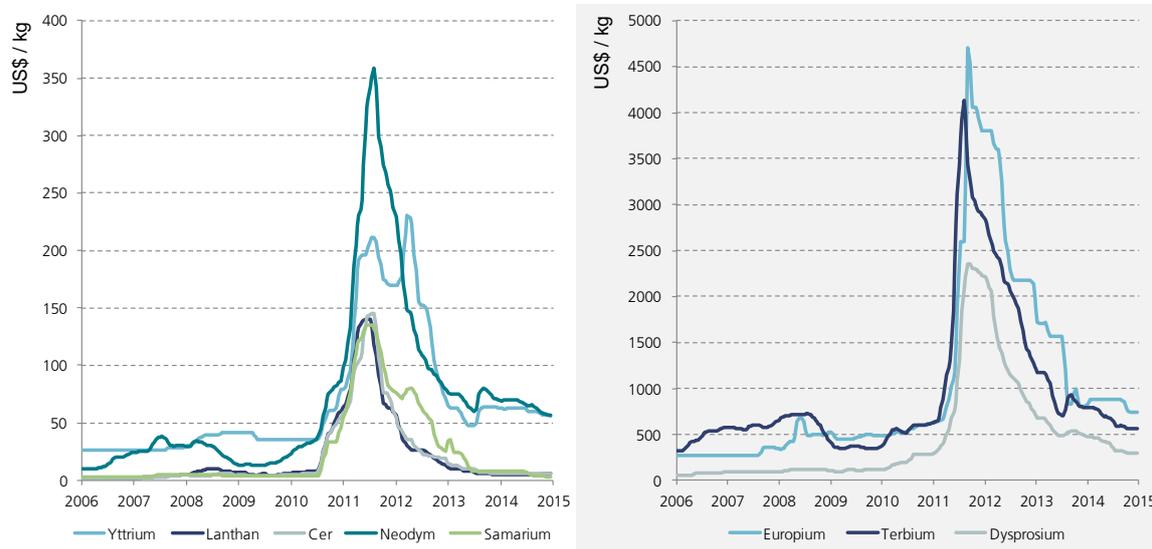


Abbildung 3: Preisentwicklung der Seltenerd-Oxide (Preise fob China (free on board), Daten basieren auf DERA 2015).

¹insbesondere die Mountain Pass Mine in den USA (Molycorp Inc.), die inzwischen allerdings wieder geschlossen wurde, und die Mount Weld Mine in Australien (LYNAS corp.).

Seltene Erden sind in geringen Konzentrationen in der gesamten Erdkruste vorhanden und in hunderterten von Mineralen enthalten. Die Zusammensetzung der abbauwürdigen Minerale variiert von Mine zu Mine, häufig werden Seltene Erden auch als Kuppelprodukt bei der Förderung anderer Metalle gewonnen (z.B. in Verbindung mit der Eisenerzförderung in der Inneren Mongolei, siehe USGS, 2011).

Auf Grund der großen chemischen und physikalischen Ähnlichkeiten ist die Aufbereitung und Trennung der verschiedenen Seltenerd-Oxide sehr aufwendig und teilweise mit erheblichen Umwelteinwirkungen verbunden. Ein schematischer Überblick über die Förder- und Trennverfahren wird im Anhang dieses Arbeitspapiers gegeben. Bei den Gewichtsangaben muss zwischen den metallischen Seltenerd-Elementen (SEE) und Seltenerd-Oxiden (SEO) unterschieden werden, da die Oxide das Gewicht des gebundenen Sauerstoffs beinhalten. Allgemein werden die Produktion und die Vorräte in SEO angegeben. Eine Übersicht über die nach Ländern aufgeschlüsselten globalen Abbaumengen und Reserven an Seltenern Erden liefert Abbildung 4.

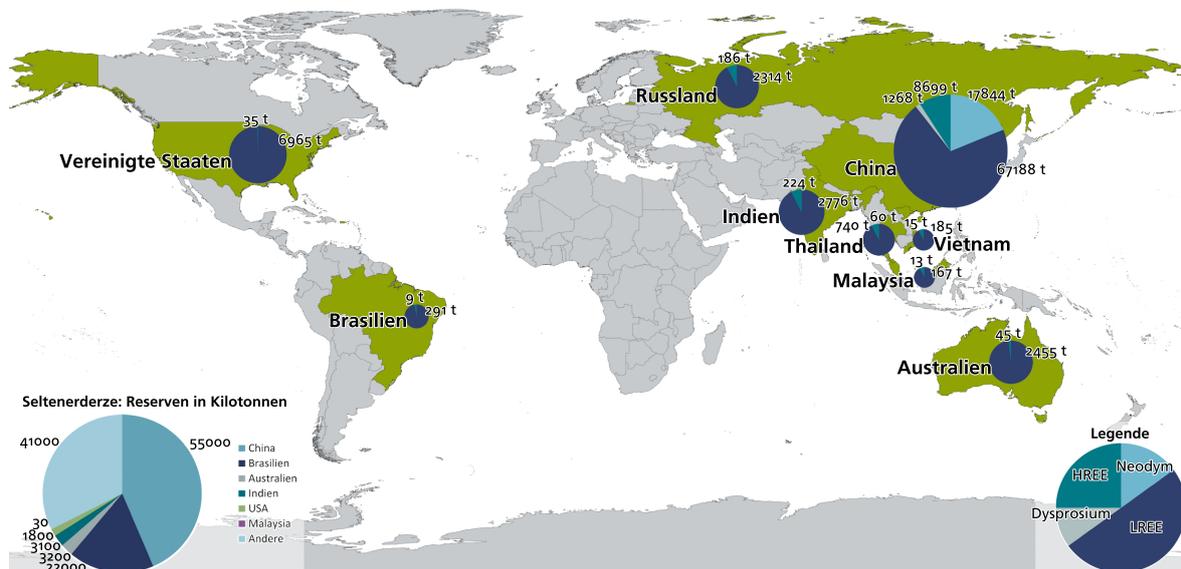


Abbildung 4: Globale Verteilung der Seltenerdproduktion (USGS, 2013, die Fläche der Tortendiagramme ist hier aus Gründen der Lesbarkeit nicht direkt proportional zur Produktionsmenge). Zwar haben die USA und Australien ihre Produktion in den vergangenen Jahren ausgeweitet (vergl. auch Abbildung 2). Die gewonnenen Monazit und Bastnäsit-Erze enthalten allerdings nur geringe Mengen an schweren Seltenern Erden und nahezu kein Dysprosium (Kingsnorth, 2014). Hier hat China nach wie vor eine klare Monopolstellung.

Hinsichtlich der Produktionsdaten zu einzelnen Seltenerd-Elementen herrscht einige Unsicherheit und Unklarheit. Dies liegt u.a. an den erheblichen Mengen illegalen Bergbaus, der bezogen auf die Gesamtheit der Seltenerd-Oxide auf ca. 15 % geschätzt wird (Hurst, 2010; Schüler et al., 2011, S.20). Dabei ist anzunehmen, dass der Anteil schwerer Seltener Erden aus inoffizieller Produktion besonders hoch ist (Wübbeke, 2013). Dies ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass im Süden Chinas einzigartige Tonerden mit sehr hohem Anteil an HREE vorkommen (vergl. Abbildung 5). Angesichts des

großen Preisunterschieds zwischen Cer, Lanthan und HREE wie Terbium, Dysprosium oder Europium (siehe Abbildung 3), ist es naheliegend, dass es für dortige Minenbetreiber auf Grund der hohen Konzentration an HREE auch wirtschaftlich sein kann, die abgetrennten LREE zu deponieren und über die Produktionsvorgaben der Zentralregierung in Peking hinaus HREE zu fördern.

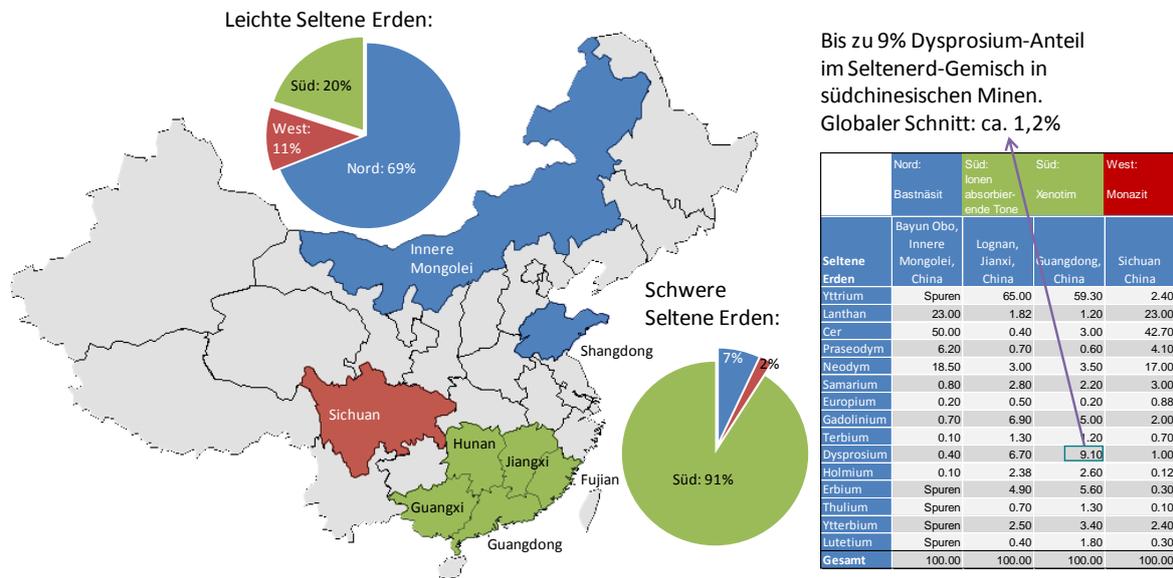


Abbildung 5: Chinesische Abbaugelände Seltener Erden und Erzzusammensetzung verschiedener Minen (Kennedy, 2014; USGS, 2011; Wübbecke, 2013).

Insgesamt ist also davon auszugehen, dass vor allem bezüglich der HREE, auch auf Grund des weit höheren Preisniveaus und der Konzentration der Vorkommen in den südlichen Provinzen Chinas (vergl. Abbildung 5), die tatsächlichen Produktionszahlen weit höher liegen als die offiziell veröffentlichten Daten in Abbildung 2 (vergl. z.B. Buchert, 2011; Kingsnorth, 2014).

Hier kommt die gesamte Problematik der zwar offiziell nach wie vor planwirtschaftlich geführten chinesischen Industrie (einschließlich Produktionsvorgaben seitens der Zentralregierung) und der tatsächlich privatwirtschaftlichen Umsetzung zum Tragen: In offiziellen Statistiken tauchen lediglich die von der Zentralregierung vorgegebenen Zahlen auf, während die tatsächliche Produktion davon offensichtlich abweicht. Ein weiteres Problem bei der Analyse der Verwendungsstrukturen von Seltenen Erden bildet die Tatsache, dass nicht nur die Rohstoffgewinnung, sondern auch ein erheblicher Teil der Seltenerd-Verarbeitung in China stattfindet. So hat China nicht nur bei der Seltenerd-Förderung einen Marktanteil von ca. 85 %, sondern auch bei der Herstellung von NdFeB-Magneten (vergl. z.B. Du und Graedel, 2011). Eine Abschätzung der tatsächlichen Produktionsmengen bestimmter Seltenerd-Elemente ist daher nur mit einer erheblichen Fehlerspanne möglich (vergl. Abbildung 11 auf S.17). Auf Grund der schlechten Datenlage ist eine genaue Quantifizierung der Verwendungsstrukturen der Gesamtheit der Seltenen Erden schwierig. Die Haupt- und Nebenanwendungsbereiche sind allerdings für die einzelnen Elemente bekannt und werden in Tabelle 1 zusammengefasst (vergl. z.B. Buchert et al., 2013;

Schüler et al., 2011; Zepf, 2013, S.33 ff.). Dies sind lediglich die wichtigsten aus der Literatur entnommenen Anwendungsfelder. Die Liste der Spezialanwendungen für die Hightechmetalle der Seltener Erden ist sehr lange, da dies für die weiteren Betrachtungen in der vorliegenden Arbeit aber keine Rolle spielt, wurde auf zusätzliche Recherchen verzichtet. In diesem Arbeitspapier werden lediglich die Magnetwerkstoffe Neodym und Dysprosium untersucht und Stoffstrom- sowie Szenarioanalysen auf globaler Ebene durchgeführt.

Tabelle 1: Verwendungsbereiche Seltener Erden aufgeteilt nach Elementen (vergl. z.B. Zepf, 2013, S.33 ff.) ergänzt um weitere Anwendungsbereiche nach Kingsnorth (2014); Roskill (2011); Schüler et al. (2011).

Anwendungsbereich	Rohstoff															
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Sc	Y
Akkumulatoren (NiMH)	⊗	⊗		⊗												
Katalysatoren	⊗	⊗		⊗												
Keramik	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗				⊗		⊗		⊗		⊗	⊗
Glas	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗		⊗				⊗		⊗	⊗		
Poliermittel		⊗			⊗											
Magnete			⊗	⊗	⊗			⊗	⊗							
Metallurgie	⊗	⊗	⊗	⊗											⊗	⊗
Leuchtstoffe	⊗	⊗			⊗	⊗	⊗	⊗			⊗		⊗		⊗	⊗
Sonstige	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗		⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗

Hauptanwendung: ⊗, Nebenanwendung: ⊗

1.1.1 Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe

Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB-Magnete) sind derzeit die stärksten Permanentmagnete und essenziell für die Herstellung von effizienten Synchron-Elektromotoren mit hohen Leistungsdichten und kompakter Bauweise, was insbesondere für mobile, batteriebetriebene Anwendungen entscheidend ist, da hier Gewichts- und Effizienz Aspekte eine wichtige Rolle spielen (Gutfleisch et al., 2011).

Neodym als dritthäufigste Seltene Erde (nach Cer und Lanthan, vergl. Abbildung 2) wird neben der Verwendung als Magnetwerkstoff (ca. 90 % der Weltproduktion Buchert et al., 2013; Sprecher et al., 2014) auch in NiMH-Batterien (Nickel-Metall-Hydrid-Batterien, vergl. Manchester et al., 1991) und sonstigen Metalllegierungen (z.B. spezielle Aluminium- und Magnesiumlegierungen Rochlin, 2003), sowie in Leuchtstoffen (siehe Tabelle 1) verwendet. Weitere Anwendungsgebiete mit geringem Verbrauchsvolumen bilden die Verarbeitung in Lasersystemen zur Metallbearbeitung und das Färben von Emaille, Porzellan und Glas (Schüler et al., 2011). Diese Anwendungsbereiche werden hier auf Grund ihrer mengenmäßig geringen Relevanz nicht näher betrachtet. Wegen der ähnlichen Eigenschaften, der besseren Korrosionsbeständigkeit und des günstigeren Preises von Praseodym werden in NdFeB-Magneten auch häufig Neodym-Praseodym-Gemische eingesetzt, wobei typische Mengenverhältnis-

se zwischen Neodym und Praseodym bei 5:1 liegen (dieses Gemisch nennt sich Didymium, siehe Zepf, 2013, S.80).

Dysprosium wird nahezu ausschließlich in Neodym-Magneten verwendet² und ist dort für die Steigerung der Temperaturbeständigkeit der Magnete, aber auch zur Vermeidung der Entmagnetisierung durch externe Magnetfelder ein essentieller Bestandteil. Ohne Dysprosium wäre der Betrieb der Elektromotoren und Generatoren bei Temperaturen über 80 °C nicht möglich (siehe Abbildung 6).

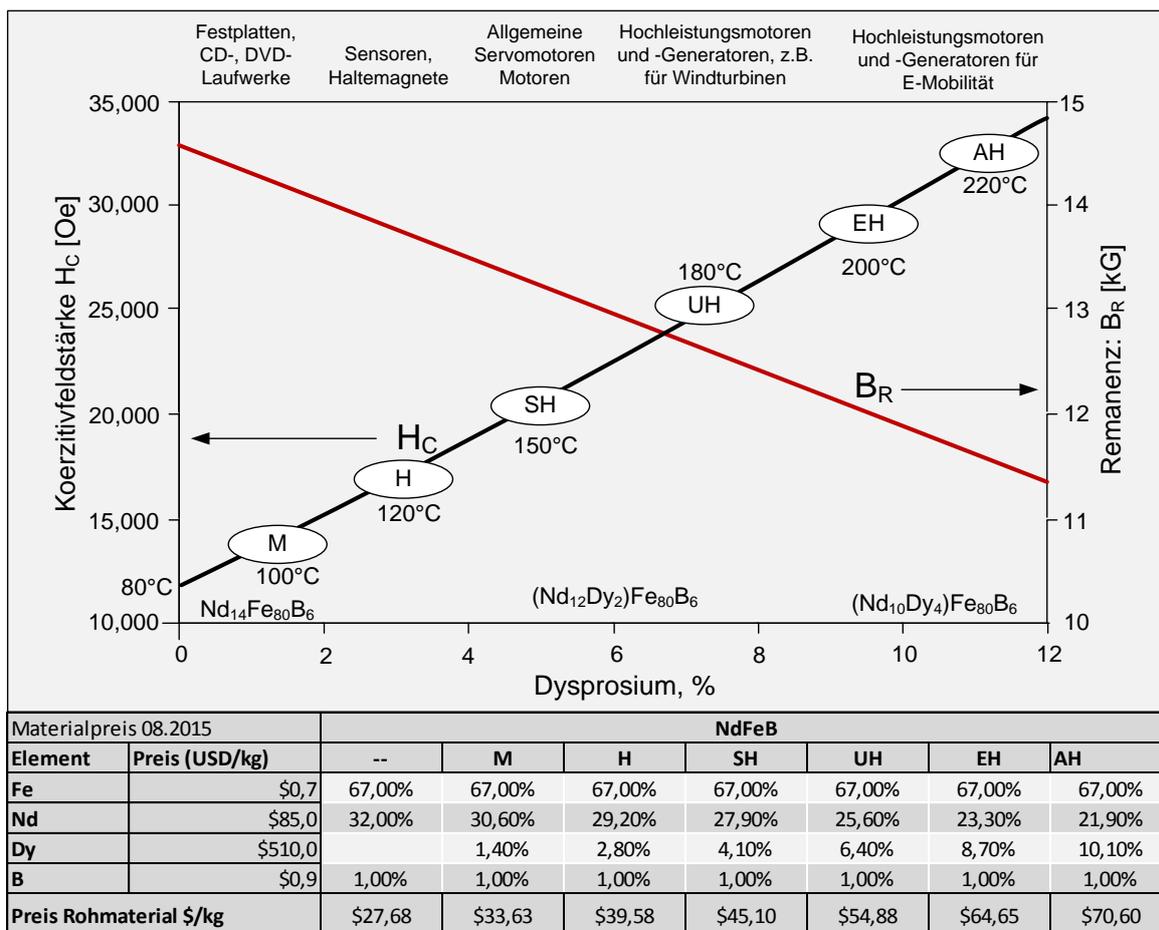


Abbildung 6: Einfluss des Dysprosiumanteils auf die Magneteigenschaften (Remanenz und Koerzitivfeldstärke) basierend auf Constantinides, 2013) (mit Ergänzungen von Gutfleisch et al., 2011). Die Bezeichnungen M, H, SH, UH, EH, AH sind typische Klassifizierungen von NdFeB-Magneten nach entsprechenden Einsatzbereichen.

Die wichtigsten physikalischen Kenngrößen von Permanentmagneten, die für das Verständnis der Dysprosium-Beimischung in NdFeB-Magneten entscheidend sind, werden nachfolgend nochmals zusammengefasst:

²Es gibt weiterhin spezielle Keramik-Kondensatoren, die geringe Mengen an Dysprosium enthalten, dies ist allerdings eine absolute Nischenanwendungen (Hoenderdaal et al., 2013).

Energiedichte BH:

Die Energiedichte ist die magnetische Energie, die ein Magnet im Verhältnis zu seinem Volumen aufweist. Sie entspricht dem Produkt aus Feldstärke H [A/m] und Flussdichte B [T] bezogen auf das Volumen. Einheit: [kJ/m^3], bzw. Mega-Gauß-Oersted [$MGOe$] wobei [$1 MGOe = 7,96 kJ/m^3$].

Intrinsische Koerzitivität H_C :

Die intrinsische Koerzitivität, oder auch Koerzitivfeldstärke genannt, ist eine "innere" Eigenschaft des Magneten, die aussagt wie stark eine aufgewendete Feldstärke sein muss, damit ein Magnet vollständig entmagnetisiert wird. Je größer die intrinsische Koerzitivität ist, desto beständiger ist ein Magnet gegenüber Entmagnetisierung durch äußere Felder oder durch hohe Temperaturen. Einheit: [A/m], bzw. Oersted [Oe], mit [$1 Oe = 79,58 A/m$].

Remanenz B_R :

Die Remanenz ist eine Angabe über die Magnetisierung eines dauermagnetischen Werkstoffes, die er beibehält nachdem das extern angelegte magnetische Feld entfernt wurde. Einheit: Tesla, bzw. Gauß, mit [$1 T = 10000 G$].

Betriebstemperatur T :

Die Betriebstemperatur gibt an, bis zu welcher Temperatur des Magneten die unvermeidliche Entmagnetisierung äußerst langsam verläuft. Einheit: [$^{\circ}C$].

Wie in Abbildung 6 dargestellt, wird die Remanenz, also die im Magnet verbleibende Flussdichte und damit auch die Energiedichte des Magneten, durch Dysprosium-Zugabe reduziert. Der einzige Grund für die Beimischung von Dysprosium liegt in der relativ niedrigen Koerzitivität von NdFeB-Magneten, und den damit verbundenen niedrigen Betriebstemperaturen. Während reine NdFeB Magnete lediglich bis Betriebstemperaturen von ca. 80 °C eingesetzt werden können, da sie bei höheren Temperaturen entmagnetisiert würden, kann die Betriebstemperatur durch Zugabe von Dysprosium auf bis zu 220 °C erhöht werden (vergl. Abbildung 6). Gleichzeitig sinkt allerdings auch die Restmagnetisierung (Remanenz). Wie die Tabelle in Abbildung 6 unten zeigt, steigen mit zunehmendem Anteil an Dysprosium wegen des ca. 5-fachen Preises von Dysprosium gegenüber Neodym auch die Materialkosten erheblich (vergl. auch Preisniveaus in Abbildung 3). Dies kann sich wegen höherer Wirtschaftlichkeit auch positiv auf das Recycling auswirken.

1.1.2 Anwendungsgebiete von NdFeB-Magneten

NdFeB-Magnete werden aus Magnetlegierungen im Sinter- oder Fügeverfahren hergestellt. Gesinter- te Magnete haben eine höhere Energiedichte, daher wird dieses Verfahren auch häufiger verwendet. Gebundene Magnete beruhen auf einer Kunststoffbasis (Polymerharz), welches das Pulvergemisch zusammenhält. Der Vorteil polymergebundener Magnete liegt in der besseren Formbarkeit, was vor

allein für Kleinmotoren (z.B. im Automobilbereich) eine Rolle spielt. Circa 94 % der NdFeB-Magnete sind gesinterte und 6 % gebundene Magnete (Roskill, 2011, S.237). In Abbildung 7 wird die jährliche globale Produktion von Neodym-Magneten (beider Verfahren) dargestellt. Die Magnetproduktion wuchs innerhalb der ersten sechs Jahre des 21. Jahrhunderts um durchschnittlich 25 % pro Jahr und verlagerte sich zunehmend nach China, was nicht zuletzt von Exportzöllen- und Restriktionen im Export von Seltenen Erden seitens der chinesischen Regierung beeinflusst wurde. So war eine sichere Versorgung mit Neodym und Dysprosium zu günstigeren Preisen lediglich in China gegeben, was dazu geführt hat, dass auch japanische und europäische Hersteller ihre Produktion zunehmend nach China verlagert haben. Heute stammen ca. 90 % der NdFeB-Magnete aus China.

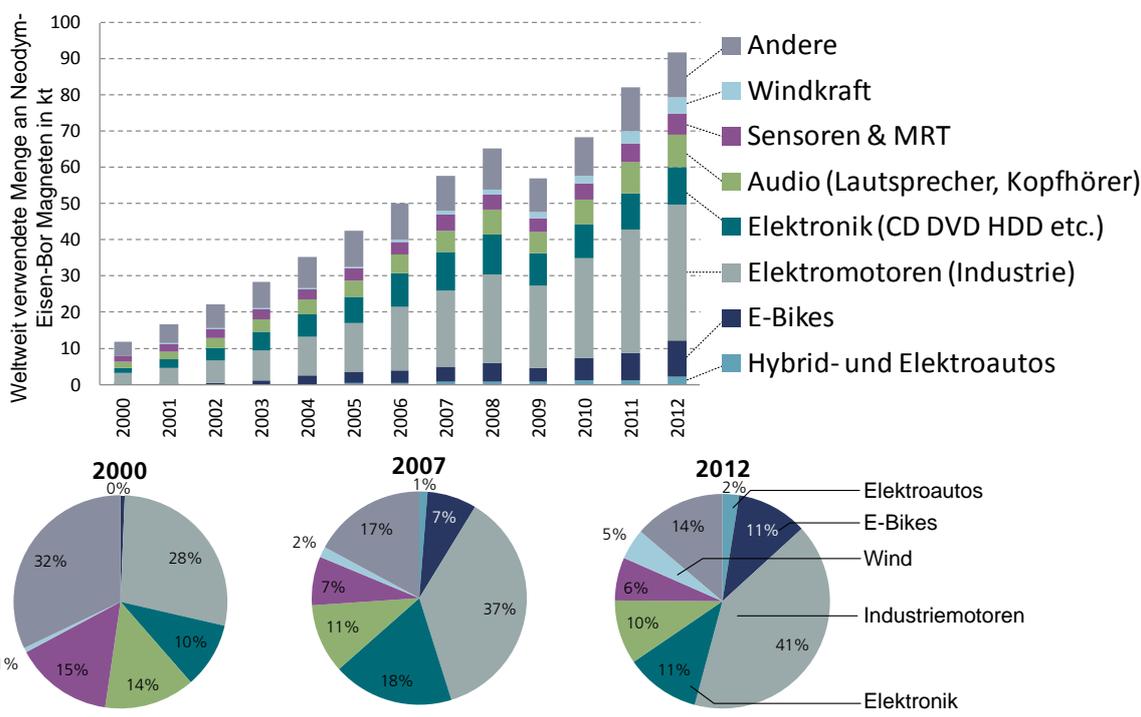


Abbildung 7: Globale Produktions- und Verwendungsstrukturen von NdFeB Magneten (Daten basieren auf Constantinides, 2011, 2012, 2013; Gutfleisch et al., 2011; Research and Markets, 2014; Roskill, 2011).

Die wichtigsten Anwendungsbereiche der Magnete werden nachfolgend kurz erläutert und bezüglich ihrer Verbrauchsmengen untersucht, was die um Literaturangaben ergänzte Marktaufteilung in Abbildung 7 bekräftigt.

Elektrische Zweiräder

Mit Hilfe von NdFeB-Permanentmagneten lassen sich die derzeit kompaktesten Elektromotoren mit der höchsten Leistungsdichte und der besten Energieeffizienz herstellen. Dies liegt insbesondere daran, dass bei PM-Synchronmotoren im Gegensatz zu Induktions-Ansynchronmotoren der Permanentmagnet im Rotor nicht induziert werden muss, folglich keine zusätzliche Energie verbraucht wird. Durch

das Einsparen der Spule im Vergleich des Permanent- mit dem Induktionsmagneten werden zusätzlich Gewicht und Material gespart. Daher bietet sich der PM-Synchronmotor vor allem für mobile Anwendungen an, in denen durch Gewichts- und Effizienzeinsparungen die Reichweiten der Elektromobile optimiert werden können. Während die Elektromobilität im Bereich der Pkw nach wie vor eine untergeordnete Rolle spielt, waren es in den vergangenen Jahren vor allem E-Scooter aus Asien (siehe Abbildung 8), die die Nachfrage nach NdFeB-Magneten vorantrieben.

a: Pedelec (Pedal Electric Cycle)



b: E-Scooter / E-Motorcycle



Abbildung 8: Unter dem allgemeinen Begriff "E-Bike" zusammengefasste elektrische Zweiräder. Während bei Pedelecs nur eine elektrische Kraftverstärkung stattfindet (also die Geschwindigkeit über den Pedaltritt reguliert wird), werden E-Scooter und E-Motorcycles ausschließlich über den Elektro-Traktionsmotor angetrieben. Bei Pedelecs ist in den Synchronmotoren mit einer Nennleistung von meist 250 W von einer Magnetmasse von 150 - 250 g auszugehen, während die Leistungsstärkeren E-Scooter in ihren Traktionsmotoren durchaus Magnete von 0,5 kg enthalten (Hofmann et al., 2013, Anhang S. 55 ff.). Bildmaterial teilweise entnommen von Bosch E-Bike System und HEINZMANN E-Bike System.

Die Motoren dieser Elektrozweiräder enthalten nur relativ kleine Magnete mit ca. 0,2 - 0,5 kg (vergl. Hoenderdaal et al., 2013; Hofmann et al., 2013, Anhang S. 55 ff.), werden allerdings in Asien und

insbesondere in China in enormen Mengen verkauft. 2014 wird von Verkaufszahlen im Bereich um 40 Mio. Stück ausgegangen, wobei allein in China über 30 Mio. Elektrozweiräder verkauft wurden (INSG, 2014)³. Dabei wurden in den vergangenen Jahren Wachstumsraten von 10 % und mehr realisiert. Da nahezu alle Hersteller aus China stammen, wo die Versorgung mit NdFeB-Magneten und Seltenen Erden insgesamt gesichert ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Elektrozweiräder nahezu vollständig auf PM-Synchronmotoren basieren. Bei ca. 35 Mio. verkauften Einheiten im Jahr 2012 und durchschnittlich 0,3 kg Magnetmasse pro Zweirad ergibt sich ein Verbrauch an NdFeB-Magneten von ca. 10,5 Mio. Tonnen, was einem Marktanteil von etwas über 10 % entspricht (vergl. Abbildung 7). Während unter dem Begriff "E-Bike" grundsätzlich alle elektrischen Zweiräder zusammengefasst werden (E-Scooter, Motorräder, aber auch Fahrräder mit elektrischer Kraftverstärkung "Pedelects"⁴), ist für die detailliertere Betrachtung eine Unterscheidung zwischen den hauptsächlich in Asien verkauften Elektrorollern (E-Scoter bzw. E-Motorcycles) und den in Europa inzwischen immer weiter verbreiteten "Pedelects" zu machen (siehe Abbildung 8).

Hybrid und Batterie-elektrische Pkw

Im Traktions-Elektromotor von Elektrofahrzeugen werden fast ausschließlich Neodym-Magnete verwendet, um Volumen und Gewicht möglichst gering zu halten und die Energieeffizienz zu maximieren (vergl. z.B. Habib et al., 2014; Hoenderdaal et al., 2013). Je nach Pkw-Segment und Motorleistung variiert die Menge an benötigtem Magnetmaterial. In Tabelle 2 werden verschiedene Angaben aus der Literatur für die Magnetmenge pro Traktionsmotor in Elektroautos aufgelistet. Bezüglich der Dysprosium-Menge in diesen Magneten wird dabei von einem Massenanteil von 8-10 % ausgegangen (vergl. Abbildung 6).

Tabelle 2: Mengenmäßige Verwendung von NdFeB bzw. Neodym für Traktionsmotoren in Elektrofahrzeugen. Die Mengenangaben zu Neodym und Dysprosium wurden nach Abbildung 6 berechnet wobei ca. 22-24 % Neodym (mit Beimischung von Praseodym) und 8-10 % Dysprosium verwendet werden.

Quelle	Magnetmasse pro Traktionsmotor (kg)	Anteil Neodym (g)	Anteil Dysprosium (g)
Campbell (2008, S.3, S.37 ff.)	0,65 - 1,39	150-320	60-120
U. S. DoE (2010, S.130)	1 - 2	230-460	85-170
Avalon Rare Metals Inc. (2010)	1 - 2	230-460	85-170
Hofmann et al. (2013, Anhang S. 55 ff.)	1,8	410	150
Gutfleisch (2013)	2	460	170
Haan und Zah (2013, S.106 ff.)	1,11 - 3,3	250-750	90-280
Hatch (2011, S.9 ff.)	1	230	85
Angerer et al. (2009, S.37 ff.)	1,5 - 4,5	350-1000	120-380

Eine genauere Betrachtung der Auswirkungen der Diffusion alternativer Antriebe auf die Nachfrage nach Neodym und insbesondere nach Dysprosium erfolgt in Abschnitt 4. Dabei wird auch nochmals detailliert auf den Zusammenhang zwischen Motorleistung und Magnetmasse eingegangen. Basie-

³Vergleiche auch Weinert et al. (2007) zur Erläuterung der enormen Verbreitung von Elektrozweirädern in China.

⁴Pedelect steht für "Pedal Electric Bicycle"

rend auf aktuellen Verkaufszahlen von Hybrid- und Elektrofahrzeugen unter den in Abschnitt 4.1.3 erläuterten Annahmen zur Magnetgröße nach Fahrzeugsegment und Antriebstechnologie ergibt sich derzeit ein Marktanteil der Elektromobilität an der Gesamtnachfrage nach NdFeB-Magneten von lediglich knapp über 2 %. Wie in Abschnitt 4 allerdings dargestellt, hätte eine stärkere Diffusion alternativer Antriebe insbesondere auf die Nachfrage nach Dysprosium eine starke Auswirkung, was höchstwahrscheinlich zu Substitution in anderen Bereichen, wie der Verwendung von NdFeB-Magneten in Servomotoren für allgemeine industrielle Anwendungen führen würde.

Windkraftanlagen

Während sich Windkraftanlagen (WKA) standardmäßig aus drei Teilen zusammensetzen (Rotor, Getriebe und Generator), werden seit einigen Jahren auch getriebelese Direktantriebe verwendet. Bei diesen wesentlich leistungsstärkeren Anlagen laufen Rotor und Generator direkt auf einer Welle – das Getriebe entfällt. Die drei grundlegenden Konzepte heutiger Windkraftanlagen sind in Abbildung 9 dargestellt. Da doppelgespeiste Asynchronmaschinen (Abbildung 9a) nur in höherem Drehzahlbereich sinnvoll eingesetzt werden können, benötigen diese Generatoren zwingend ein Getriebe zur Drehzahlwandlung. Synchrongeneratoren existieren sowohl auf Basis von Permanentmagneten als auch als reine Induktionsgeneratoren, wobei der Strom für die Spulen im Rotor durch Schleifringe übertragen wird (daher auch die Bezeichnung "Ringgenerator").

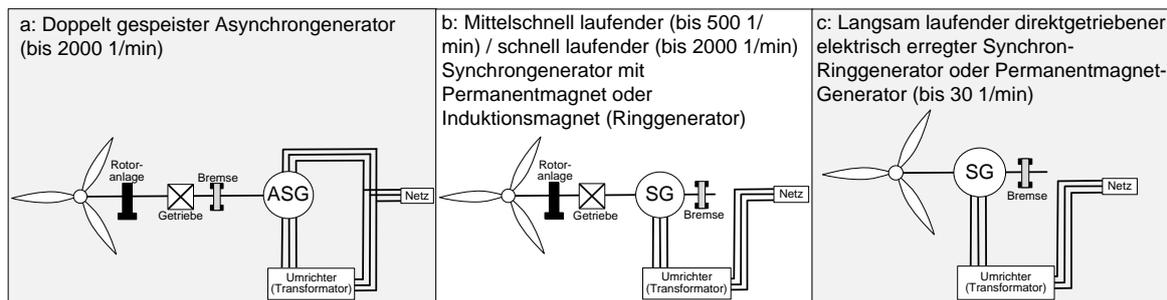


Abbildung 9: Die drei grundlegenden Konzepte für Windkraftanlagen (unterschieden nach Buchert, 2011).

Der Vorteil der PM-Synchronmaschinen (Permanentmagnet im Rotor des Generators) liegt in einem etwas höheren Wirkungsgrad, da das zweite Magnetfeld nicht fremderregt werden muss, sowie in einem geringeren Wartungsaufwand auf Grund des nicht vorhandenen Getriebes. Daher werden PM-Synchronmaschinen mit Direktantrieb von europäischen Herstellern in erster Linie im Offshore-Bereich eingesetzt, da dort die Wartungskosten sehr hoch ausfallen (Kaufhold und Jöckel, 2002). Chinesische Hersteller dagegen verbauen weit mehr PM-Anlagen auch im Onshore-Bereich, was auf die bessere Verfügbarkeit der Magnete zurückzuführen ist. Ein Vergleich der aktuellen Anlagen europäischer und chinesischer Hersteller bestätigt die Tendenz einer verstärkten Verwendung von PM-Generatoren durch führende chinesische WKA-Hersteller (siehe Tabelle 3 sowie Tabelle 1 im Anhang).

Bei Synchronmaschinen mit Direktantrieb (Abbildung 9c) werden ca. 650 kg Magnetmasse pro MW

Leistung verwendet (Buchert, 2011). Da diese Anlagen, insbesondere die Offshore-Anlagen, häufig mehr als 5 MW Leistungskapazität besitzen, werden hier regelmäßig über 3 t Magnetmasse pro Anlage verbaut (Hoenderdaal et al., 2013). Ein weiteres Antriebskonzept mit Permanentmagnet und Getriebe, was eine kleinere Gestaltung des Generators zulässt, ist in Abbildung 9b dargestellt. Dieses Konzept benötigt wegen des kleineren Generators nur ca. 100 kg/MW an Magnetmasse (Buchert, 2011). In Abbildung 10 sind die jährlich neu installierten Kapazitäten von Windkraftanlagen (a) und deren Verteilung nach Ländern im Jahr 2012 (b) dargestellt.

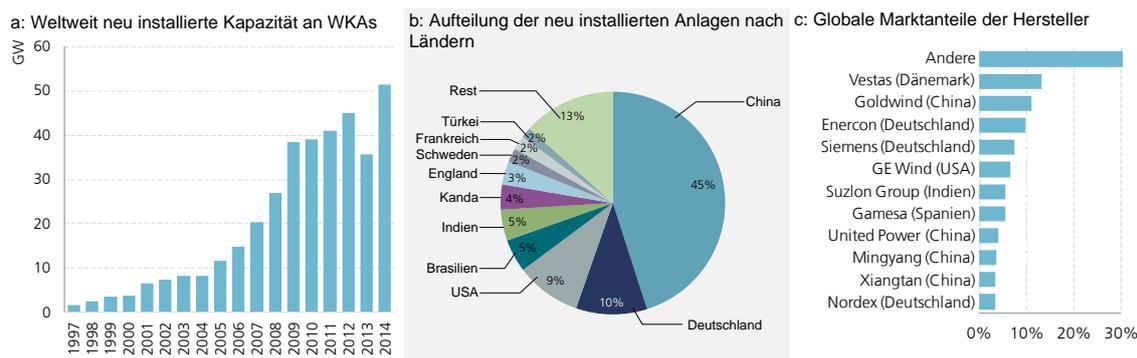


Abbildung 10: Weltweit installierte Leistung von Windkraftanlagen und deren Verteilung nach Ländern (Daten basieren auf **Global Wind Energy Council (GWEC)** 2015).

Im Jahr 2012 wurden Windkraftanlagen mit einer zusätzlichen Kapazität von 45 GW installiert, fast die Hälfte davon in China. Dadurch belief sich die globale Windkraft-Kapazität am Ende des Jahres 2012 auf ca. 282 MW. Da der chinesische Markt von chinesischen Herstellern dominiert wird, ist davon auszugehen, dass eine Großzahl der installierten WKA mit PM-Synchrongeneratoren in China steht (was durch die Analyse der angebotenen Technologien chinesischer Hersteller in Tabelle 3 bekräftigt wird). Schüler et al. (2011, S.71) schätzen den weltweiten Anteil an WKA mit NdFeB-Magneten auf 14 %, wobei ca. 9 % der global installierten WKA auf dem Direktantrieb mit NdFeB-Magneten basiert (Buchert, 2011, S.16). Dies entspräche im Jahr 2012 einem Gesamtverbrauch von knapp 3 kt NdFeB-Magneten, was einem Marktanteil der Windenergie-Branche an der globalen Produktion von NdFeB-Magneten (vergl. Abbildung 7) von 3-4 % entspricht. Da China den mit Abstand größten Wachstumsmarkt für WKA darstellt und der Marktführer in China "Goldwind Ltd." unter Lizenz der deutschen "Vensys AG" ausschließlich auf Direktantriebe mit NdFeB-Magneten setzt und auch weitere chinesischen Hersteller diese Technologie nutzen (vergl. Tabelle 3) scheint der weltweite Anteil an WKA mit PM-Direktantrieb heute zwischen 10 % und 15 % zu liegen.

Auf globaler Ebene wird der Anteil der Windenergie-Branche am Gesamtverbrauch von NdFeB-Magneten daher auf ca. 5 % geschätzt (vergl. neben der obigen Erläuterung z.B. Constantinides, 2013), obwohl auch hier sehr unterschiedliche Werte zwischen 2 % (Habib und Wenzel, 2014; Hoenderdaal et al., 2013) und über 10 % (Du und Graedel, 2011) in der Literatur zu finden sind.

Das starke Wachstum der Windenergie-Branche wird sich erwartungsgemäß auch zukünftig fortsetzen

Tabelle 3: Aktuelle Windkraftanlagen chinesischer Hersteller (Angaben wurden direkt den Produktblättern der jeweiligen Hersteller entnommen). Diejenigen Anlagen mit Getriebe sind mit "G" gekennzeichnet, diejenigen mit permanentmagnetisch erregten Generatoren mit "PM".

Goldwind				Guodian United Power			
GW70/1.5MW	PM	-	onshore	UP6000-136 IIA 6MW	-	G	offshore
GW77/1.5MW	PM	-	onshore	UP-120/3000 IIIA 3MW	-	G	onshore
GW82/1.5MW	PM	-	onshore	UP-100/3000 IIA LT 3MW	PM	-	offshore
GW87/1.5MW	PM	-	onshore	UP-100/3000 IIA LT 3MW	-	G	onshore
GW93/1.5MW	PM	-	onshore	UP2000-103 IVB+ 2MW	-	G	onshore
GW115/2.0MW	PM	-	onshore	UP2000-96 IIIA 2MW	-	G	onshore
GW90/2.5MW	PM	-	onshore	UP1500-97 S 1.5MW	-	G	onshore
GW100/2.5MW	PM	-	onshore	UP1500-86 IIIB- 1.5MW	-	G	onshore
GW103/2.5MW	PM	-	onshore-/offshore	UP1500-82 IIIA/IIIA+ 1.5MW	-	G	onshore
GW106/2.5MW	PM	-	onshore-/offshore	UP1500-77 IIA/IIA+ 1.5MW	-	G	onshore
Xiangtan				Ming Yang			
XE72-2 MW	PM	-	onshore	MY1.5MW	-	G	onshore
XE82-2 MW	PM	-	onshore	SCD 2.5/3.0 MW	PM	G	onshore-/offshore
XE87-2 MW	PM	-	onshore				
XE93-2 MW	PM	-	onshore				
XD115-5 MW	PM	-	onshore				

(insbesondere im Offshore-Bereich, wo vermehrt große Generatoren mit PM-Direktantrieb verbaut werden, siehe hierzu auch Tabelle 1 im Anhang) und somit neben der Elektromobilität als weiterer Treiber der Nachfrage nach NdFeB-Magneten und damit nach Neodym und Dysprosium wirken (vergl. z.B. Alonso et al., 2012; Habib und Wenzel, 2014; Hoenderdaal et al., 2013).

Elektronik und Audio

Der Bereich der Verwendung von NdFeB-Magneten in Kleinmotoren für die Elektronikindustrie (von der HDD-Festplatte (Hard Disk Drive), über CD-Laufwerke und DVD-Player bis hin zu Kleinmotoren für Vibrationsalarm-Funktionen in Mobiltelefonen und Smartphones), aber auch für Magnete in Lautsprechersystemen, Kopfhörern etc. bildeten in den ersten Jahren des 21. Jahrhunderts die wichtigsten Anwendungsbereiche für NdFeB-Magnete. Inzwischen wird die HDD-Festplatte mit Elektromotor und Nadel allerdings zunehmend von der SSD (Solid State Drive, auch Halbleiterlaufwerk genannt) Technologie verdrängt, die keine beweglichen Bauteile mehr enthält (vergl. z.B. Sprecher et al., 2014; Zepf, 2013). Auch werden durch Video-Streamingdienste und die Steigerung der Kapazitäten kleiner USB-Speicher immer weniger CD- und DVD Laufwerke verkauft. So verliert dieser Verwendungsbereich von NdFeB-Magneten kontinuierlich an Bedeutung. Daher wird das aktuelle Schrottaufkommen zwar von Magneten in Kleinmotoren obsoletter Elektronikprodukte dominiert (vergl. hierzu Abschnitt 3), für die zukünftige Verwendung von NdFeB-Magneten wird dieser Bereich aber kontinuierlich an Bedeutung verlieren. Dies gilt nicht für Lautsprecher und Kopfhörer-Systeme, wo vor allem bei hochwertigeren Systemen ("High-End Soundsysteme") nach wie vor auf NdFeB-Magnete zurückgegriffen wird.

Industrie-Elektromotoren

Den größten, aber wohl auch undurchsichtigsten Verwendungsbereich von NdFeB-Magneten bildet

der breite Einsatz von PM-Elektromotoren (Permanentmagnet als alternative zu Induktions-Elektromagneten) im Maschinenbau. Der für NdFeB-Magnete wichtigste Motortyp ist dabei der Synchron-Servomotor im niedrigeren Leistungsbereich bis 10 kW (Buchert et al., 2013). Anwendungsbereiche dieser Motoren reichen von einfachen Haushaltsgeräten, über Waschmaschinen und Klimaanlage bis hin zu Pumpsystemen oder Elektromotoren für Aufzüge- und Rolltreppen. Auch spielen hier Kleinmotoren für konventionelle Pkw (vergl. Tabelle 4, vom Lenkungsmotor für die Servo-Lenkung über Scheibenwischermotoren bis hin zu Motoren für die elektrische Sitzverstellung eine nicht unerhebliche Rolle (Gieras, 2010; Wilde, 2008, S.58 ff.).

Tabelle 4: Typische elektrische Kleinmotoren in konventionellen Pkw, die neben Ferrit-Magneten und reinen Induktionselektromagneten auch teilweise NdFeB-Magnete enthalten. Motoren, die häufig auf NdFeB-Magneten basieren sind Lenkungsmotoren für die Servolenkung, Motoren für die automatische Schaltung sowie Kleinmotoren aus dem Comfort-Bereich (elektrische Fensterheber, Sitzverstellung, Spiegel- und Scheinwerfereinstellung, Softclose Automatik etc.)(Wilde, 2008).

Anwendung	Leistung in Watt	Bemerkung
Anlasser	1500	
Kraftstoffpumpe	50	
Kühlwasserpumpe	10	
Scheibenwaschpumpe	20	2 mal 0.01
Scheinwerfer + Nebelscheinwerfer (Leuchtweitenregulierung)	20	4 mal je 0.05
Innenraumheizung, Gebläse	120	
Klimaanlage, Kompressor	500	
Elektrischer Kühlerventilator Motorkühlung	200	
Automatische Kupplung / Getriebe	200	
ABS AFR FDR ESP Motoren	200	4 mal 0.05
Drosselklappe Regler	50	
Lenkungsmotor (Servolenkung)	1000	
Scheibenwischer	90	2 mal
Türschließer (Softclose Automatik Heck)	50	
elektr. Fensterheber + Sonnendach	750	5 mal je 0.15
elektr. Rückspiegeleinstellung	200	2 mal 0.1
elektr. Sitzverstellung	880	8 mal je 0.11
elektr. Lenkradverstellung (Lenksäulenversteller)	50	
elektr. Gurtzuführung	20	2 mal je 0.1
elektr. Elemente Armaturenbrett (Navi, CD Player etc.)	10	
Zentralverriegelung	50	5 mal je 0.01
Sitzbelüftung	500	

Insgesamt ist es allerdings enorm schwierig die genaue Menge an NdFeB-Magneten zu bestimmen, da in nahezu allen Bereichen des Maschinenbaus auch Alternativen in Form sonstiger Permanentmagnete wie Ferrite (vergl. Abbildung 7) oder durch reine Induktionsmotoren bestehen. Daher muss hier auf die globale Produktion an NdFeB-Magneten und literaturbasierte Schätzungen des Verwendungsanteils im Bereich des Maschinenbaus zurückgegriffen werden. Insgesamt wird der Anteil der Verwendung von NdFeB-Magneten für Servomotoren in verschiedensten Produkten des Maschinenbaus einschließlich konventioneller Pkw auf ca. 40 % der Gesamtproduktion geschätzt (vergl. Constantinides, 2013; Gutfleisch et al., 2011; Roskill, 2011).

Sensoren, MRT

Eine Nischenanwendung von Magnetlegierungen bilden Magnetfeldsensoren, die in verschiedensten Bereichen, von der Automobilindustrie (z.B. Raddrehzahl-Sensoren, Pedalzustandserkennung, Erkennung des Zündzeitpunkts etc.) über Metalldetektoren, bis hin zu Kompass- und Navigationssystemen vorkommen.

Ein weiterer Anwendungsbereich von NdFeB Permanentmagneten bilden Magnetresonanztomographen (MRT) im Bereich der Medizintechnik. Pro Gerät können 1-3 Tonnen Magnetmaterial verbaut werden (Hoenderdaal et al., 2013). Allerdings ist hier anzumerken, dass ein Großteil der MRT-Anlagen über Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) auf Keramikbasis, die nur sehr geringe elektrische Widerstände aufweisen, die sehr starken Magnetfelder induzieren und keine Permanentmagnete enthalten. Lediglich bei sehr kleinen und teilweise mobilen MRTs werden NdFeB-Magnete eingesetzt. Dies spielt aber mengenmäßig eine untergeordnete Rolle.

Sonstige Anwendungsbereiche

Unter den Bereich sonstiger Anwendungen fallen in erster Linie Magnetabscheider (auch Wirbelstromabscheider), die durch Permanentmagnete energieeffizient gestaltet werden können, magnetische Kupplungen sowie verschiedenste Formen von magnetischen Verschlüssen und Anwendungen von Kleinmagneten im Konsumbereich (siehe insbesondere Constantinides, 2013).

Wie einleitend bereits erwähnt, zeigt sich bei der Betrachtung benötigter Rohstoffmengen für die Herstellung von NdFeB-Magneten die problematische Datengrundlage hinsichtlich der Produktion und Verfügbarkeit bestimmter Seltener Erden. So rechnet der USGS⁵ mit einem Anteil an Dysprosium von 1,2 % der Gesamtproduktion Seltener Erden (USGS, 2011, vergl. auch Abbildung 2). Auf Grund der unterschiedlichen Erz-Zusammensetzung nach Mine und Region (siehe auch Abbildung 5) sowie der weit höheren Preise schwerer Seltener Erden wie Dysprosium, Terbium oder auch Europium ist davon auszugehen, dass die tatsächliche Abbaumenge von Dysprosium inzwischen weit höher liegt als 1,2 % der Weltproduktion, was ca. 1350 t Dysprosiumoxid und 1150 t reduziertem Dysprosiummetall entspricht. Eine Analyse der Materialgehalte nach Anwendungsbereich auf Basis der verhältnismäßig gut dokumentierten Gesamtproduktion an NdFeB-Magneten zeigt, dass die tatsächliche Verwendungsmenge von Dysprosium eher im Bereich um 2000 t liegt (vergl. Abbildung 11). Dies spiegelt die problematische Datenlage hinsichtlich der tatsächlichen Produktion einzelner Seltener Erden wider. Dabei wirkt sich sowohl die Tatsache, dass es sich bei Seltener Erden um 17 verschiedene, im Verbund abgebaute Elemente handelt, als auch die hohe Konzentration der Produktion auf China negativ auf die verfügbare Datengrundlage aus. Produktionsstatistiken aus China entsprechen grundsätzlich eher den offiziellen Vorgaben der Zentralregierung in Peking, während die tatsächlichen Produktionsmengen insbesondere bei schweren Seltener Erden offenbar weit höher liegen. So wird davon ausgegangen, dass nach wie vor zwischen 10 und 20 kt an SEO in China inoffiziell gefördert

⁵U.S. Geological Survey

werden (Kingsnorth, 2014). Da ein Großteil des illegalen Bergbaus in den HREE-reichen südchinesischen Minen stattfindet (vergl. z.B. Wübbeke, 2013, siehe auch Abbildung 5), erscheint vor allem bei einigen schweren Seltenen Erden eine um 50% höhere Produktion als die offiziellen Vorgaben der Zentralregierung nicht unwahrscheinlich. In diesem Zusammenhang wirken die in Abbildung 11 berechneten Verbrauchsmengen trotz der niedrigeren Einschätzungen seitens der geologischen Dienste realistisch.

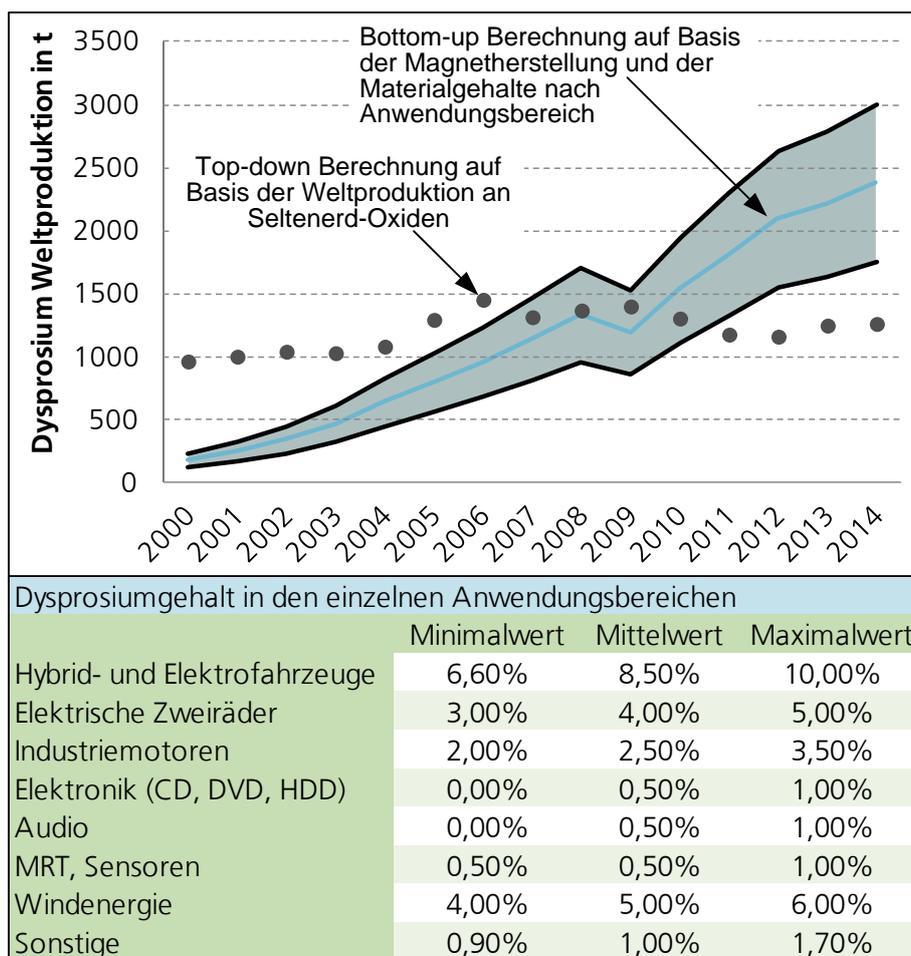


Abbildung 11: Top-down (als Anteil der Gesamtproduktion an SEO) und Bottom-up (auf Basis der Produktions- und Verbrauchsmengen von NdFeB-Magneten) Berechnung der industriell verarbeiteten Dysprosiummengen.

Inwiefern verschiedene Berichte zur Produktion Seltener Erden miteinander verstrickt sind und letztlich immer auf offizielle Daten der chinesischen Regierung (China Rare Earth Information Center, CREIC) zurückzuführen sind, wurde von Zepf (2013) analysiert und ist vereinfacht in Abbildung 12 dargestellt.

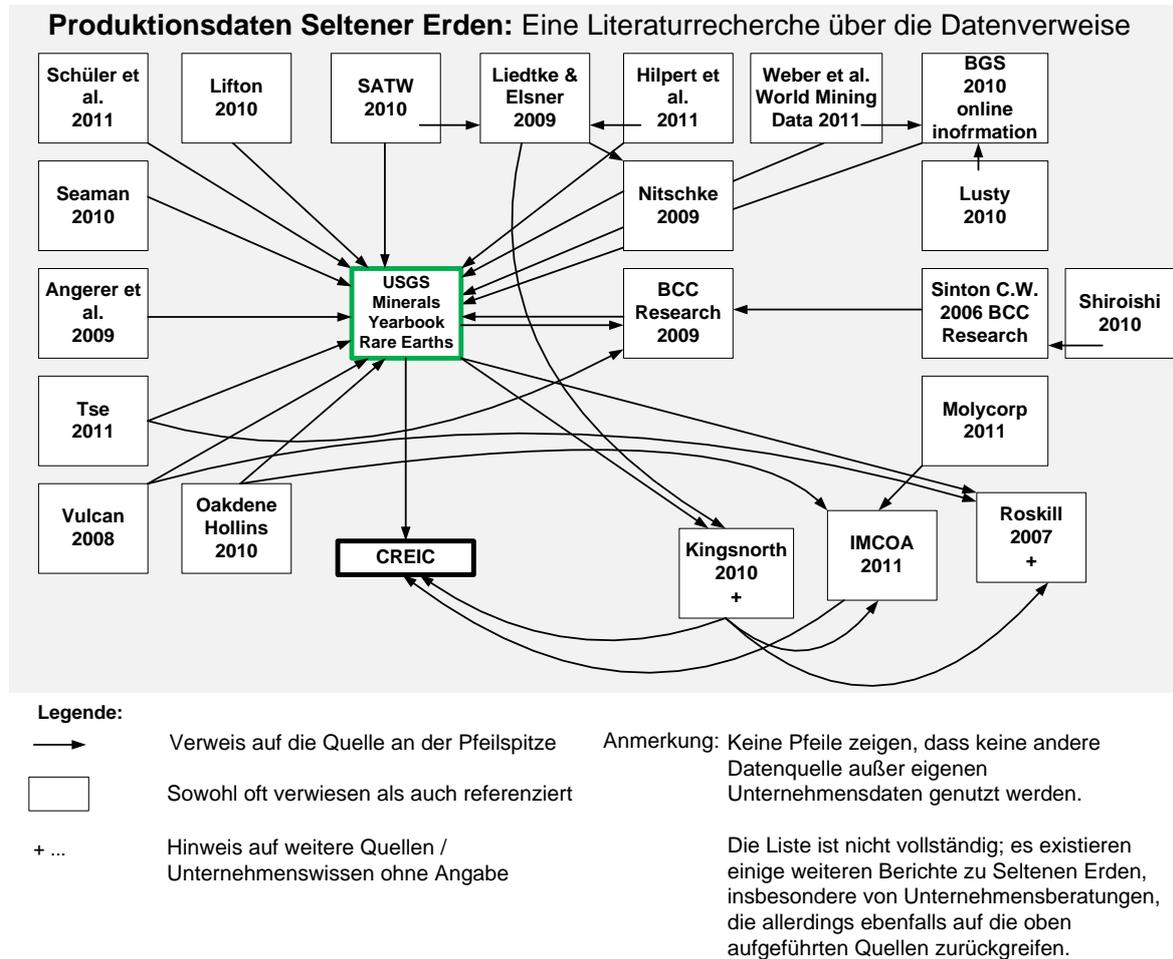


Abbildung 12: Vernetzung verschiedener Berichte, Marktanalysen und Studien zur Produktion Seltener Erden (vergl. Zepf, 2013, S.52). Wie hier gezeigt, beziehen sich nahezu alle Studien und Publikationen direkt oder indirekt auf die Zahlen des USGS (USGS, 2014), die wiederum auf den offiziellen Daten der chinesischen Regierung basieren, veröffentlicht durch das "China Rare Earth Information Center" (CREIC).

Für das globale Modell wird daher von den besser dokumentierten Produktionszahlen von NdFeB-Magneten in einem Top-down-Ansatz ausgegangen.

2 System Dynamics als Methode zur Modellierung von Rohstoffsystemen

Die methodischen Grundlagen zur systemdynamischen Modellierung sowie die theoretischen Erläuterungen zur Entwicklung von dynamischen Stoffkreislauf-Modellen werden in diesem Abschnitt behandelt. Aufbauend auf die Stoffkreisläufe werden die Grundlagen zur Ergänzung des Modells um marktdynamische Effekte erörtert.

2.1 Der System Dynamics Ansatz

System Dynamics ist eine auf der allgemeinen Systemtheorie und Kybernetik (Steuerungs- und Regelungstheorie) aufbauende Methodik zur Modellierung und Simulation komplexer, dynamischer Systeme. Dabei stehen einzelne Modellelemente über Ursache-Wirkungsbeziehungen sowie verzögerte Rückkopplungseffekte miteinander im Verhältnis (Bossel, 1989, S.25 f.). Der System Dynamics Ansatz wurde in den 1950er Jahren von Jay W. Forrester am Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelt (Forrester, 1961). Dabei lag die wissenschaftliche Neuerung nicht in der grundlegenden Simulation dynamischer Systeme über numerische Lösungsverfahren von Differenzialgleichungssystemen –diese Ansätze waren in der Mess- und Regeltechnik kontinuierlicher industrieller Prozesse schon seit längerem im Einsatz– sondern in der Übertragung dieser Systeme auf sozio-ökonomische und ökologische Fragestellungen.

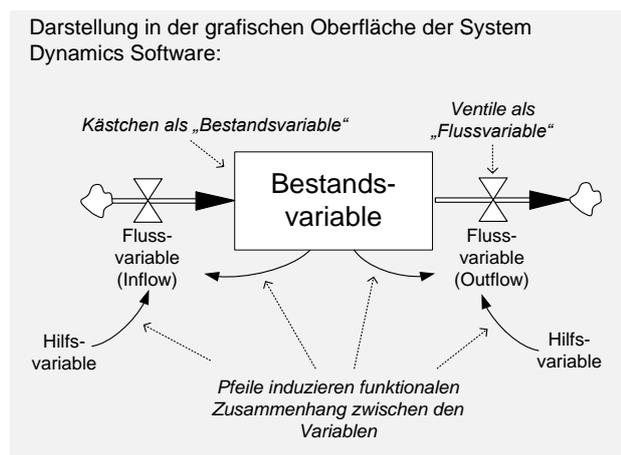
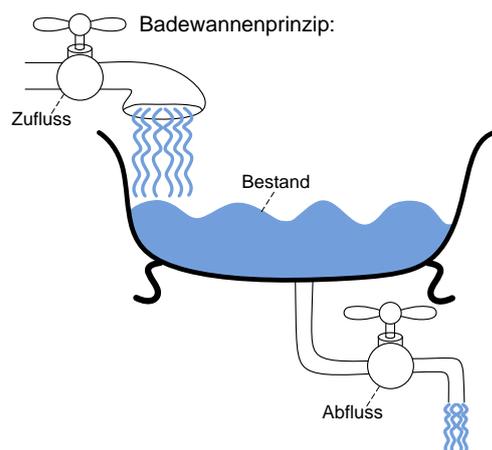


Abbildung 13: Das Badewannenprinzip zur Veranschaulichung von Bestands- und Flussvariablen sowie die Darstellung der verschiedenen Variablentypen innerhalb der System-Dynamics Entwicklungsumgebung (vergl. Sterman, 2000, S.52).

Der System Dynamics Ansatz basiert, wie nachfolgend erläutert, auf dem Zusammenspiel von Bestands- und Flussvariablen und deren gegenseitigen Abhängigkeiten. Bestandsänderungen ergeben sich aus der Differenz der mit dem Bestand in Beziehung stehenden Flussvariablen und werden über jeden diskreten Zeitschritt aufsummiert, was mathematisch der Näherung eines Integrals entspricht. Bildlich lässt sich dieser Zusammenhang einfach als Badewanne darstellen, wobei sich die Änderung des Wasserstands in der Wanne (Bestand) zu jedem Zeitpunkt aus der Differenz von Zufluss und Abfluss ergibt (vergl. Abbildung 13). Da das Prinzip von System Dynamics der allgemeinen Regelungstechnik entspricht, ist die Darstellungsform ähnlich zu Prozessfließbildern: Flussvariablen werden durch das Symbol eines einfachen Handventils dargestellt, Bestandsvariablen durch Kästchen (vergl. Abbildung 13 rechts). Neben den typischen Fluss- und Bestandsvariablen enthalten System Dynamics Modelle zahlreiche Hilfsvariablen, wie z.B. Wachstumsraten, Kalibrier-Parameter etc.

2.1.1 Rückkopplungseffekte und zeitliche Verzögerungen

Der zentrale Bestandteil von System Dynamics Modellen ist die Verbindung von Verzögerungseffekten (Delays) und Rückkopplungsschleifen (Feedbacks). Feedbacks führen mathematisch gesehen zur Formulierung von Systemen aus Differenzialgleichungen erster Ordnung, die analog zur Simulation fluidmechanischer oder thermodynamischer Prozesse numerisch (als reines Anfangswertproblem) gelöst werden. Abbildung 14 zeigt die grundsätzliche Implementierung von Rückkopplungs- und Verzögerungseffekten.

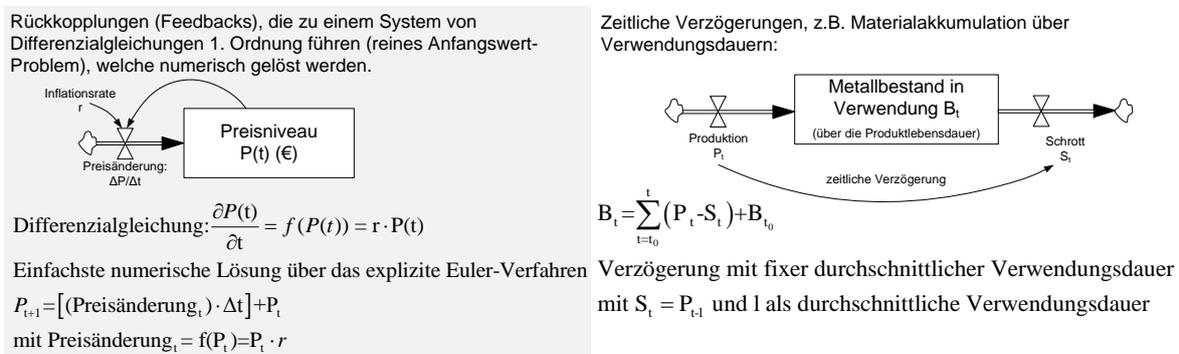


Abbildung 14: Rückkopplungen, die zu einem System aus Differenzialgleichungen 1.Ordnung führen, welches dann als reines Anfangswertproblem numerisch gelöst wird.

Der System Dynamics Ansatz eignet sich sehr gut zur Modellierung von Rohstoffsystemen, da über verschiedene Formen der Verzögerungsfunktionen die physischen Verwendungszyklen und Stoffkreisläufe simuliert werden können und die Modelle im Anschluss um marktdynamische Rückkopplungseffekte erweitert werden können. Diese beiden Aspekte der Modellierung von Rohstoffsystemen (1. physische Stoffströme und 2. Marktdynamik durch Anpassungseffekte auf Rohstoffknappheit bzw.

Hochpreisphasen in Form verschiedener Rückkopplungseffekte) werden nachfolgend näher erläutert und anschließend in den Rohstoffmodellen für Neodym und Dysprosium umgesetzt.

2.2 Dynamische Stoffkreisläufe und Produktverwendungszyklen

Wie im folgenden Abschnitt erläutert, eignet sich der System Dynamics Ansatz auf vielseitige Weise zur Entwicklung und Simulation von Materialkreisläufen und Stoffflussmodellen. Dies ist vor allem auf die vielseitigen Möglichkeiten der Modellierung von Materialakkumulationen über Produkt-Verwendungsdauern durch verschiedene Verzögerungsfunktionen sowie auf das Prinzip der Bestands- und Flussvariablen zurückzuführen. Weiterhin ermöglicht der flexible Modellaufbau eine individuelle Anpassung an die Eigenschaften einzelner Kreislaufsysteme.

Produktlebensdauern und “Aging Chains”

Bei der Bewertung von Recycling-Effizienzen für Industriemetalle stellt sich regelmäßig das Problem, dass zwar recht gute Produktionsstatistiken vorhanden sind, das genaue Schrottaufkommen aber nur in sehr begrenztem Umfang erfasst wird.

Die Gesamtproduktionsmengen, ebenso wie die Produktion aus primären Quellen (Verarbeitung von Erzen aus den Minen) sind meist bekannt. So kann die Recyclingmenge über die Differenz aus Gesamtproduktion und Primärproduktion errechnet werden. Was allerdings nicht bestimmt werden kann ist, wie viel von dem Material, welches theoretisch vorhanden sein müsste auch tatsächlich recycelt wird, also wie hoch die Recyclingeffizienz der Altschrotte ist. Hierzu können Lebenszyklus-Modelle nach dem in Abbildung 15 und Abbildung 16 beschriebenen Prinzip herangezogen werden. Die Abschätzung des Schrottaufkommens erfolgt als Verzögerungsfunktion historischer Produktionszahlen (vergl. Abbildung 15).

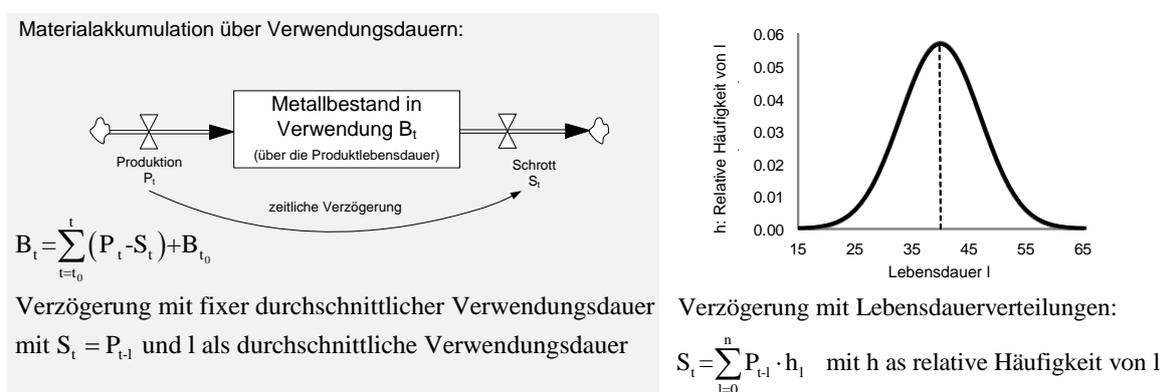


Abbildung 15: Akkumulation von Produkten und Materialien über die Verwendungsdauern mit Hilfe von fixen durchschnittlichen Verwendungsdauern bzw. Verteilfunktionen.

Gelangen obsolete Produkte (alte Elektroware, Altautos etc.) in falsche Abfallkanäle (z.B. alte Mobiltelefone in den Hausmüll und dann in Müllverbrennungsanlagen), oder werden als Gebrauchtware deklariert und exportiert um auf ineffiziente Weise unter hoher Umweltbelastung in Entwicklungsländern "recycelt" zu werden, ist dies als Ressourcenverlust zu bewerten und ist weder aus ökologischer noch aus ökonomischer Sicht sinnvoll (Hagelüken, 2010). Weiterhin wird das Recycling von Elektroschrotten wegen der immer kürzeren Produkt- und Innovationszyklen und der zahlreichen verschiedenen Materialien, die in den Produkten verarbeitet sind, auch technisch zu einer immer größeren Herausforderung (Goldmann, 2010; Graedel et al., 2011; Reuter et al., 2013). So unterscheidet sich z.B. ein modernes Smartphone bezüglich der verwendeten Materialien massiv von konventionellen Mobiltelefonen, die noch vor wenigen Jahren Marktführer waren. Dies fängt bei der Batterietechnologie an und geht über die Bildschirme, das Gehäuse und die Gläser bis hin zu den Mikrocondensatoren auf den Leiterplatten (Gantner et al., 2013). In diesem Zusammenhang ist es für die Recyclingindustrie oft wichtig, eine genauere Vorstellung von der Zusammensetzung der Schrotte, deren Alter usw. zu bekommen. Hierzu kann die in Abbildung 16 beschriebene "Aging Chain" herangezogen werden.

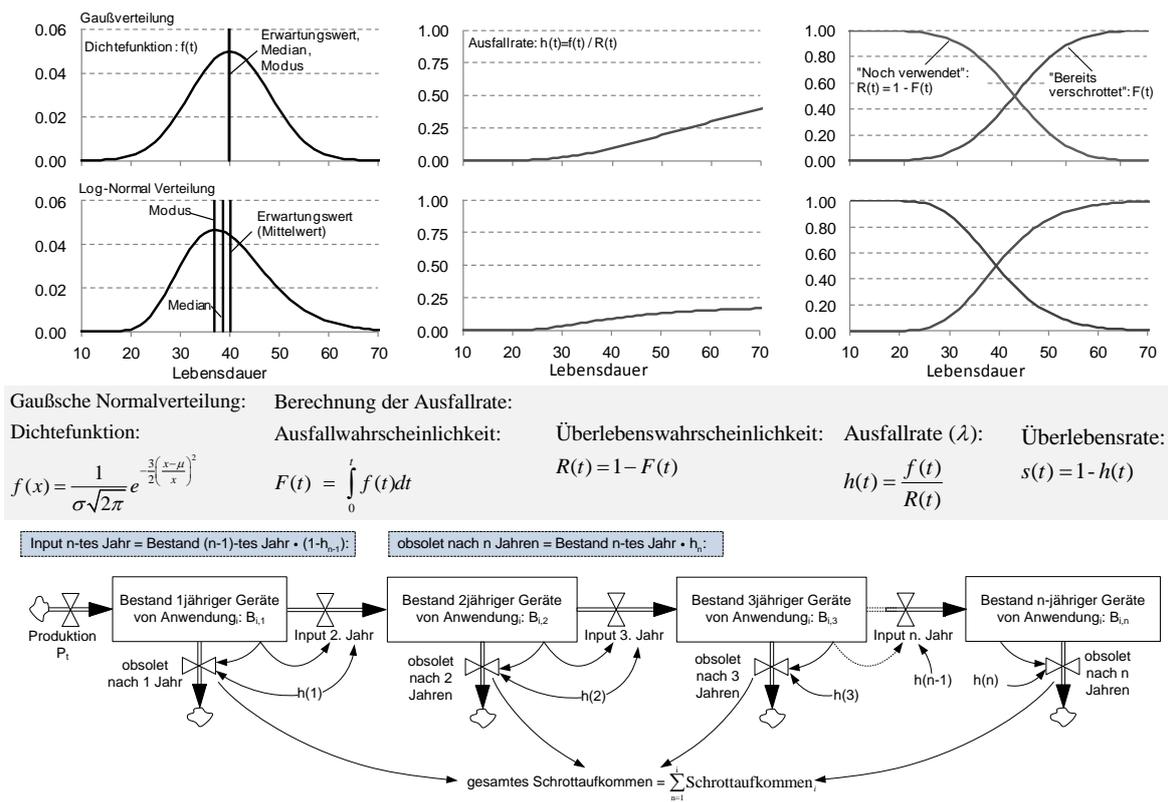


Abbildung 16: Detaillierte Simulation von Produktlebenszyklen und Alterungsprozessen über sogenannte "Aging Chains" und korrespondierende Ausfallwahrscheinlichkeiten.

Auf Basis historischer Produktions- und Verkaufszahlen werden die Materialien (bzw. Produktbestände) für jeden Zeitschritt simuliert, wobei am Ende des Zeitschrittes die Materialien entweder der Ver-

schrottung zugeführt werden, oder in den Bestand nächst höheren Alters fließen. Die jeweiligen Ausfallraten lassen sich aus den angesetzten Verteilfunktionen nach dem in Abbildung 16 dargestellten Prinzip berechnen. Während in Abbildung 16 das Beispiel der Gaußschen Normalverteilung sowie einer rechtschiefen Log-Normalverteilung aufgeführt ist, werden im Anhang (Abbildung 33) weitere typische rechts- und linksschiefe Verteilfunktion aus dem Bereich des Qualitätsmanagements und der Sicherheitstechnik zur Beschreibung von Lebensdauerverteilungen gegeben. Im Bereich der Bewertung der Sicherheit und Qualität technischer Anlagen ist das Prinzip der Ausfallwahrscheinlichkeiten seit langem verbreitet und in der Fachliteratur breit zugänglich (vergl. z.B. Kahle und Liebscher, 2013). Mit Hilfe von System Dynamics Software lassen sich nach diesem Ansatz mit relativ geringem Arbeitsaufwand verhältnismäßig genaue Stoffstrommodelle entwickeln. Auch lassen sich in der "Aging Chain" einmalige, die Lebensdauer beeinflussende Effekte abbilden. So könnte z.B. politische Einflussnahmen wie die Abwrackprämie bei Altautos als Einmaleffekt in Form einer höheren Ausfallwahrscheinlichkeit in die Modellierung aufgenommen werden, wobei anschließend wieder auf die ursprünglichen Ausfallwahrscheinlichkeiten zurückgegriffen wird.

Bei der dynamischen Materialfluss-Analyse wird weiterhin methodisch zwischen Bottom-up-Aggregationen von Rohstoffgehalten über die Gesamtheit der hergestellten oder verkauften Produkte bzw. einer Top-down-Verteilung der insgesamt verfügbaren Rohstoffmenge (Rohstoffproduktion + Importe - Exporte) auf einzelne Verwendungsbereiche unterschieden. Das Prinzip beider Ansätze ist in Abbildung 17 dargestellt.

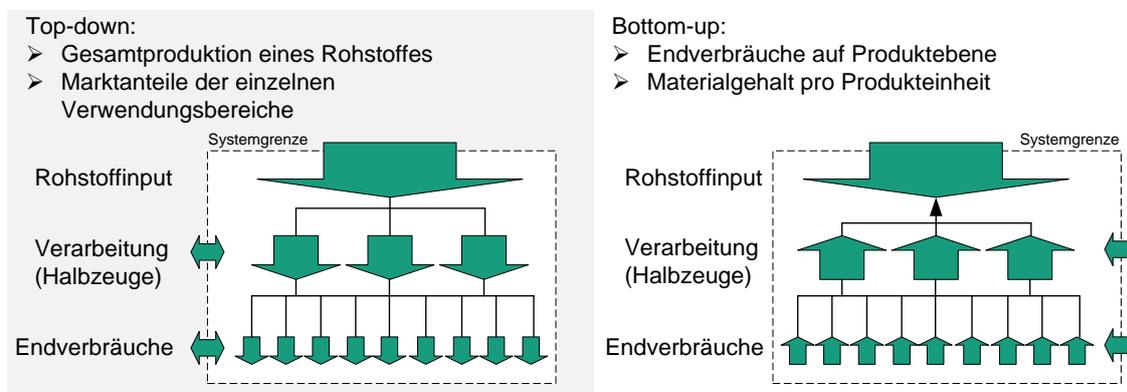


Abbildung 17: Top-down und Bottom-up-Ansätze zur Modellierung von Materialflüssen.

Tendenziell eignen sich für globale und geographisch weitläufigere Analysen (bis hin zur Länderebene) Top-down-Ansätze (Pauliuk et al., 2013), da meist Produktions- und Handelsdaten sowie Verwendungsstrukturen durch Behörden (z.B. Zollämter) und Industrieverbände festgehalten werden, während für kleinere räumliche Dimensionen (z.B. Städte, Landkreise, Bundesländer) auf Grund der schlechten Datenlage hauptsächlich auf Bottom-up-Ansätze zurückgegriffen wird (siehe z.B. Bergbäck et al., 2001). Auch sind Bottom-up-Ansätze bei der Stoffstromanalyse von Technologiemetallen häufig notwendig, da die Datenlage zu Produktionsmengen und Verwendungsstrukturen oft unvollständig

erscheint und der Stoffaustausch über die Systemgrenzen auf Grund von unzureichendem Detailgrad der Güterklassifikationen (z.B. HS Codes zur Bestimmung von Handelsdaten) möglicherweise nicht eindeutig nachvollzogen werden kann. Zu beachten ist, dass durch die pauschale Abschätzung von Materialgehalten pro Produkteinheit (z.B. g NdFeB-Magnet pro Laptop, Mobiltelefon, Pkw etc.) bereits bei geringen Schätzfehlern durch die Aufsummierung großer Stückzahlen erhebliche Gesamtabweichungen entstehen können. Daher sind, wenn es die Datenlage ermöglicht, Top-down und Bottom-up-Vergleiche zur Ergebnisvalidierung sehr sinnvoll (Hirato et al., 2009).

2.3 Modellierung von Marktdynamik

Neben der Modellierung der physischen Materialströme lassen sich durch die Implementierung von Rückkopplungseffekten grundsätzliche Anpassungsmechanismen an Rohstoffmärkten formulieren. Dabei finden sowohl auf Seiten des Angebots als auch bei der Rohstoffnachfrage kontinuierliche Anpassungseffekte statt (vergl. Abbildung 18).

Dabei geht die Spanne der Anpassungseffekte der Nachfrageseite von einer reinen Effizienzsteigerung (d.h. einer Reduzierung des Rohstoffverbrauchs pro Produkteinheit) bis hin zu verschiedenen Formen der Substitution (siehe hierzu auch Ziemann und Schebek, 2010):

Effizienzsteigerung: Eine Technologie / ein Materialsystem erreicht die gleiche Funktionalität mit weniger Verbrauch eines bestimmten Rohstoffes.

Rohstoff-Substitution: Einzelne Elemente werden durch andere Elemente bei weitgehend gleichbleibender Funktionalität des Materialsystems ersetzt.

Material-Substitution: Ein anderes, optimiertes Materialsystem, das auf der gleichen Funktionalität beruht, ersetzt ein konventionelles Materialsystem.

Funktionale Substitution: Eine alternative Technologie ersetzt die Funktion einer anderen Technologie, was sich direkt auf den Material- und Rohstoffbedarf auswirkt.

Auch ist in Zeiten hoher Rohstoffpreise eine effizientere Sammlung und Trennung von Schrotten zu erwarten. Während es bei klassischen Industriemetallen mit eigener Produktionsinfrastruktur bei einer Verknappung (Hochpreisphase) zu einer Anpassung der Kapazitäten und Investitionen in den Bergbau kommt, die sich zeitverzögert auf die Primärproduktion auswirkt, dominieren bei Kuppel- und Nebenprodukten eher die Anpassungseffekte der Nachfrageseite, da wenig Flexibilität seitens des Angebots besteht. Insgesamt lassen sich aus der Literatur die in Abbildung 18 zusammengefassten Kausalitäten formulieren. Dabei stellt Abbildung 18a eine Erweiterung des klassischen Regelkreises der Rohstoffversorgung dar, während Abbildung 18b ein Kausaldiagramm dieses erweiterten Regelkreises an Rohstoffmärkten zeigt.

Auf Basis dieser Zusammenhänge und Rückkopplungseffekte wird das im folgenden Abschnitt vorgestellte Stoffstrommodell in Abschnitt 4 um marktdynamische Effekte ergänzt. Diese Kombination aus physischen Stoffstrommodellen und Marktdynamiken ermöglicht eine verhältnismäßig realistische und auf verschiedenste Problemstellungen anwendbare Modellierung von Rohstoffsystemen.

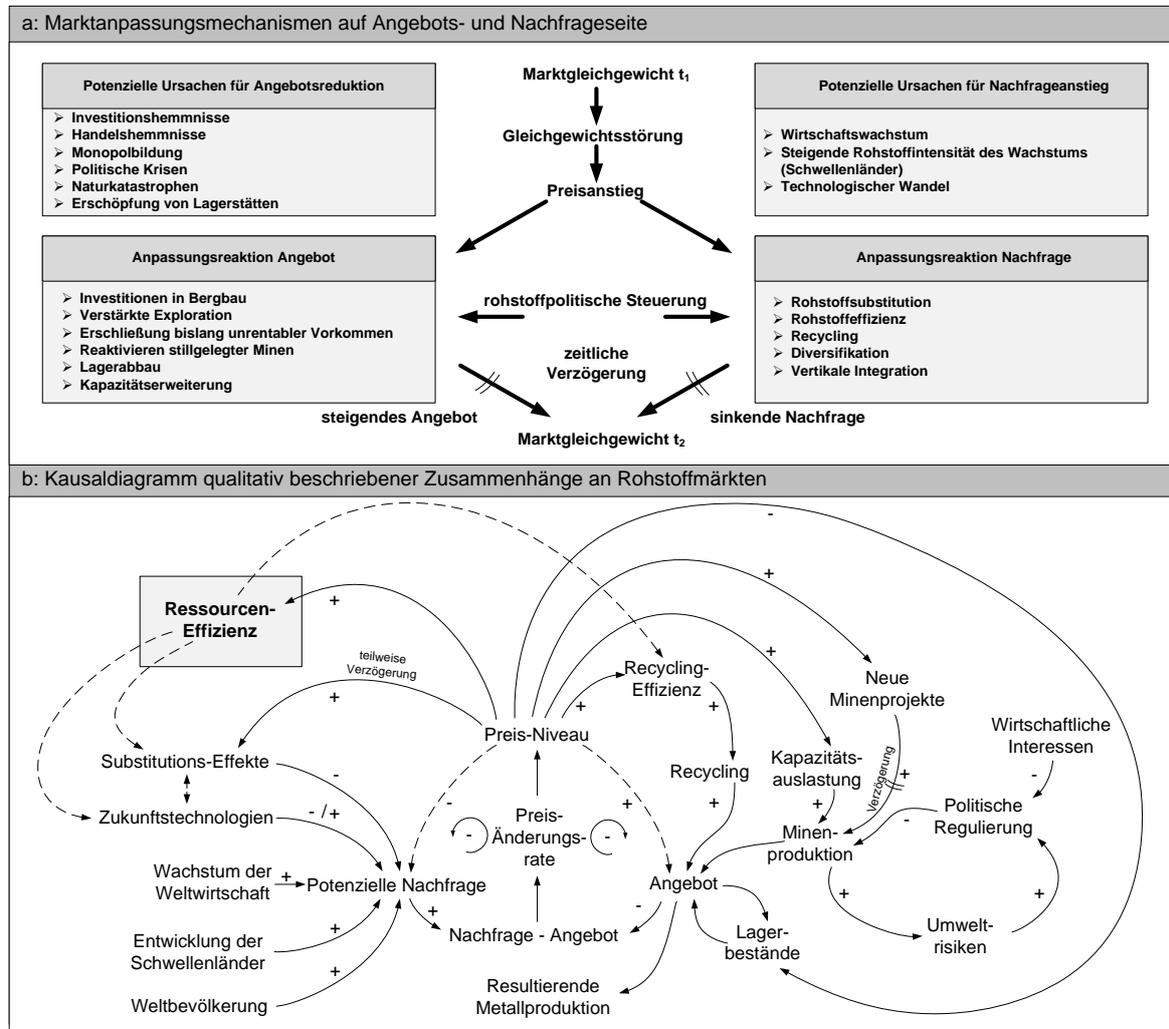


Abbildung 18: Anpassungseffekte an Rohstoffmärkten.

a: Erweiterter Regelkreis der Rohstoffversorgung nach Solar et al. (2009), vergl. auch Gandenberger et al. (2012); Wellmer und Dalheimer (2012, S.25).

b: Kausaldiagramm verschiedener Rückkopplungseffekte auf globalen Rohstoffmärkten (Glöser und Faulstich, 2012) siehe auch Olivetti et al. (2015); Sverdrup et al. (2014).

3 Globales Modell der Neodym- und Dysprosium-Materialflüsse

Die grundlegende Struktur des globalen Stoffstrommodells für Neodym und Dysprosium, bzw. für NdFeB-Magnete, ist in Abbildung 19 dargestellt. Auf Basis der Produktionsdaten der vergangenen 15 Jahre (vergl. Abbildung 7) wird über einen Top-down-Ansatz der Verwendungszyklus in den einzelnen Bereichen simuliert. Da bisher nur Recyclingkonzepte bestehen, aber kein Recycling von NdFeB-Magneten stattfindet, werden mit Hilfe dieses Modells globale Recyclingpotenziale aufgezeigt. Inwiefern Recycling in Zukunft zum Gesamtangebot an Magnetwerkstoffen beitragen kann, wird durch die Modellerweiterung in Kapitel 4 diskutiert.

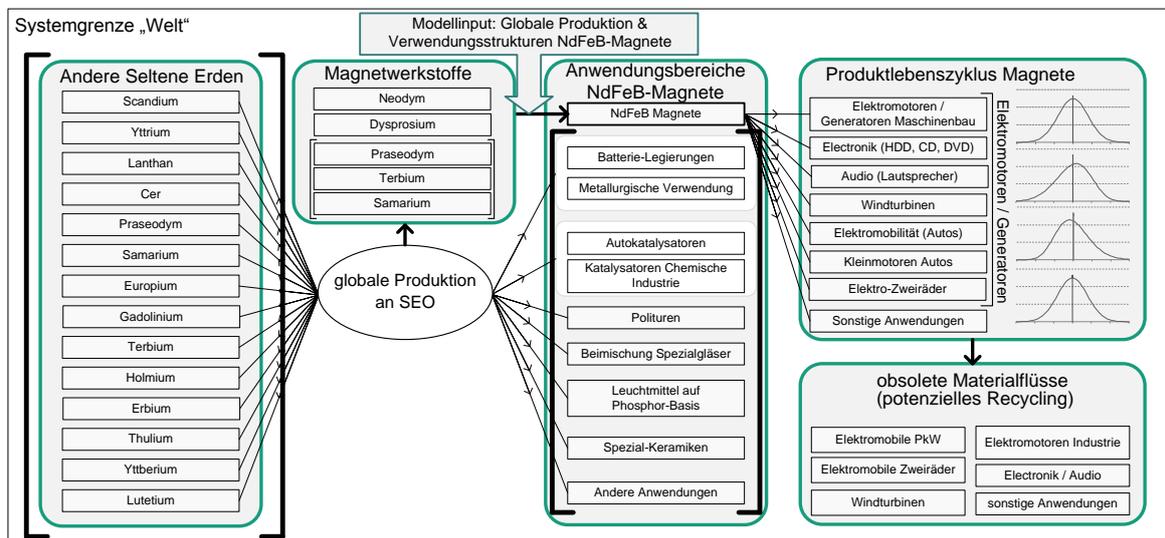


Abbildung 19: Struktur des globalen Stofffluss-Modells für Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe und Abgrenzung von der restlichen Wertschöpfung von Seltenerd-Elementen.

Tabelle 1 zeigt die literaturbasierten Annahmen zu den Verwendungsdauern in den verschiedenen Anwendungsbereichen von NdFeB-Magneten.

Tabelle 1: Annahmen zur durchschnittlichen Verwendungsdauer in den einzelnen Anwendungsbereichen von NdFeB-Magneten (vergl. insbesondere Du und Graedel, 2011).

Anwendungsbereich	Durchschnittliche Verwendungsdauer	Anwendungsbereich	Durchschnittliche Verwendungsdauer
Hybrid und Elektro-Autos	12	E-Bikes	10
Windkraft	20	Servomotoren (Industrie)	15
Sonstige	10	Sensoren & MRT	10
Audio	10	Elektronik	8

Dabei ist zu beachten, dass sich die hier angesetzten Verwendungsdauern auf die durchschnittliche Zeitspanne zwischen Produktion und Verschrottung beziehen und in einigen Bereichen, insbesondere bei den Elektronikanwendungen die eigentliche Nutzungsdauer weit niedriger liegt. Im Modell wurde aufgrund mangelnder Daten zu genauen Verläufen der Verteilfunktionen der Verwendungsdauern von Gaußschen Normalverteilungen ausgegangen. Die Zusammensetzung der Magnete nach Anwendungsbereich (insbesondere hinsichtlich des Dysprosiumanteils) entspricht den in den Abbildung 6 und 11 dargestellten Werten. Anzumerken ist weiterhin, dass wie zuvor bereits erläutert, häufig eine Beimischung von Praseodym zum Neodym stattfindet. Da dies für die Rezyklierbarkeit keine Rolle spielt wird hier lediglich der Neodymanteil als Beimischung leichter Seltener Erden betrachtet. Auch würde Terbium dieselben Funktionen wie Dysprosium hinsichtlich der Steigerung der Koerzitivität (Koerzitivfeldstärke) erfüllen (vergl. Abbildung 6). Allerdings ist Terbium noch knapper und teurer als Dysprosium (vergl. Abbildung 2) und wird zusammen mit Europium in erster Linie für die Herstellung von Leuchtstoffen in Energiesparlampen verwendet (siehe hierzu auch Tabelle 1). Daher ist davon auszugehen, dass der Terbiumanteil in NdFeB-Magneten sehr niedrig ist, sodass eine reine Betrachtung von Dysprosium als Beimischung schwerer Seltener Erden realitätsnah erscheint. Auch Gadolinium, was in geringen Mengen zur Steigerung der Korrosionsbeständigkeit von NdFeB-Magneten beigemischt wird, wird hier nicht betrachtet. Zentrale Ergebnisse des globalen Magnetmodells sind in Abbildung 20 zusammengefasst.

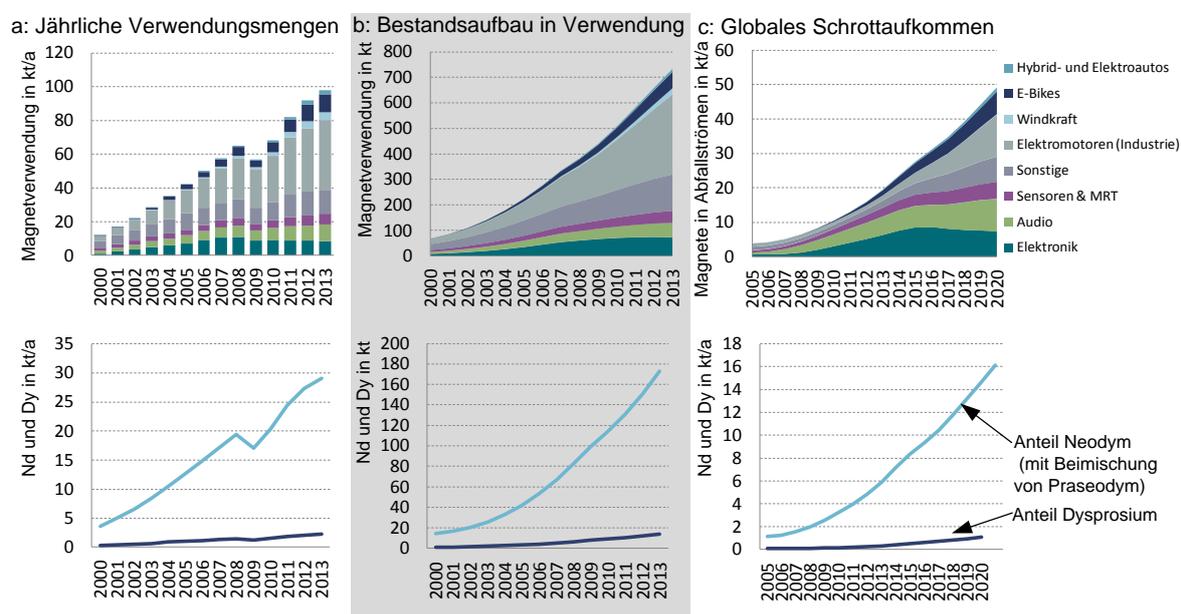


Abbildung 20: Ergebnisse des globalen Stoffstrommodells für NdFeB-Magnete.
 a: Jährlich verbrauchte Menge an Magneten sowie die enthaltenen Seltenerd-Elemente.
 b: Bestand an NdFeB-Magneten in Verwendung.
 c: Obsolete Materialströme.

Neben der Akkumulation von NdFeB-Magneten, bzw. Neodym und Dysprosium in Verwendung, kann

mit Hilfe des Modells vor allem aufgezeigt werden, inwiefern die heutige Schrottzusammensetzung von Kleinmagneten aus dem Elektronik- und Audibereich (vergl. Abbildung 20c) dominiert wird. Durch die relativ langen Verwendungsdauern der Industriemotoren, aber auch von Windkraftanlagen und Elektroautos, nimmt die Menge an größeren Motoren mit PM-Magneten im Schrottaufkommen erst allmählich zu. Dies ist sicherlich mit ein Grund dafür, weshalb derzeit noch kein Recycling von NdFeB-Magneten stattfindet. Durch die kontinuierliche Zunahme an größeren Synchronmotoren mit NdFeB-Magneten im Schrottaufkommen, z.B. aus konventionellen Pkw (insbesondere Lenkungsmotoren für die Servolenkung), E-Bikes, Traktionsmotoren von Elektromobilen oder aus sonstigen obsoleten Elektroprodukten (Pumpsysteme, Klimaanlage etc.), ist in absehbarer Zukunft mit einer vermehrten Sammlung der Magnete zu rechnen (Elwert und Goldmann, 2014). Dennoch bleibt die Wirtschaftlichkeit von Recyclingverfahren für NdFeB-Magnete stark von der Preisentwicklung der Primärrohstoffe abhängig, die inzwischen wieder auf Vorkrisenniveau abgesunken sind (siehe Abbildung 3). Da der Bedarf an effizienten elektrischen Servomotoren mit NdFeB-Magneten nicht nur für mobile Anwendungen in Zukunft weiter steigen wird, kann allerdings auf längere Sicht nicht von einer entspannten Versorgungslage ausgegangen werden.

Inwiefern sich die Verbreitung alternativer Antriebe im Pkw-Markt auf die zukünftige Nachfrage nach Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe auswirkt, wird nachfolgend mit Hilfe der systemdynamischen Modellierung analysiert.

4 Ergänzung der physischen Stoffströme um Marktdynamik und Rückkopplungseffekte

Während das zuvor beschriebene Modell den System Dynamics Ansatz zur reinen Materialfluss-Modellierung nutzt und die Bestandsvariablen lediglich zur Darstellung der Akkumulation von Materialmengen über Produktnutzungsdauern (durch verschiedene Formen von Verzögerungsfunktionen) zum Einsatz kommen, werden im folgenden Abschnitt aufbauend auf das globale Stoffstrommodell marktdynamische Anpassungsmechanismen untersucht. Theoretische Aspekte hierzu wurden in Abschnitt 2.3. diskutiert.

4.1 Auswirkungen der Diffusion alternativer Fahrzeugantriebe auf die Rohstoffmärkte von Neodym und Dysprosium

Bei klassischen Industriemetallen bilden die Weltwirtschaft und insbesondere die Entwicklung verschiedener Schwellenländer den entscheidenden Nachfragemotor, wohingegen der Bedarf von Neodym und Dysprosium in erster Linie technologiegetrieben ist (vergl. z.B. Angerer, 2010; Tercero, 2012). Bisherige Studien zur Entwicklung des Rohstoffbedarfs für Zukunftstechnologien betrachten häufig nur die reine Nachfrageentwicklung, ohne das limitierte Angebot zu berücksichtigen (vergl. z.B. Alonso et al., 2012; Angerer et al., 2009; Habib und Wenzel, 2014; Hoenderdaal et al., 2013). Da die meisten Technologiemetalle allerdings nur als Neben- bzw. Kuppelprodukte gewonnen werden und eine entsprechend starke Anpassung des Angebots an die wachsende Nachfrage kaum möglich erscheint, wird sich die Nachfrage an das limitierte Angebot anpassen müssen. Hier kommen in allen Anwendungsbereichen Substitutionseffekt sowie Effizienz Anpassungen zum Tragen. Unter Umständen wird allerdings auch die Verbreitung bestimmter Technologien auf Grund mangelnder Rohstoffverfügbarkeit beeinträchtigt bzw. verhindert.

Anpassungsreaktionen der Nachfrage können sogar dazu führen, dass aus einer anfänglichen Knappheit, ein Rohstoff-Überschuss entsteht, da einzelne Anwendungsgebiete systematisch auf alternative Rohstoffe oder Technologien setzen. So lässt sich z.B auch der systematische Preisverfall für Seltene Erden nach dem extremen Peak 2011 erklären, der dazu führte, dass nur noch dort Seltene Erden verwendet werden, wo keine Alternativen zur Verfügung standen. Diese Anpassung kann auf Grund der Umstellung der Produktionsprozesse immer nur Zeitverzögert erfolgen, ist aber an verschiedenen Rohstoffmärkten, so z.B. auch bei Tantal zu beobachten (Buijs et al., 2012). Diese Anpassungsmechanismen lassen sich mit den hier vorgestellten Modellen abbilden. So können diese Modelle als

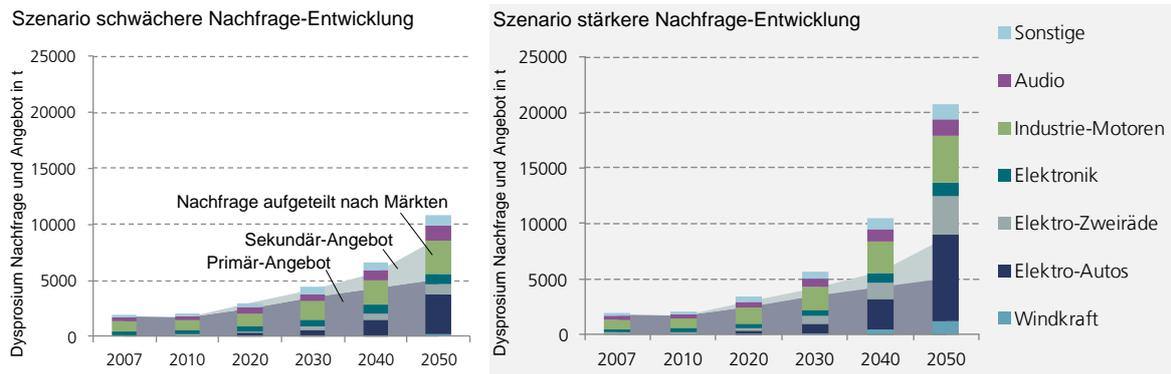


Abbildung 21: Beispiel der separaten Betrachtung von Nachfrage und Angebot (diese Szenarien sind als Beispiel entnommen aus Habib und Wenzel, 2014). Diese Form der Analyse der Nachfrageentwicklung beinhaltet keine Marktanpassungsmechanismen und basiert ausschließlich auf exogenen Wachstumsannahmen.

erweiterte Szenario-Analyse ergänzend zu den Studien gesehen werden, die auf reine Nachfragebetrachtungen basieren, oder Nachfrage- und Angebotsentwicklungen separat gegeneinanderstellen (vergl. Abbildung 21).

Wie im Folgenden am Beispiel von Dysprosium gezeigt, eignet sich der System Dynamics Ansatz durch die Möglichkeit der Erweiterung der physischen Stoffstrommodelle um dynamische Anpassungsmechanismen unter Berücksichtigung von Angebots- und Nachfrageentwicklungen sehr gut zur Analyse der Auswirkungen der Diffusion von Zukunftstechnologien auf Rohstoffmärkte. Während in bisherigen Studien vorwiegend reine Nachfrageszenarien aufgezeigt wurden, lassen sich mit Hilfe der System Dynamics Modelle auch potenzielle Anpassungs- und Substitutionseffekte und deren Wirkung auf den Gesamtmarkt abbilden. Dabei liegt das Ziel der Modellierung nicht in der genauen Prognose der zukünftigen Marktentwicklung (was angesichts der vielseitigen mit großen Unsicherheiten behafteten Einflussfaktoren unmöglich ist), sondern vielmehr in der Entwicklung eines Werkzeugs zur erweiterten Szenarioanalyse, was eine sinnvolle Ergänzung zu vielen bisherigen Studien darstellen kann.

Hierzu wurde das globale Stoffstrommodelle für Dysprosium mit einem bereits vorhandenen Flottenmodell (GloMo) zur Entwicklung des weltweiten Pkw-Marktes gekoppelt.

4.1.1 Das Globale Mobilitätsmodell (GloMo)

Das globale Flottenmodell (GloMo) ist analog zu den zuvor beschriebenen Rohstoffmodellen in die System Dynamics Software 'Vensim' implementiert.

Da dieses Modell nicht Teil der vorliegenden Arbeit ist, sondern lediglich zur Darstellung möglicher Entwicklungen des Pkw Marktes genutzt wird, wird das Modell hier nur relativ kurz vorgestellt. Detail-

lierte Erläuterungen zum hier verwendeten globalen Flottenmodell wurden anderweitig veröffentlicht (vergl. hierzu insbesondere Kühn und Glöser, 2012, 2013; Schade et al., 2012). Das systemdynamische Modell wurde zur Prognose des weltweiten Pkw-Absatzes für den Innovationsreport "Zukunft der Automobilindustrie" für das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) erstellt (Schade et al., 2012, S.164). Die Ausbreitung unterschiedlicher Technologien auf dem Fahrzeugmarkt wird von den weltweiten demographischen und sozioökonomischen Entwicklungen beeinflusst. Im Modell werden besonders die TRIADE-Staaten¹ und die aufstrebenden Volkswirtschaften der BRICS-Staaten² betrachtet. Zwar ist damit nur knapp 85% des globalen Automobilmarkts abgedeckt, dennoch ist davon auszugehen, dass alternative Antriebe in anderen Wirtschaftsregionen auf Grund mangelnder Infrastruktur keine entscheidende Rolle spielen werden. Die in GloMo implementierte Verknüpfung des systemdynamischen Ansatzes mit der diskreten Entscheidungstheorie ermöglicht eine relativ realistische Modellierung der Diffusion alternativer Antriebe. Die Modularisierung dient der besseren Übersichtlichkeit und der Möglichkeit, jeden Einflussfaktor einzeln analysieren zu können (siehe auch Kühn und Glöser, 2012, 2013). Abbildung 22 zeigt den schematischen Aufbau des GloMo-Modells mit seinen fünf Modulen.

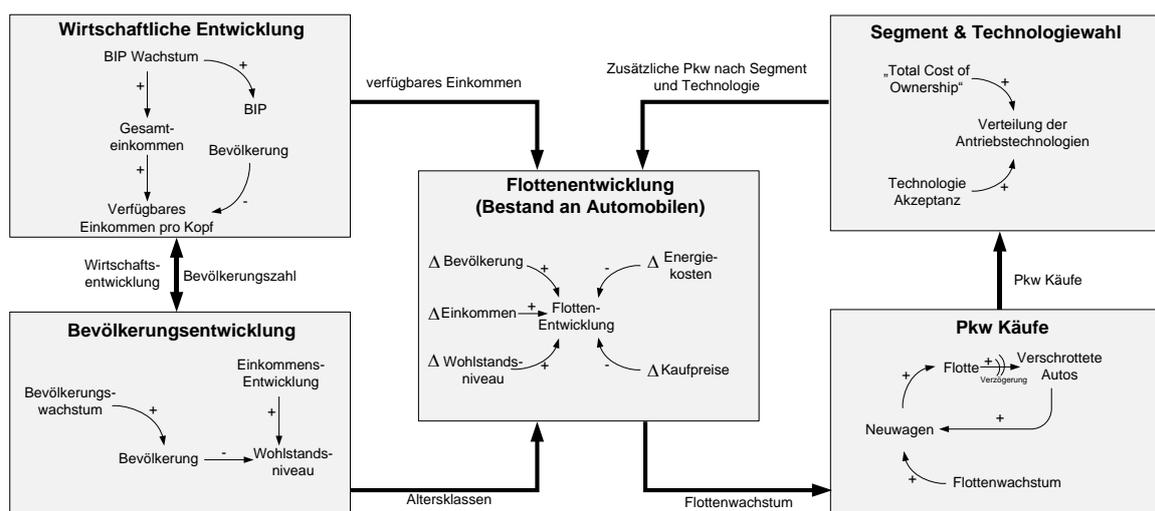


Abbildung 22: Struktur und Zusammenhänge im globalen Flottenmodell GloMo.

In diesem Modell wird zunächst basierend auf exogenen Prognosen zur Wirtschafts- und Bevölkerungsentwicklung, die Entwicklung der gesamten Pkw Zahl in den entsprechenden Wirtschaftsregionen modelliert. Unter Berücksichtigung der Verschrottung von Altfahrzeugen und der jährlichen Flottenentwicklung wird auf die zusätzlichen Pkw-Käufe geschlossen. Erst dann findet basierend auf Annahmen zu den Lebenszykluskosten der einzelnen Technologien (unter Berücksichtigung des Ölpreises) und politischen Förderprogrammen eine Zuordnung zu den jeweiligen Technologien statt.

¹Die drei größten Wirtschaftsräume Nordamerika (USA+Kanada), EU, sowie das industrialisierte Ostasien (Japan, Taiwan, Südkorea, Hongkong, Singapur)

²Brasilien, Russland, Indien, China, Südafrika

Die beiden zentralen Szenarien, die jeweils von einer schwachen Entwicklung alternativer Antriebe (Szenario 1), bei der nur Hybridfahrzeuge eine signifikante Marktdurchdringung erreichen und die übrigen Technologien (insbesondere reine Batterie-elektrischen Fahrzeuge) nur ein Nischensegment bleiben und einer starken Diffusion der Elektromobilität ausgehen (Szenario 2) bei der auch Batterie-elektrische Fahrzeuge und Plug-in-Hybride erhebliche Marktanteile erreichen, sind in Abbildung 23 dargestellt.

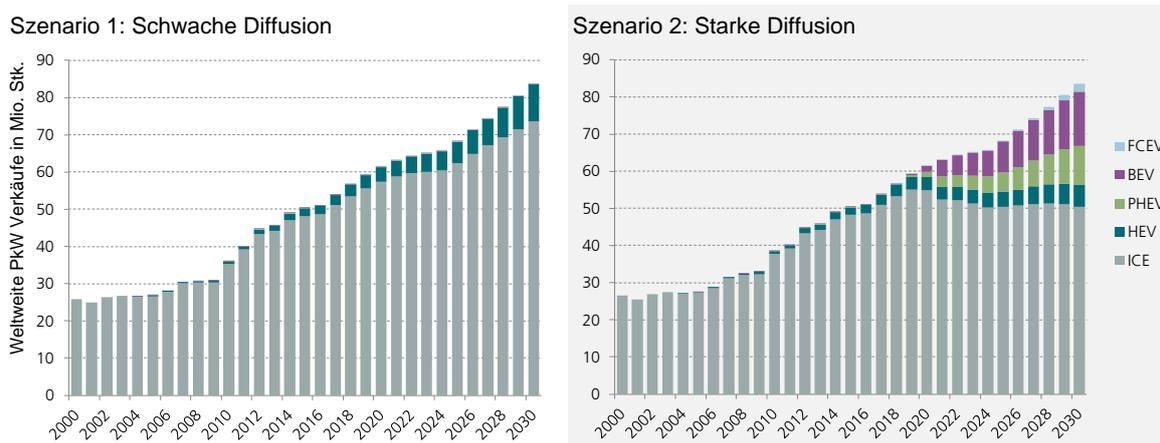


Abbildung 23: Für die folgenden Betrachtungen werden zwei Szenarien zur Entwicklung alternativer Antriebe im Pkw Markt verwendet, die als Extreme zu verstehen sind (vergl. Schade et al., 2012). Szenario 1: Schwache Diffusion, lediglich Hybridfahrzeuge setzen sich nennenswert am Markt durch. Szenario 2: Starke Diffusion, durch systematische Förderung etabliert sich die Elektromobilität insbesondere in urbanen Ballungszentren.

In beiden Fällen bleibt, wie zuvor beschrieben die Zahl der Pkw Käufe insgesamt identisch, lediglich die Antriebstechnologien unterscheiden sich. Die im Flottenmodell unterschiedenen Technologien sind in Abbildung 24 dargestellt.

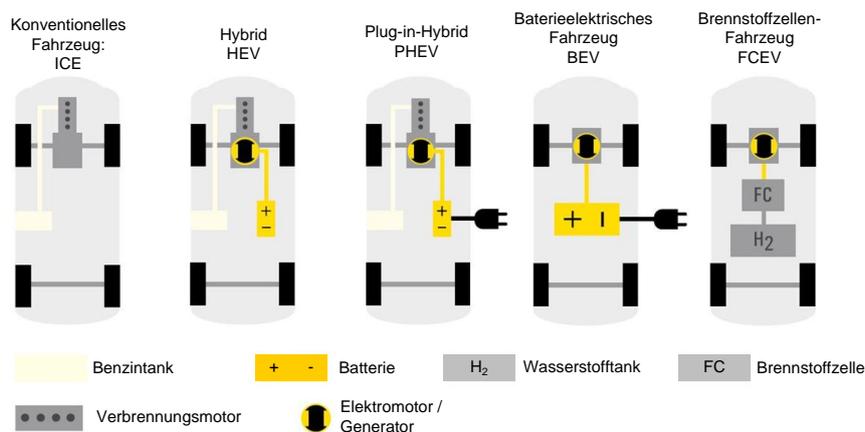


Abbildung 24: Antriebskonzepte für Pkw in der Form, wie sie in GloMo unterschieden werden (vergl. auch Abbildung 23).

4.1.2 Prinzip der Kopplung des Flottenmodells mit den Stoffstrommodellen

Durch Kopplung des Flottenmodells mit den Stoffstrommodellen von Neodym und Dysprosium lassen sich die Auswirkung der in Abbildung 23 dargestellten Szenarien zur Diffusion alternativer Antriebe auf die Rohstoffnachfrage und die Anpassungsreaktionen des Marktes auf potenzielle Rohstoffengpässe modellieren.

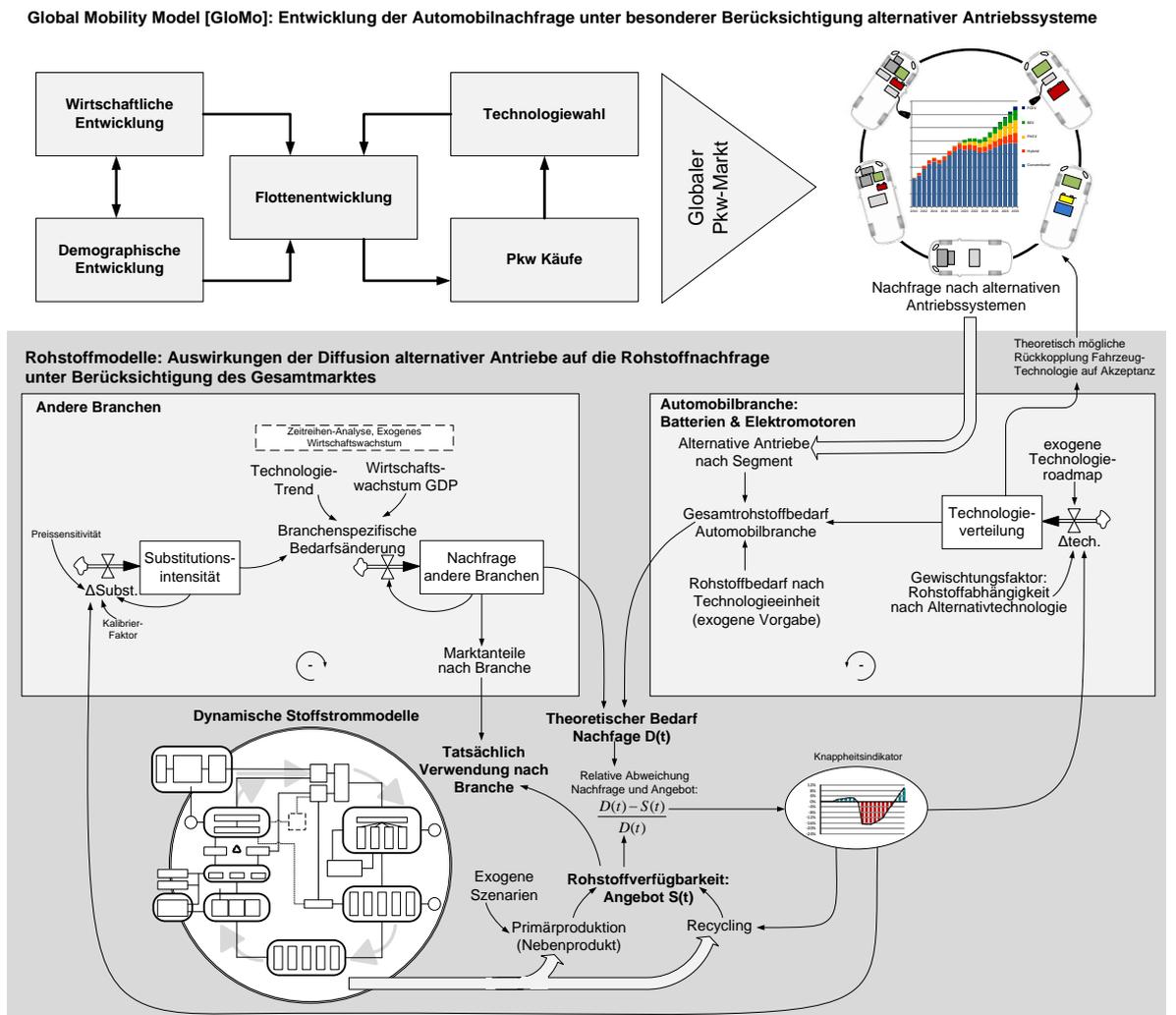


Abbildung 25: Prinzip der Kopplung des Flottenmodells mit den Stoffstrommodellen unter Berücksichtigung von Anpassungsmechanismen.

Während sich die Primärproduktion eines klassischen Industriemetalls an die steigende Nachfrage in Form zusätzlicher Investitionen in die Rohstoffförderung anpasst, werden Neodym und Dysprosium ausschließlich als Neben- und Kuppelprodukte im Verbund mit anderen Metallen gewonnen, was die Anpassungsfähigkeit der Produktionsmengen stark einschränkt. Folglich ist eine unmittelbare Anpassung der Primärproduktion an eine steigende Nachfrage unrealistisch, da Neodym und Dysprosium

nur im Verbund mit anderen Seltenen Erden gewonnen werden, deren Nachfrage bei der Investitionsentscheidung in neue Bergbauaktivitäten ebenfalls eine große Rolle spielt. So sind bei einer Verknappung durch eine stark ansteigende Nachfrage verstärkt Anpassungseffekte in Form von Substitution zu erwarten. Dabei sind vor allem funktionale Substitutionseffekte (vergl. Definitionen in Abschnitt 2.3) zu erwarten, d.h. es wird Rohstoff durch die verstärkte Verwendung von alternativen Technologien eingespart, die weniger, bzw. keine der betrachteten Metalle benötigen. Die technischen Hintergründe hierzu werden in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

Die Anpassungsmechanismen der Nachfrage, ausgehend von einem Knappheitsindikator, der sich aus der Differenz des Rohstoffangebots (primär- und sekundär) und der Nachfrage in den unterschiedlichen Anwendungsbereichen ergibt, sind in Abbildung 25 dargestellt. Im Modell werden den verschiedenen Anwendungsbereichen Substitutionsfähigkeiten in Form relativer Gewichtungsfaktoren zugeordnet. Kommt es auf Grund von starkem Rohstoffbedarf seitens alternativer Antriebstechnologien für Pkw zu einer Verknappung, wirken die negativen Rückkopplungsschleifen auf die Nachfrage in den jeweiligen Anwendungsbereichen. Insgesamt bleibt aber zu beachten, dass mit Hilfe des Modells lediglich qualitative Zusammenhänge quantifiziert werden und die Intensität der Anpassungseffekte durch die externen Gewichtungsfaktoren vorgegeben werden, die im Vergleich zu dynamischen Modellen im Bereich chemisch/physikalischer Systeme nicht durch entsprechende Versuche überprüft werden können. Folglich sind die Modelle, wie einleitend bereits erwähnt, eher als Werkzeug zur Darstellung grundsätzlicher Anpassungsmechanismen und zur Entwicklung realitätsnaher Szenarien zu verstehen und nicht als Modell allgemein gültiger Zusammenhänge wie sie im naturwissenschaftlich/technischen Bereich zu finden sind.

4.1.3 Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe für Traktionsmotoren

Neben dem Speichersystem der elektrischen Energie und der Leistungssteuerung bildet der Elektromotor das zentrale technische Element der Elektromobilität. Da insbesondere bei mobilen Anwendungen die Leistungsdichte, d.h. eine möglichst hohe Motorleistung bei geringem Gewicht und Volumen, eine entscheidende Rolle spielt, sind in diesem Bereich Synchronmotoren mit Permanentmagneten zur Optimierung der Energieeffizienz und der Fahrzeugreichweite besonders entscheidend. Daher hängt die Diffusion alternativer Antriebskonzepte im Automobilbereich auch von der Verfügbarkeit von Neodym und insbesondere von Dysprosium als Magnetwerkstoffe ab. Während Neodym als dritthäufigstes Seltenerd-Element (vergl. Abbildung 2) auf Grund der kontinuierlich steigenden Nachfrage nach NdFeB-Magneten in Zukunft als der Wachstumstreiber der Seltenerd-Förderung gilt (Alonso et al., 2012) und auch außerhalb Chinas in größeren Mengen gefördert wird (vergl. Abbildung 4), beschränkt sich die Gewinnung von Dysprosium als Teil der schweren Seltenen Erden nahezu vollständig auf China (vergl. Abbildung 5). Da zahlreiche Lagerstätten Seltener Erden auf Monazit- und Bastnäsit-Erzen basieren, die nur geringe Teile schwerer Seltener Erden enthalten, wird die Versorgungssituation mit schweren Seltenen Erden als besonders kritisch eingestuft, was sich auch in der aktuellen Studie

der EU zu kritischen Rohstoffen widerspiegelt (vergl. European Commission, 2014). Da Dysprosium für die Sicherung der Temperaturbeständigkeit und den Schutz vor Entmagnetisierung durch externe Magnetfelder unerlässlicher Bestandteil der für die Elektromobilität benötigten NdFeB-Magnete ist (vergl. hierzu Abschnitt 1.1.1), gleichzeitig aber nur in beschränkter Menge zur Verfügung steht, gilt Dysprosium als besonders kritischer Rohstoff für die Elektromobilität. Daher werden in der folgenden Analyse verschiedene Szenarien hinsichtlich der Nachfrageentwicklung nach Dysprosium untersucht. Insgesamt wird bei dieser Analyse davon ausgegangen, dass sich die Primärproduktion des Kuppelprodukts Dysprosium, das nur einen Bruchteil des Produktionsspektrums Seltener Erden ausmacht, nicht unmittelbar an eine steigende Nachfrage anpassen wird, solange keine klare Bedarfssteigerung der übrigen Elemente zu verzeichnen ist. Daher ist eher zu vermuten, dass sich die Nachfrage an die veränderte Verfügbarkeit anpasst und Bereiche, in denen substituiert werden kann (stofflich, materiell oder funktional), systematisch aus dem Markt gedrängt werden. Die Rückkopplungseffekte innerhalb des System Dynamics Modells ermöglichen eine Untersuchung der Auswirkung potenzieller Versorgungsengpässe auf die Marktanteile der verschiedenen Anwendungsbereiche. Dabei werden verschiedene Substitutionspotenziale, aber auch die Auswirkungen zu erwartender Effizienzsteigerungen bezüglich der benötigten Dysprosium-Menge untersucht und verglichen.

Substitution, Effizienz und Recycling von Neodym und Dysprosium als Magnetmaterialien

Zur Reduzierung des Bedarfs an Neodym und insbesondere an Dysprosium kommen sowohl Maßnahmen zur Effizienzsteigerung, also auch verschiedene Substitutionspotenziale in Betracht. Diese sind allerdings vom jeweiligen Anwendungsbereich abhängig und werden nachfolgend näher betrachtet. Weiterhin findet zwar bisher kein Recycling von NdFeB-Magneten statt, was auch auf die Menge an Kleinstmotoren aus dem Elektronikbereich im heutigen Schrottaufkommen zurückzuführen ist (vergl. Abschnitt 3), dennoch ist davon auszugehen, dass in Zukunft insbesondere bei größeren Magneten in Industriemotoren, Traktionsmotoren und Windgeneratoren ein Recycling der Magnetlegierungen, bzw. eine Rückgewinnung von Neodym und Dysprosium erfolgt. Sowohl Verfahren zur Reduzierung der Dysprosium-Mengen in NdFeB-Magneten bei gleichbleibender Temperaturbeständigkeit (Wehrspan, 2014) als auch Recyclingverfahren für NdFeB-Magnete (Bast et al., 2014; Elwert und Goldmann, 2014) werden derzeit entwickelt und erprobt.

Steigerung der Rohstoffeffizienz

Während die Magnetstärke von NdFeB-Magneten bereits nahe am technischen Limit ist und daher nur noch geringfügiges Verbesserungspotenzial erwartet wird (Westphal und Kuchta, 2013), wird derzeit vor allem versucht, die Menge an benötigtem Dysprosium bei gleichbleibenden Magneteigenschaften zu reduzieren, d.h. Magnete mit vergleichbarer Koerzitivfeldstärke, aber weniger Dysprosiumgehalt herzustellen. Verschiedene Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten werden derzeit unternommen,

um eine Leistungssteigerung der Magnete bei gleichzeitiger Reduktion des Dysprosiumanteils zu erreichen (Schüler et al., 2011, S.97 ff.). Das Fraunhofer-Leitprojekt zur "Kritikalität Seltener Erden" untersucht Möglichkeiten, den benötigten Anteil an Dysprosium weiter zu reduzieren (Wehrspohn, 2014). Dabei sind die folgenden Ansätze vielversprechend:

- **Net-Shape-Production:** Mit diesem Metallpulverspritzguss-Verfahren können die Magnete direkt in ihrer finalen Form angefertigt werden. Eine Nachbearbeitung durch Abnehmen überschüssigen Materials entfällt und entsprechend viel Magnetwerkstoff kann eingespart werden. Dieses Verfahren bezieht sich auf die Reduzierung von Produktionsrückständen durch die direkte endformnahe Magnetfertigung.
- **Dysprosium-Layer-Technology:** Durch gezielte Aufkonzentration des Dysprosiums an den Korngrenzen sind im Rest des Magnetmaterials geringe Konzentrationen ausreichend. Durch dieses Verfahren zum lokalen Einbringen von Dy in den Korngrenzenbereich lassen sich bis zu 20% Dysprosium bei gleichbleibenden Magneteigenschaften einsparen.
- **Grain-Size-Tuning Technology:** Durch die Kornfeinung lässt sich zunächst die Koerzitivfeldstärke optimieren. Über spezielle Press- und Sinterverfahren können nanoskalige Materialgefüge mit reduziertem Dysprosiumgehalt (bis zu 50%) bei konstanten Magneteigenschaften hergestellt werden.

Eine weitere Reduzierung von Dysprosium im Magnetmaterial kann durch eine optimierte Auslegung des Elektromotors erreicht werden. Effizientere Kühlung und verbesserte Auslegung reduzieren die Betriebstemperatur, die den Einsatz von Dysprosium erst notwendig macht. Entsprechende Effizienzsteigerungen hinsichtlich der benötigten Dysprosiummengen werden in den verschiedenen Szenarien berücksichtigt (vergl. Abschnitt 4.1.3). Während diese Ansätze eher in den Bereich der Effizienzsteigerung, d.h. gleichbleibende Materialeigenschaften bei niedrigerem Ressourcenverbrauch fallen, werden nachfolgend die verschiedenen Möglichkeiten der Substitution betrachtet.

Substitution

Wie in Abschnitt 2.3 bereits erläutert, ist bezüglich der Substitution von Rohstoffen zwischen der stofflichen Substitution (ein Element ersetzt ein anderes), der Material-Substitution (eine neues Materialsystem mit ähnlichen Eigenschaften wird verwendet) und der funktionalen Substitution (eine alternative Technologie identischer Funktion wird verwendet) zu unterscheiden (vergl. z.B. auch Ziemann und Schebek, 2010). Für die Substitution von NdFeB-Magneten und damit von Neodym und Dysprosium erscheint die funktionale Substitution durch Verwendung von alternativen Motor- und Generatorkonzepten in den meisten Bereichen als die aussichtsreichste Substitutionsform, obwohl dadurch gewisse Effizienzeinbußen unvermeidbar werden. Zwar kann Neodym durch Praseodym ergänzt werden (meist als "Didymium" im Verhältnis 5:1, vergl. Abschnitt 1.1.1) und Dysprosium theoretisch durch Terbium

ersetzt werden (vergl. z.B. Schüler et al., 2011, S.97), die Substitution von Seltenerd-Elementen untereinander löst allerdings die Rohstoffproblematik nicht. Auch die Materialsubstitution ist nach wie vor problematisch, da alternative Magnetwerkstoffe wie Ferrite oder AlNiCo-Magnete weitaus niedrigere Magnetstärken aufweisen und SmCo-Magnete mit Samarium ein Seltenerd-Element benötigen, das nur in sehr geringen Mengen zur Verfügung steht (siehe Abbildung 2), also keine Massentauglichkeit besitzt. Es wird derzeit intensiv an neuen Magnetwerkstoffen geforscht, die ähnliche Energiedichten wie NdFeB-Magnete aufweisen, welche Erfolge hierbei erzielt werden, bleibt allerdings abzuwarten.

So bleibt lediglich die funktionale Substitution von NdFeB-Magneten durch die Verwendung alternativer Motor- und Generatorkonzepte. Es könnten z.B. in der Elektromobilität anstatt PM-Synchron-Motoren die in Abbildung 26 beschriebenen Käfigläufer-Asynchron-Motoren eingesetzt werden (Westphal und Kuchta, 2013), oder unter Umständen auch Reluktanzmotoren, die allerdings sowohl bezüglich der Effizienz als auch hinsichtlich der Steuerung und Geräuschbildung einige Nachteile aufweisen (Bradshaw et al., 2013). Als Ersatz für PM-Synchron-Servomotoren in niedrigen Leistungsbereichen bis 10 kW, die das wichtigste Anwendungsgebiet von NdFeB-Magneten im Maschinenbau darstellen (Pumpensysteme, Aufzugmotoren, Waschmaschinen etc.), können ebenfalls Induktionsmotoren (Asynchronmotoren, oder Synchronmotoren mit Elektromagnet, vergl. Abbildung 26 d) verwendet werden, was zwar ebenfalls die Energieeffizienz und die Kompaktheit der Motoren beeinflusst, grundsätzlich aber in vielen Bereichen problemlos möglich sein sollte (vergl. z.B. Buchert et al., 2013, S.93). Während die verschiedenen Alternativtechnologien für Windkraftanlagen bereits in Abschnitt 1.1.1 (Abbildung 9) aufgezeigt und erläutert wurden, zeigt Abbildung 26 verschiedene Alternativen für die Umsetzung von Elektromotoren. Diese werden nachfolgend näher beschrieben.

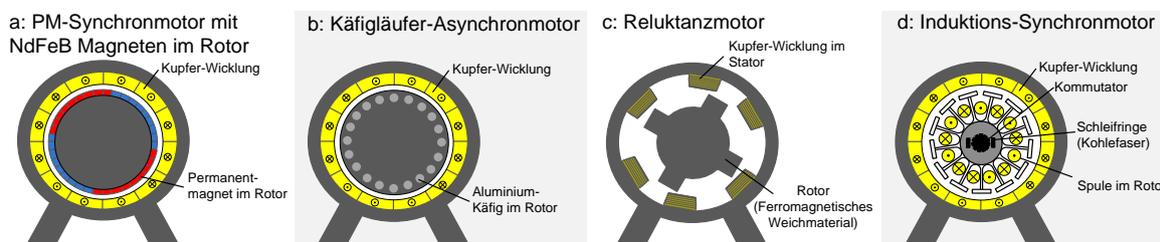


Abbildung 26: Gängige Konzepte für Elektromotoren. Eigene Darstellungen nach (Bradshaw et al., 2013; Chau und Li Wenlong, 2014)

Der bürstenlose permanentmagnetisch erregte Synchronmotor ist auf Grund der hohen Leistungsdichte, der volumeneffizienten Bauweise und des hohen Wirkungsgrades in Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb die sinnvollste Motorlösung (Abbildung 26 a). Dieses Motorkonzept setzt aber die Verwendung von Hochleistungsmagneten voraus und kann durch einfache Ferrit-Magnete nicht realisiert werden³. Durch die Anordnung der Permanentmagnete im Rotor sind keine Schleifringe zur

³Vor der Entwicklung von Neodym-Magneten wurden die Spulen des Elektromagneten in elektrischen Maschinen im Rotor verbaut, der sich innerhalb eines Stators aus Permanentmagneten (im Allgemeinen Ferrite) drehte. Die Stromzufuhr zu den Spulen erfolgt dabei über Kohlebürsten (oder Schleifringe), die jedoch zu erheblichem Verschleiß führen und der

Übertragung des Stroms notwendig. Auch kann die Wärme auf Grund von elektrischen Widerständen, die hauptsächlich im Elektromagneten auftreten, wesentlich einfacher abgeleitet werden. Weitere Vorteile sind geringere Trägheit und eine hohe magnetische Flussdichte im Luftspalt (Gieras, 2010, S.2). Wenn der Elektromotor beim Bremsen als Generator arbeitet induziert der Permanentmagnet im Stator eine Spannung. Der so erzeugte Strom kann wieder in der Batterie gespeichert werden (Rekuperationsprinzip in Hybridfahrzeugen, vergl. Angerer et al., 2009, S.10 f.).

Insgesamt hat die Verwendung von Permanentmagneten gegenüber elektromagnetischer Erregung mehrere Vorteile, die nachfolgend zusammengefasst werden (Bradshaw et al., 2013; Chau und Li Wenlong, 2014; Gieras, 2010; Gutfleisch et al., 2011, S.25 ff.):

- Es wird keine elektrische Energie zur Erregung des Magnetfeldes im Rotor benötigt, was in elektrischen Maschinen zu einem höheren Wirkungsgrad führt
- Die Leistungsdichte und/oder die Drehmomentdichte der Elektromotoren ist höher (bis zu 30 % geringeres Gewicht und Volumen)
- Besseres dynamisches Verhalten der Servomotoren (einfachere Drehzahlsteuerung)
- Einfachere Bauweise und Wartung

Weiterhin ermöglicht die Elektromobilität im Vergleich zu konventionellen Verbrennungsmotoren völlig neue Konzepte für den Antriebsstrang, die sich derzeit noch in der Entwicklungsphase befinden. So können z.B. Radnabenmotoren direkt in die Pkw-Räder verbaut werden, wodurch auf verschiedene Bauteile wie z.B. das Getriebe, das Achsdifferenzial, oder die Kardanwelle (zur Kraftübertragung auf die Achsen) verzichtet werden kann. Entsprechend entfallen auch die verschiedenen Übersetzungen mit ihren Reibungsverlusten (Wallentowitz und Freialdenhoven, 2011, S.164). Da bei Radnabenmotoren auf Grund des begrenzten Raums auf eine besonders kompakte Bauweise zu achten ist, kommen hier die Vorteile des PM-Synchronmotors voll zum Tragen.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass sowohl für Hybrid- als auch für reine batterieelektrische Fahrzeuge vorwiegend auf PM-Synchronmotoren zurückgegriffen werden wird. Zwar existieren bereits einzelne Elektrofahrzeuge mit Käfigläufer-Asynchronmotor, diese wurden aber in erster Linie zur Hochphase der Versorgungskrise mit Seltenen Erden Anfang 2011 entwickelt. Langfristig ist davon auszugehen, dass die Automobilindustrie hauptsächlich auf die aus verschiedenen Gründen vorteilhaften PM-Synchronmotoren zurückgreifen wird⁴. Weiterhin existieren inzwischen Hybrid-Synchronmotoren, bei denen das Magnetfeld im Rotor bei Bedarf elektrisch verstärkt werden kann, wodurch die Masse

Hauptgrund für Wartungsarbeiten sind. Mit der Einführung der Neodym-Magnete in den neunziger Jahren konnte das Konzept umgekehrt und die Leistung der elektrischen Maschine deutlich erhöht werden. Der Permanentmagnet wurde im Rotor und die elektrisch erregten Spulen im Stator angebracht. Somit sind keine Kohlebürsten zur Stromübertragung in den Rotor mehr notwendig (Angerer et al., 2009, S.10 f.)

⁴Diese Aussage wurde von Mitarbeitern der VW Konzerns sowie von führenden Motorherstellern und Automobilzulieferern bestätigt.

des Permanentmagneten bei gleich bleibender Leistung reduziert werden kann (Chau und Li Wenlong, 2014). Ob sich derartige Konzepte allerdings durchsetzen bleibt abzuwarten.

Mit doppelgespeisten Asynchrongeneratoren und fremderregten Ringgeneratoren (vergl. Abbildung 9) gibt es Alternativen zu Permanentmagnetgeneratoren im Bereich der Windkraftanlagen und insbesondere europäische Hersteller verwenden direktangetriebene PM-Generatoren inzwischen nahezu ausschließlich im Offshore-Bereich sowie Listen aktueller Windturbinen verschiedener Hersteller im Anhang). Eine weitere Alternative zum Direktantrieb mit Permanentmagnet im Bereich der Windenergie, die derzeit in der Entwicklungsphase steckt, basiert auf keramischen Supraleitern (High Temperature Superconductor HTS). Dabei werden allerdings andere Seltene Erden, wie z.B. Yttrium, Lanthan und Cer, verwendet. Die Entwicklung und der Einsatz von HTS können heute noch nicht abgeschätzt werden (Buchert, 2011), eine Marktreife wird allerdings frühestens ab dem Jahr 2025 erwartet (Habib und Wenzel, 2014; Hoenderdaal et al., 2013). Magnete in Festplatten können zukünftig durch Solid State Drives (SSD) abgelöst werden, die keine beweglichen Teile und damit auch keine Magnete besitzen.

Recycling

Wie in Abschnitt 3 gezeigt, war das Schrottaufkommen von NdFeB-Magneten bisher hauptsächlich von den Elektronik- und Audio-Anwendungen (Kopfhörer, Lautsprecher etc.) geprägt. Derzeit werden z.B. Permanentmagnete aus kleinen Elektronikgeräten weder erfasst noch recycelt, da sie zwar massenhaft, aber pro Gerät immer nur in geringen Mengen eingesetzt werden. Eine manuelle Entnahme ist aufwendig und kaum wirtschaftlich und eine mechanische Aufbereitung birgt technische Schwierigkeiten, da eine Trennung der Magnetwerkstoffe von der Stahl- und Eisenfraktion mit erheblichem Aufwand verbunden ist (Westphal und Kuchta, 2013). So gelangen die Magnete bisher meist ins Stahlrecycling, wo die Seltenen Erden entweder in der Schlacke landen, oder im Stahlkreislauf bleiben (Buchert et al., 2009). Auf Grund des steigenden Schrottaufkommens größerer Magnete aus verschiedenen Produkten des Maschinenbaus (z.B. Waschmaschine, Pumpen, Klimaanlage) aber vor allem bei Traktionsmotoren von Hybrid- oder Elektroautos sowie PM-Generatoren aus Windanlagen ist davon auszugehen, dass im Laufe der kommenden Jahre Recyclingverfahren für größere NdFeB-Magnete etabliert werden (vergl. insbesondere Bast et al., 2014). Der hohe Anteil an Dysprosium in diesen Magneten wirkt sich auf Grund des höheren Wertes (vergl. Abbildung 6) ebenfalls positiv auf die Wirtschaftlichkeit des Recyclings aus. Dennoch beschränkt sich derzeit das Recycling von NdFeB-Magneten ausschließlich auf Produktionsrückstände wie Schleifschlämme, die bei der Herstellung und Verarbeitung anfallen (Elwert und Goldmann, 2014). Diese Mengen, die bis zu 30 % des ursprünglich eingesetzten Materials ausmachen, werden wiedergewonnen und in den Produktionsprozess zurückgeführt (Du und Graedel, 2011).

Magnetbedarf für alternative Antriebe

Für die Stoffstromanalyse in Abschnitt 1.1.1 wurden bereits verschiedene Quellen zur Größe von NdFeB-Magneten in Traktionsmotoren von Hybrid- und Elektrofahrzeugen ausgewertet. Diese schwanken in Bereichen zwischen ca. 1 und 3 kg (vergl. Tabelle 2). zwar besteht kein linearer Zusammenhang zwischen der Motorleistung und der benötigten Magnetmasse, und die Menge an verwendetem Magnetmaterial hängt von weiteren Faktoren wie der Anordnung der Magneteile im Rotor ab (Campbell, 2008), dennoch kann davon ausgegangen werden, dass Leistungsstärkere Motoren auch mehr Magnetmaterial benötigen (vergl. Abbildung 27a). Auf Basis der Leistungskennzahlen einzelner Fahrzeuge aus den jeweiligen Segmenten wurden für das Modell die in Abbildung 27b gezeigten Magnetgrößen pro Traktionsmotor angenommen.

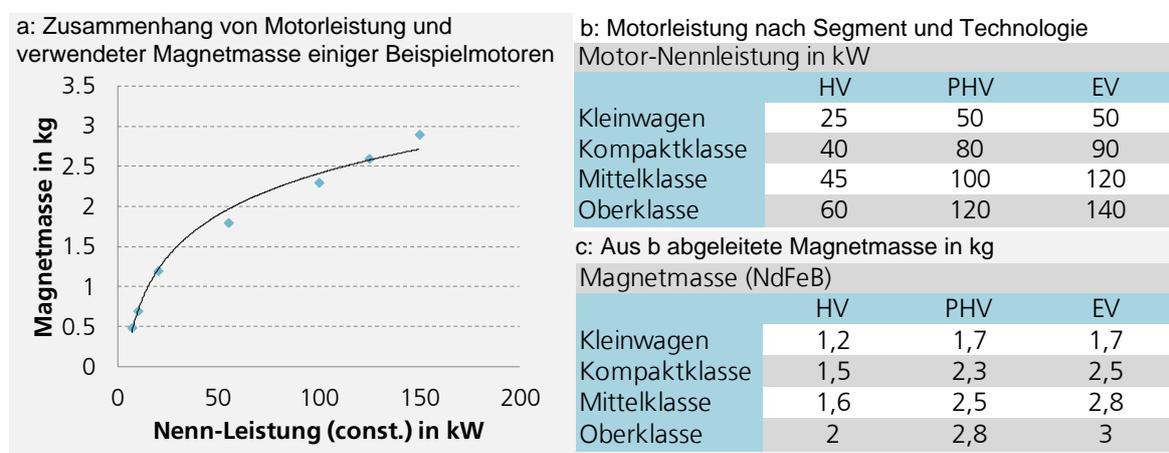


Abbildung 27: Zusammenhang zwischen Motorleistung und Magnetgröße (siehe auch Tabelle 2) sowie Magnetgrößen nach Fahrzeugsegment und Antriebstechnologie.

a: Zusammenhang Magnetmasse und Motorleistung (vergl. insbesondere Hofmann et al., 2013, Anhang Seite 55 ff.).

b: Motorleistung nach Antriebstechnologie und Fahrzeugsegment (vergl. ADAC Fahrzeugtechnik, 2013).

c: Aus a und b abgeleitete Magnetmasse nach Fahrzeugsegment.

Auf Basis dieser Materialmengen wurden die nachfolgend vorgestellten Modellergebnisse generiert. Dabei ist allerdings zu beachten, dass bezüglich der benötigten Menge an Dysprosium pro Magnet von einer zusätzlichen Effizienzsteigerung ausgegangen wurde.

Auswirkungen der Diffusion alternativer Antriebe auf die Nachfrage nach Neodym und Dysprosium

Die ausreichende Versorgung mit den jeweils benötigten Rohstoffen ist Grundvoraussetzung für die Marktfähigkeit einer neuen Technologie. Während in der Vergangenheit in erster Linie technische und

wirtschaftliche Aspekte über die Zukunftsfähigkeit einer neuen Technologie entschieden, rücken durch die kontinuierlich zunehmende Diversität industriell verarbeiteter Rohstoffe, aber auch auf Grund der zunehmenden Konkurrenz um den Rohstoffzugang, häufiger Aspekte der Rohstoffversorgung und Verfügbarkeit in den Vordergrund. Bei einer rohstoffspezifischen Betrachtung technologischer Entwicklungen ist allerdings die Berücksichtigung potenzieller Substitute auf stofflicher, materieller und funktionaler Ebene notwendig. Wie in Abschnitt 1.1.1 gezeigt, ist die Beimischung von Dysprosium vor allem im Bereich der Elektromobilität, der Windkraft und in einigen Industriemotoren essentiell. In allen Bereichen existieren, wie in Abschnitt 4.1.3 erläutert, Alternativen zur Verwendung von NdFeB-Magneten. Diese funktionalen Substitut-Technologien haben aber jeweils Nachteile, die es abzuwägen gilt.

So ist z.B., wie zuvor erläutert, die Verbreitung von Windkraftanlagen nicht unmittelbar von der Verfügbarkeit der Magnetwerkstoffe Neodym und Dysprosium abhängig. Vielmehr würden bei einer Verknappung, wie es derzeit bereits der Fall ist, verstärkt doppeltgespeiste Asynchrongeneratoren, oder Induktions-Synchrongeneratoren eingesetzt werden (vergl. Abbildung 9), die ohne Permanentmagnete auskommen. Die neuste Generation an Offshore-Anlagen mit PM-Direktantrieb, wäre allerdings stark von einem Versorgungsengpass betroffen.

Bei Industrie-Servomotoren ist die Frage der potenziellen Verwendung der etwas weniger energieeffizienten und größeren Asynchronmotoren oder des Einsatzes von alternativen Permanentmagneten, wie z.B. Ferrite, sehr anwendungsabhängig. Insgesamt ist allerdings auch hier von einem gewissen Substitutionspotenzial auszugehen: So wurden z.B. für kleine Elektromotoren in Automobilen im Zuge der Hochpreisphase Seltener Erden nach 2011 wieder verstärkt Ferrite für Kleinmotoren, wie sie z.B. für Scheibenwischer verwendet werden, eingesetzt, was vor der Verbreitung von NdFeB-Magneten dem Standard entsprach⁵. Zwar sind derartige Substitutionen nicht innerhalb kürzester Zeit umsetzbar, d.h. eine abrupte Unterbrechung der Rohstoff-Versorgung würde auch hier große Probleme schaffen (was der enorme Preisanstieg 2010 und 2011 zeigt), eine kontinuierliche Substitution auf Grund der steigenden Nachfrage seitens anderer Technologien (bei begrenzter Anpassung des Rohstoffangebots) wäre hier allerdings möglich. Dennoch überwiegen die Vorteile der PM-Synchronmaschinen auf Grund der höheren Energieeffizienz und der kompakteren Bauweise.

Tendenziell ist davon auszugehen, dass der PM-Synchronmotor im Bereich der Elektromobilität auf Grund der Volumen- und Gewichtseffizienten Bauweise im Vergleich zu den anderen Anwendungsbereichen am entscheidendsten ist.

Insgesamt kann folglich davon ausgegangen werden, dass die Nachfrage nach NdFeB-Magneten für energieeffiziente, kompakte und wartungsarme Generatoren und Elektromotoren hoch bleiben wird. Eine verstärkte Diffusion der Elektromobilität könnte zu gewissen Engpässen und entsprechenden Anpassungsreaktionen führen, was mit dem hier vorgestellten Modell (vergl. Abbildung 25) in verschiedenen Szenarien sinnvoll abgebildet werden kann.

⁵Diese Aussage geht auf Mitarbeiter führender Automobilzulieferer zurück.

Da, wie zuvor erläutert, Dysprosium als schwere Seltene Erde hinsichtlich der Permanentmagnete für Traktionsmotoren den kritischsten Rohstoff darstellt, konzentriert sich die nachfolgende erweiterte Szenarioanalyse auf Dysprosium. Grundsätzlich ist für die zukünftige Entwicklung der Seltenerd-Förderung davon auszugehen, dass Bergbauprojekte mit einem hohen Anteil an schweren Seltenen Erden auf Grund des weit höheren Preisniveaus der Produktpalette einen entscheidenden Vorteil hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit haben, obwohl bei der Wirtschaftlichkeitsbewertung natürlich noch zahlreiche weitere Faktoren Einfluss haben, wie z.B. die Konzentration der Minerale oder der Anteil an radioaktiven Nebenprodukten (insbesondere Thorium), die aufwendig und kostenintensiv entfernt werden müssen (vergl. z.B. Kingsnorth, 2014). Für das Dysprosium-Angebot bedeutet dies, dass, wie in Abbildung 11 bereits aufgezeigt, der Anteil an der gesamten Seltenerd-Förderung tendenziell steigen wird. Folglich bedeuten die in Abbildung 28 aufgezeigten Angebotsszenarien zur Entwicklung der Dysprosium-Verfügbarkeit nicht zwingend, dass die gesamte Seltenerd-Förderung im selben Maße wächst. Die Angebotsszenarien basieren auf einer jeweils linearen und polynomischen Fortschreibung der historischen Entwicklung.

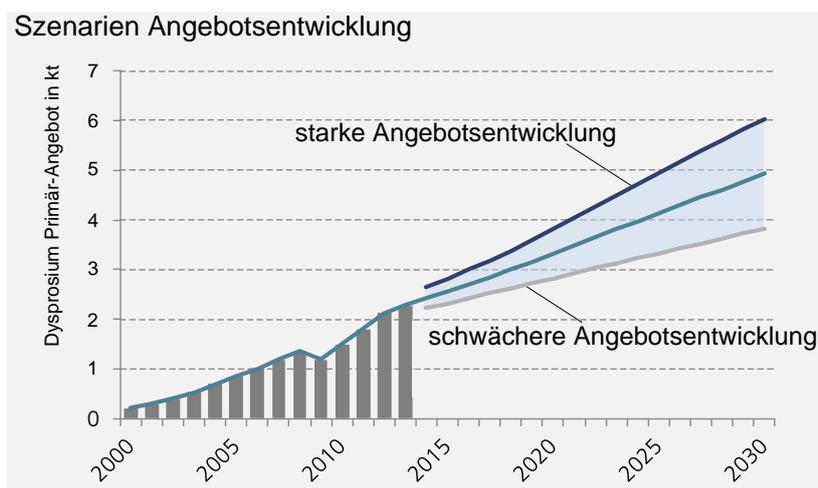


Abbildung 28: Angebotsszenarien zur zukünftigen Verfügbarkeit von Dysprosium als Kuppelprodukt der gesamten Seltenerd-Förderung. Die Szenarien basieren jeweils auf einer linearen und einer polynomischen Trendfortschreibung.

Inwiefern es zu Knappheiten bei den in Abbildung 28 gezeigten Angebotsszenarien auf Grund der durch die Diffusion alternativer Antriebe getriebenen Nachfrageentwicklung (vergl. Szenarien in Abbildung 23) kommen kann, und wie entsprechende Anpassungsmechanismen am Markt aussehen könnten, wird an Hand der Simulationsergebnisse nachfolgend aufgezeigt. Dabei werden die beiden Angebotsszenarien mit den beiden Szenarien zur Entwicklung alternativer Antriebe kombiniert. Insgesamt sind diese Modellergebnisse nicht als Prognose zukünftiger Entwicklungen zu verstehen, sondern sollen einen Überblick über die Modellfunktion und die entsprechenden Anpassungsmechanismen vermitteln. Grundsätzlich ist die Vorausschau auf technologische Entwicklungen mit extremen Fehlerspannen verbunden, Modelle nach dem hier vorgestellten Prinzip können allerdings ein gutes

Verständnis für mögliche Anpassungsmechanismen am Markt vermitteln und so die Bereiche identifizieren, die von einer potenziellen Knappheit am stärksten betroffen wären. In allen betrachteten Szenarien wird von einer moderaten Effizienzsteigerung hinsichtlich des Dysprosiumanteils in den entsprechenden Anwendungsbereichen ausgegangen. Dabei wird der verwendete Dysprosiumanteil im Bereich der Hybrid- und Batteriefahrzeuge bis 2030 auf durchschnittlich 5 % reduziert, der im Bereich Windenergie auf 3 % und die Verwendung von Dysprosium im allgemeinen Maschinenbau-Bereich auf durchschnittlich 2 % (bezogen auf die Magnetmasse, vergl. Abbildung 11 für aktuelle Massenanteile). Für die Recyclingeffizienz von Altmagneten wird davon ausgegangen, dass im Bereich der Windenergie, in Traktionsmotoren von Elektrofahrzeugen sowie bei alten E-Bikes in Zukunft bis zu 90 % der Altmagnete gesammelt werden, bei Industriemotoren bis 50 % und in den anderen Bereichen nur geringe Mengen der Magnetmaterialien zurückgewonnen werden. Die Recyclingeffizienz wird dabei von der aktuellen Knappheitssituation (Knappheitsindikator in Abbildung 25) beeinflusst. Weiterhin besteht, wie zuvor beschrieben, auch im Bereich der Elektromobilität die Möglichkeit Asynchronmaschinen zu verwenden, obwohl diese insbesondere bei Volumen und Gewicht, bzw. Leistungsdichte klare Nachteile aufweisen. Dennoch ist davon auszugehen, dass vor allem bei rein elektrischen Pkw, bzw. Plug-in-Hybriden, diese bereits heute verwendete Technologie im Falle einer Knappheit von Dysprosium verstärkt zum Einsatz kommt.

Zunächst werden die Szenarien einer schwachen Diffusion der Elektromobilität betrachtet, d.h. batterieelektrische Fahrzeuge bleiben ein reines Nischenprodukt und lediglich Hybridantriebe setzen sich in den kommenden Jahren in nennenswertem Umfang am Markt durch (vergl. Abbildung 23 Szenario 1). Wie in den Abbildungen 29 und 30 dargestellt, hat selbst das Szenario einer schwachen Diffusion der Elektromobilität einen erheblichen Einfluss auf die Nachfrage nach Dysprosium.

Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Elektromotoren –bzw. Generatoren– der Hybridantriebe im Vergleich zu den Motoren rein elektrischer Pkw nicht entscheidend kleiner dimensioniert sind (vergl. Abbildung 27), während die Batterien von Hybridfahrzeugen, da sie lediglich der Speicherung der Rekuperationsenergie dienen, um ein Vielfaches kleiner dimensioniert sind als bei batterieelektrischen Fahrzeugen (1-2 kWh im Vergleich zu 20-50 kWh Speicherkapazität). D.h. auch wenn sich nur Hybridfahrzeuge verstärkt im Pkw-Markt durchsetzen, ist ein erheblicher Nachfrage-Impuls hinsichtlich des Bedarfs an NdFeB-Magneten und vor allem an Dysprosium zu erwarten. Wie in Abbildung 29 dargestellt, ist bei einer verhältnismäßig starken Entwicklung des Dysprosiumangebots, z.B. durch die Umsetzung neuer Minenprojekte mit hohem Anteil schwerer Seltener Erden, ein recht ausgeglichener Markt in absehbarer Zukunft zu erwarten, der sich in Richtung eines Angebotsüberschusses wandelt. Bei einer schwächeren Entwicklung des Dysprosiumangebots, was auf Grund des derzeitigen Preisniveaus wahrscheinlicher erscheint, ist, wie Abbildung 29 zeigt, auch im Falle einer reinen Diffusion von Hybridantrieben im Pkw-Bereich in den kommenden Jahren von einem Dysprosiummangel auszugehen, der in den Bereichen der Windenergie, aber vor allem bei PM-Synchronmotoren im allgemeinen Maschinenbau zu den zuvor beschriebenen Substitutionseffekten führt. Diese Anpassungseffekte würden dann allerdings ausreichen, wieder in den Bereich einer Überschusssituation

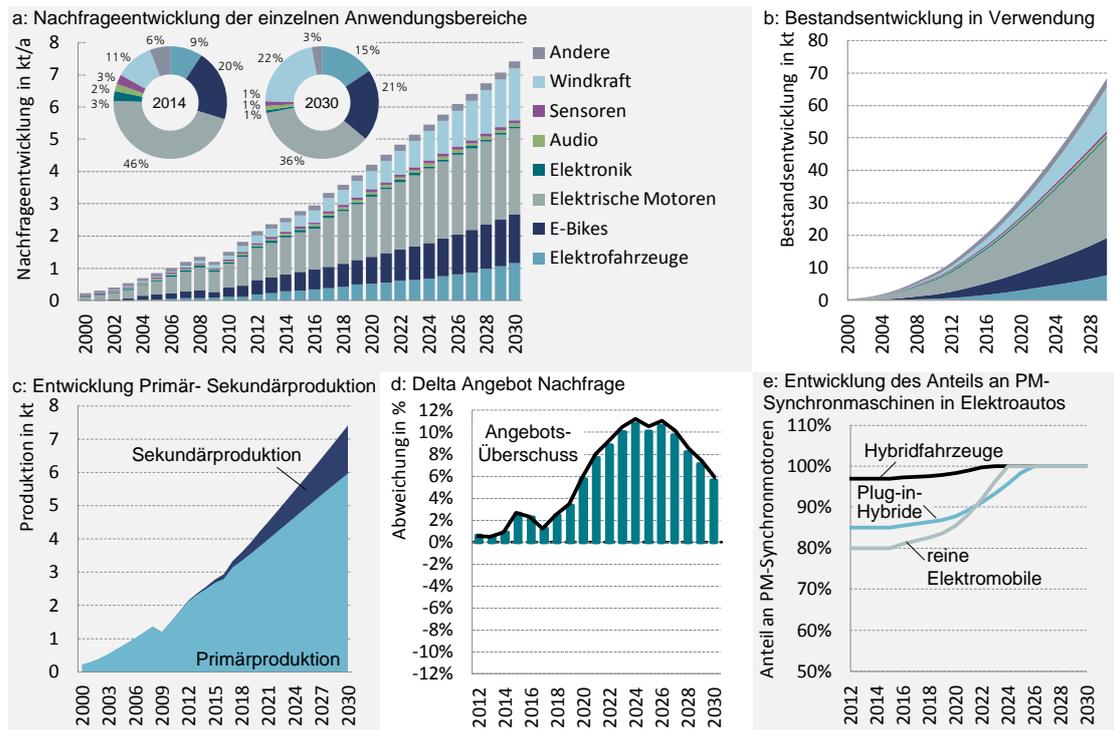


Abbildung 29: Szenario starke Angebotsentwicklung Dysprosium, schwache Diffusion alternativer Antriebe.

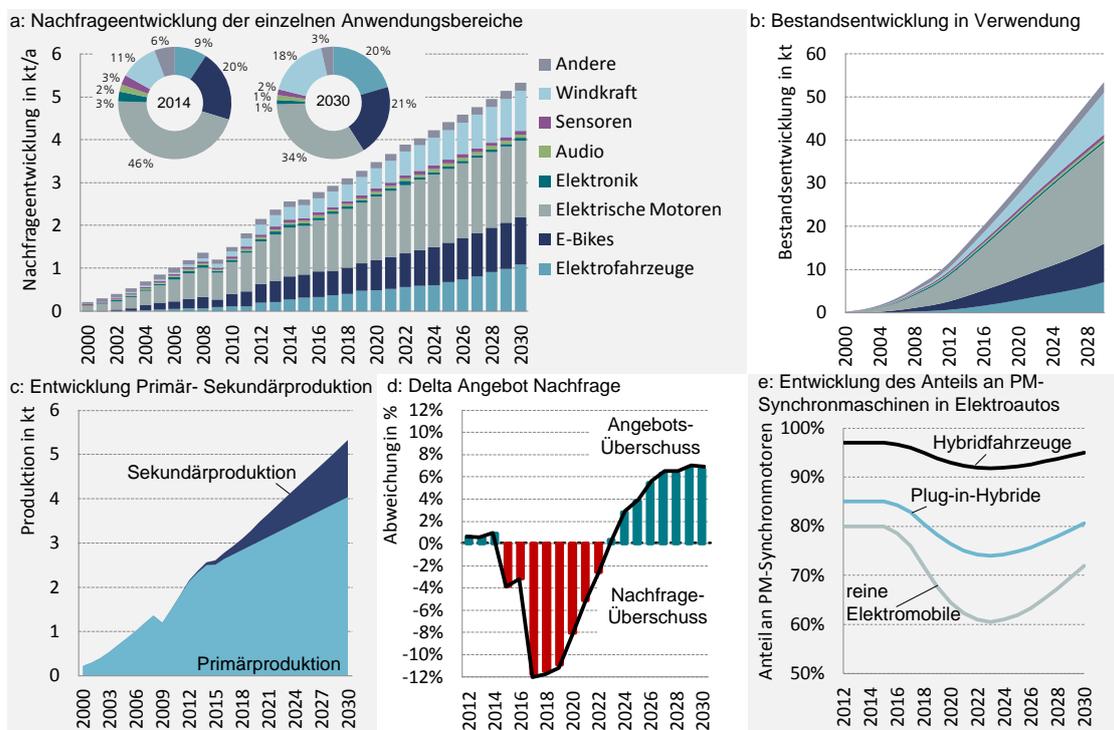


Abbildung 30: Szenario schwache Angebotsentwicklung Dysprosium, schwache Diffusion alternativer Antriebe.

zu kommen. Hier zeigt sich bereits die hohe Sensitivität des Marktes auf technologische Nachfrageimpulse und entsprechende verzögerte Anpassungsmechanismen, die es kaum ermöglichen, eine dauerhaft ausgeglichenes Verhältnis zwischen Angebot und Nachfrage zu erreichen.

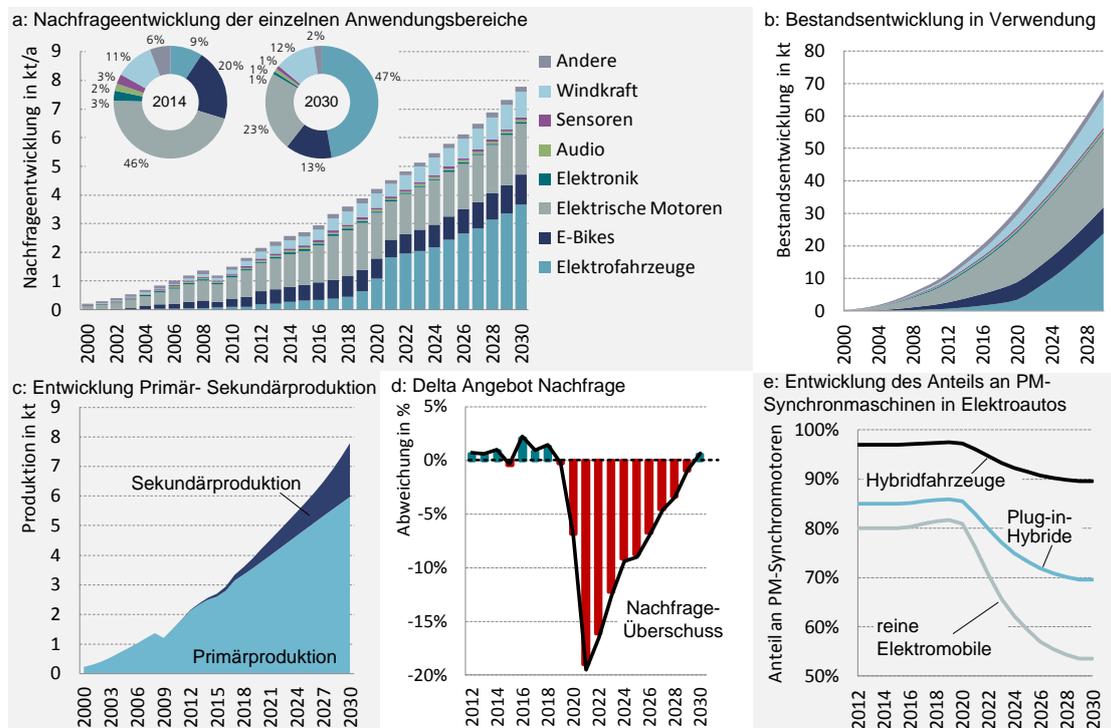


Abbildung 31: Szenario starke Angebotsentwicklung Dysprosium, starke Diffusion alternativer Antriebe.

Eine verstärkte Entwicklung der Elektromobilität nach dem in Abbildung 23 beschriebenen Szenario 2 führt wie in den Abbildungen 31 und 32 dargestellt zu einer erheblichen Spannung auf dem Dysprosium-Markt und entsprechend zu stärkeren Anpassungsmechanismen, die sich erwartungsgemäß auch auf die Verwendung von NdFeB-Synchronmotoren als Traktionsmotor in Elektromobilen auswirken werden. Vor allem die starke Marktpenetration alternativer Antriebe ab 2020 (vergl. Abbildung 23) führt zu einem regelrechten Nachfragesprung nach Dysprosium, was selbst im Falle einer stärkeren Entwicklung des Dysprosiumangebots zu einem erheblichen Mangel führt (vergl. Abweichung Angebot/Nachfrage in Abbildungen 31d).

Insgesamt lässt sich festhalten, dass der verhältnismäßig kleine Markt für Dysprosium sehr sensitiv auf die Entwicklung der Elektromobilität, aber auch auf andere Nachfrageimpulse, z.B. seitens der Windenergie reagieren wird. Die Tatsache, dass Seltene Erden grundsätzlich als Nebenprodukt bzw. im Verbund gewonnen werden, macht eine Anpassung des Angebots für Dysprosium auf eine rascher steigende Nachfrage kaum möglich. Zwar ist der Anteil der schweren SEE im Mineral auf Grund der weit höheren Preise ein entscheidendes Kriterium für die Wirtschaftlichkeit eines Bergbauprojekts, weshalb davon auszugehen ist, dass der Anteil schwerer Seltener Erden am Gesamtmix der Seltenerd-

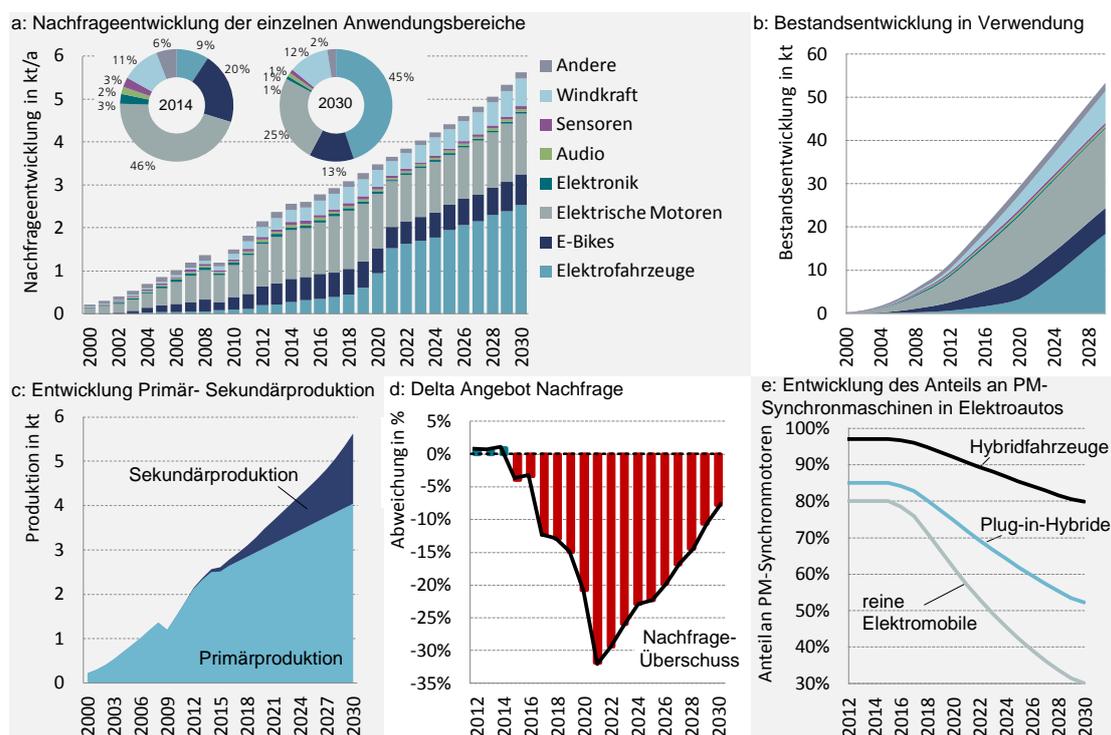


Abbildung 32: Szenario schwache Angebotsentwicklung Dysprosium, starke Diffusion alternativer Antriebe.

Förderung zunehmen wird. Angesichts des derzeit insgesamt sehr niedrigen Preisniveaus bleibt es allerdings abzuwarten, wo die Produktion außerhalb Chinas überhaupt wettbewerbsfähig ist. Es wird angenommen, dass der Bedarf an Magnetwerkstoffen, insbesondere Neodym und Praseodym, die zusammen ca. 25-30 % der derzeitigen Gesamtproduktion an SEO ausmachen, die treibende Kraft der Seltenerd-Förderung bilden wird. Da in den kommenden Jahren der Bedarf von Kleinstmotoren im Elektronikbereich tendenziell zurückgehen wird und größere Synchronmotoren und -Generatoren mit höheren Betriebstemperaturen und entsprechend höheren Dysprosiumanteilen im Bereich des Automobilbaus, der Windenergie, aber auch des allgemeinen Maschinenbaus in den Vordergrund rücken werden, wird die Versorgungslage mit Dysprosium angespannt bleiben. Diese Situation wird durch die Tatsache, dass die Konzentration der Produktion Chinas im Bereich schwerer SEE besonders hoch ist, zusätzlich verschärft. So ist die Steigerung der Ressourceneffizienz in Form der Reduzierung des Dysprosiumanteils in den NdFeB-Hochleistungsmagneten nicht nur aus wirtschaftlicher Sicht (durch die Kosteneinsparung), sondern auch aus versorgungsstrategischer Sicht ein entscheidender Schritt. Wie die Modellergebnisse zeigen, kann das Recycling obsoleter Synchronmotoren in Zukunft einen Beitrag zur globalen Versorgung leisten, der Gesamtbedarf wird durch rezykliertes Material allerdings nicht ansatzweise gedeckt werden können. Ideal wäre die Entwicklung alternativer Magnetwerkstoffe mit ähnlichen Eigenschaften wie NdFeB-Magnete und ohne Verwendung kritischer Metalle. Erfolge in dieser Richtung bleiben allerdings abzuwarten.

5 Zusammenfassung

Wie in diesem Arbeitspapier anhand der Magnetwerkstoffe Neodym und Dysprosium gezeigt werden konnte, ist der System-Dynamics Ansatz sehr gut zur Modellierung von Rohstoffsystemen geeignet. Dies liegt insbesondere daran, dass durch die Beziehungen zwischen Bestands- und Flussvariablen sowohl detaillierte Modelle physischer Stoffströme und Produktlebenszyklen als auch dynamische Rückkopplungseffekte und verzögerte Anpassungsmechanismen auf Rohstoffmärkten modelliert werden können. Dabei hat sich die systematische Vorgehensweise, zunächst Stoffstrommodelle auf globaler Ebene zu entwickeln, die anschließend um Marktdynamische Effekte erweitert wurden, als sinnvoll erwiesen.

Die Informationslage zur Produktion und Verwendungsstruktur von Seltenen Erden ist, wie hier ausführlich dargestellt wurde, mangelhaft. Dies liegt unter anderem daran, dass ein Großteil der Wertschöpfung in China stattfindet und dort offensichtlich erhebliche Unterschiede zwischen den von der Zentralregierung offiziell veröffentlichten Zahlen, die meist den Planvorgaben entsprechen, und den tatsächlichen Produktionszahlen bestehen. Insbesondere bei den verhältnismäßig knappen und hochpreisigen schweren Seltenen Erden, die hauptsächlich in den südlichen Provinzen Chinas abgebaut werden, ist von einer recht starken Abweichung zwischen offiziellen Zahlen und tatsächlichen Abbau-mengen, v.a. durch illegalen Bergbau, auszugehen. Dennoch sind relativ fundierte Zahlen zur Produktionsmenge von NdFeB-Magneten bekannt. Auf Basis dieser Produktionsmengen wurde das globale Stoffstrommodell für Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe aufgebaut.

Das globale Schrottaufkommen an NdFeB-Magneten ist nach wie vor von Kleinmotoren in Elektronikanwendungen (HDD-Festplatten für PCs und Laptops, CD- und DVD Player, Mobiltelefone, Kameras etc.) sowie von Audioanwendungen, insbesondere in Kopfhörern, geprägt. Auf Grund der Problematik der Trennung ferromagnetischer Materialien von der Stahlfraktion in geschredderten Schrotten, findet derzeit kein Recycling von NdFeB-Magneten statt. In den kommenden Jahren werden aber immer mehr Servomotoren aus verschiedensten Maschinen (Pumpen, Aufzugmotoren, Waschmaschinen, sonstige Haushaltsgeräte) sowie Traktionsmotoren aus Hybrid- und Elektrofahrzeugen, oder Generatoren mit Permanentmagneten aus Windkraftanlagen das Schrottaufkommen prägen, während insbesondere im Elektronikbereich durch neue Technologien wie die SSD-Festplatte, die keine beweglichen Teile mehr enthält, und die rückläufigen Produktionszahlen von CD- und DVD Laufwerken immer weniger NdFeB-Magnete verbaut werden. Auf Grund des verhältnismäßig hohen Wertes dieser Magnete und der im Vergleich zu Elektronikanwendungen großen Magnetmasse (z.B. 1-3 kg in Traktionsmotoren von Elektrofahrzeugen), nicht zuletzt verstärkt durch den relativ hohen Anteil an wertvollem Dysprosium zur Erhöhung der Temperaturbeständigkeit der Magnete, ist davon auszugehen, dass die Magnete aus größeren Elektromotoren und Generatoren in Zukunft vermehrt gesammelt und rezykliert werden. Da verschiedene Motorkonzepte mit und ohne Permanent-

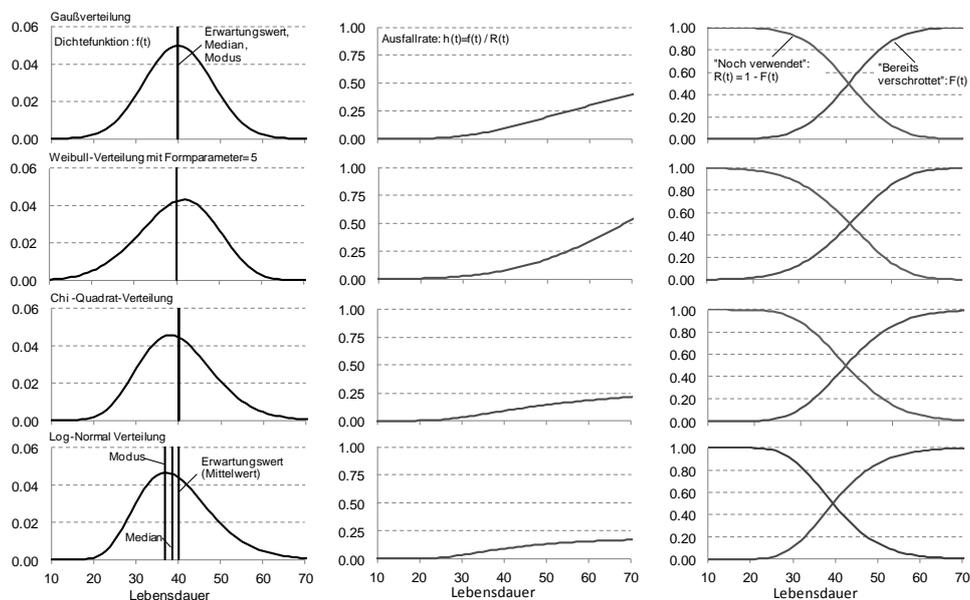
magnet (Käfigläufer-Asynchronmotor, Synchron-Induktionsmotor, PM-Synchronmotor, Reluktanzmotor etc.) sowie verschiedene Magnetmaterialien (NdFeB-Magnete, Ferrite) existieren, und das Motor-konzept von außen kaum ersichtlich ist, wäre eine (ggf. gesetzlich vorgeschriebene) Kennzeichnung der Motoren am Gehäuse für eine effiziente Sammlung von NdFeB-Magneten entscheidend.

Eine Ergänzung der globalen Modelle um marktdynamische Rückkopplungseffekte kann als Werkzeug zur fundierten methodisch erweiterten Szenarioanalyse unter Berücksichtigung von Nachfrage- und Angebotsentwicklungen herangezogen werden. Zur Modellierung der Auswirkungen der Diffusion alternativer Antriebssysteme im Automobilmarkt auf die Nachfrage nach Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe für Traktionsmotoren wurde das globale dynamische Stoffstrommodell mit einem bereits vorhandenen Flottenmodell gekoppelt.

Während klassische Industriemetalle über eine breite eigene Produktionsinfrastruktur verfügen und das Angebot sich zwar verzögert, aber grundsätzlich einer steigenden Nachfrage anpassen wird, werden die Seltenen Erden Neodym und Dysprosium ausschließlich im Verbund mit weiteren geologisch vergesellschafteten Seltenen Erden oder sonstigen Trägermetallen wie Eisen abgebaut. Daher ist die Anpassungsfähigkeit des Angebots dieser Rohstoffe auf steigende Nachfrage nur in sehr begrenztem Umfang zu erwarten. Vielmehr ist davon auszugehen, dass es im Falle einer Verknappung durch starke Nachfrage Seitens neuer Technologien zu einer Nachfrageanpassung in Form von materieller und funktionaler Substitution in anderen Bereichen kommen wird. Wie derartige Anpassungsmechanismen aussehen könnten lässt sich in verschiedenen Szenarien mit dem hier vorgestellten Modell darstellen. Dabei konnte insbesondere für Dysprosium, das für die Temperaturbeständigkeit der NdFeB-Magnete entscheidend ist, eine erhebliche Auswirkung des potenziellen Nachfrageimpulses seitens alternativer Antriebssysteme aufgezeigt werden. Trotz erwarteter Effizienzsteigerungen (identische Magneteigenschaften mit weniger Dysprosiemeinsatz), werden hier im Falle einer stärkeren Diffusion alternativer Antriebssysteme Anpassungen in anderen Bereichen durch Verwendung von Alternativmagnetmaterialien bzw. Alternativtechnologien ohne NdFeB-Magnete (insbesondere bei Servomotoren im breiten industriellen Einsatz und im Bereich der Windenergie) stattfinden müssen um die Rohstoffbasis für die Elektromobilität zu ermöglichen. So bleibt die Forschungsarbeit zur Entwicklung alternativer Magnetwerkstoffe, aber auch die weitere Steigerung der Rohstoffeffizienz von Dysprosium essentiell für die Herstellung und Verbreitung von Zukunftstechnologien wie die Elektromobilität, effiziente Servomotoren im allgemeinen Maschinenbau, oder Leistungsstarke Windkraftanlagen mit Direktantrieb.

A Anhang

Typische Verteilfunktionen für die Simulation von Verwendungszyklen



Typische Lebensdauererwartungen aus dem Bereich der Sicherheitstechnik und Qualitätssicherung (Dichtefunktionen):
 σ : Standardabweichung, μ : Erwartungswert

Normal-Verteilung (Gauß):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{3}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Weibull-Verteilung:

$$f(x) = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{x}{T}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{T}\right)^b} \text{ mit } t, T, b \geq 0 \text{ } b \text{ als Formfaktor und } T \text{ als Charakteristische Zeit}$$

Chi-Quadrat Verteilung:

$$f(x) = \frac{x^{\frac{(n-1)}{2}} e^{-\frac{x}{2}}}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}, \text{ } x > 0 \text{ mit } \Gamma \text{ als Gammafunktion: } \Gamma(n+1)=n!$$

Log-Normal Verteilung:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} e^{-\left(\frac{\ln(x)-\mu}{2\sigma^2}\right)^2}$$

Berechnung der Ausfallrate:

Ausfallwahrscheinlichkeit:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt$$

Überlebenswahrscheinlichkeit:

$$R(t) = 1 - F(t)$$

Ausfallrate (λ):

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Überlebensrate:

$$s(t) = 1 - h(t)$$

Abbildung 33: Typische Lebensdauererwartungen aus den Bereichen der Sicherheitstechnik und des Qualitätsmanagements (vergl. z.B. Kahle und Liebscher, 2013) als Ergänzung zu den theoretischen Erläuterungen in Abschnitt 2.

A.1 Gewinnung und Aufbereitung Seltener Erden

Wie in Abschnitt 1 erläutert, ist die Aufbereitung und Trennung der verschiedenen Seltenerd-Elemente sehr aufwendig und häufig mit erheblichen Umwelteinträgen verbunden. Die groben Prozessschritte werden nachfolgend dargestellt.

Die Aufbereitung der Seltenerd-Erze kann sich entsprechend den geologischen Bedingungen, Gesteinsarten und Mineralgehalte etc. in den verschiedenen Lagerstätten sehr unterschiedlich gestalten. Grundsätzlich lassen sich bei der Beschreibung der Gewinnung von Seltenen Erden folgende 3 Prozessschritte definieren (Kennedy, 2014):

1. Ausbringung der Konzentrate
2. Hydrometallurgische Verarbeitung zu SE-Chloriden
3. Trennung des SE-Gemisches

Die wichtigsten Erze zur wirtschaftlichen Förderung Seltener Erden sind Bastnäsit, Monazit und Xenotim. Während Bastnäsit und Monazit vor allem leichte Seltene Erden wie Lanthan, Cer und Neodym enthalten, werden aus Xenotim auch schwere Seltene Erden wie Yttrium, Dysprosium, Europium oder Terbium gewonnen. Wie in Abbildung 34 dargestellt, werden die Konzentrate über hydrometallurgische Prozesse zunächst in SE-Chloride überführt. Aus der wässrigen Chlorid-Lösung erfolgt anschließend die Trennung (vergl. z.B. Kingsnorth, 2014; McGill, 2000).

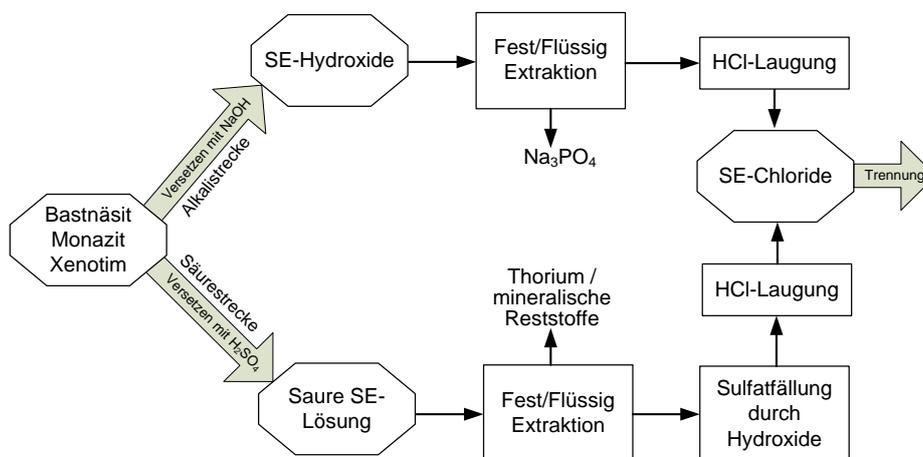


Abbildung 34: Aufbereitung der SE-Konzentrate (Bastnäsit, Monazit, Xenotim) basierend auf Kingsnorth (2014).

Die seltenerdreichen Tone im Süden Chinas werden meist direkt in den Minen aufgeschwämmt und mit Oxalsäure als SE-Oxalate ausgefällt. Alternativ besteht die Möglichkeit der Gewinnung von SE-Oxiden durch Calcinieren (vergl. Abbildung 35). Da diese Prozesse direkt in den meist relativ kleinen häufig nicht offiziell genehmigten Abbaustätten stattfinden, sind hier die Umwelteinträge besonders hoch.

Auf Grund der hohen chemisch-physikalischen Ähnlichkeit zahlreicher Seltenerd-Elemente ist ihre Trennung ein sehr aufwendiger Prozess. Dabei werden sowohl Fällungs- und Kristallisationsprozesse als auch flüssig/flüssig Extraktionsprozesse verwendet. Auf Grund der einfacheren Prozessführung ist

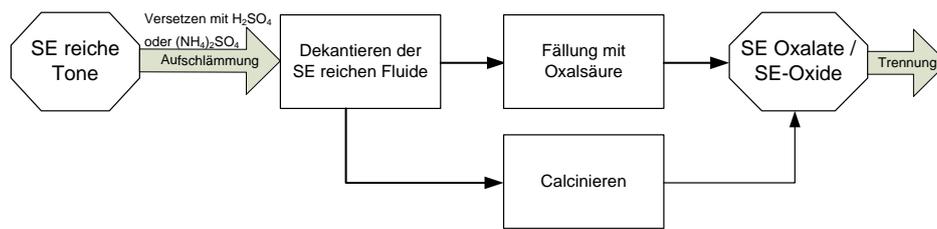


Abbildung 35: Aufbereitung der Tonminerale mit hohem Anteil an schweren SE (Kennedy, 2014).

die Flüssigextraktion (vergl. Abbildung 36) vor allem bei großtechnischer Verarbeitung das häufigste Verfahren.

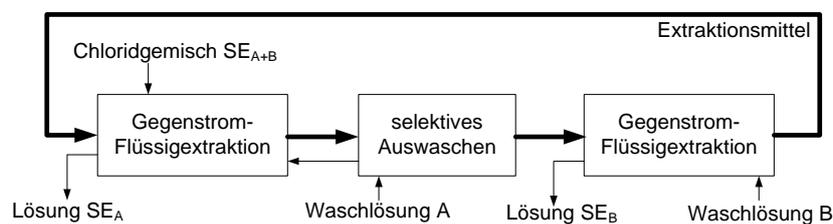


Abbildung 36: Trennung der Seltenen Erden durch Flüssigextraktion (siehe auch Kennedy, 2014).

Dabei werden über Kaskaden von Mischabsetzern nach dem Mixer-Settler Verfahren systematisch einzelne Seltenerd-Fractionen bis hin zu reinen Oxiden abgetrennt. Häufig werden auch Mischoxide direkt vermarktet (z.B. Pr / Nd Gemische als Magnetwerkstoff). Die üblichen Fractionen bei der SE-Trennung sind in Abbildung 37 dargestellt.

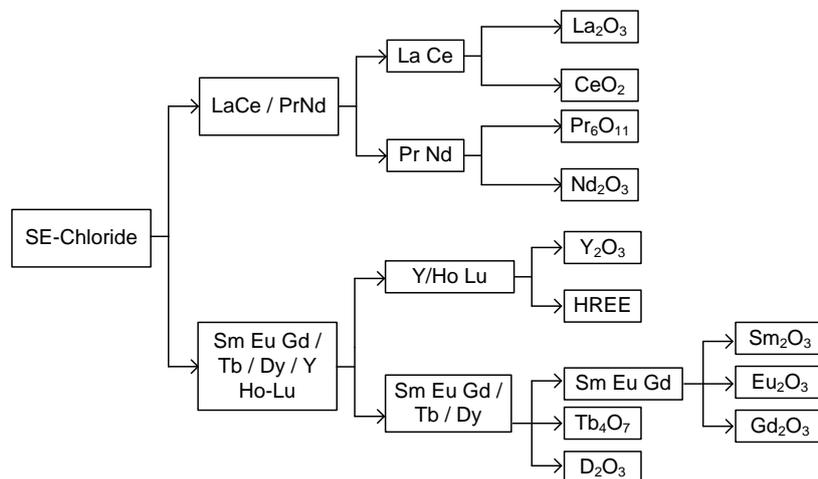


Abbildung 37: Trennstufen der Seltenen Erden bei der Extraktion (vergl. z.B. McGill, 2000).

A.2 Verwendungsstrukturen Seltener Erden

Während in Abschnitt 1 lediglich die zur Gruppe der Seltenen Erden gehörenden Elemente Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe näher betrachtet wurden, wird im Anschluss ein kurzer Überblick über die allgemeine Verwendungsstruktur Seltener Erden gegeben.

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Sc	Y
Batterielegierung	X															
Katalysatoren	X	X		X												
Keramik	X	X	X	X	X				X		X		X		X	X
Glas	X	X	X	X	X		X				X		X	X		
Poliermittel		X			X											
Magnete			X	X	X				X							
Metallurgie	X	X	X	X											X	X
Leuchtstoff, Pigmente	X	X			X	X	X	X			X		X		X	X
Sonstiges	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

X Hauptsächliche Verwendung
 X Geringe Verwendung

Abbildung 38: Verwendungsstrukturen der verschiedenen Seltenerd-Elemente (vergl. insbesondere Zepf, 2013, S.33).

Die wichtigsten Verwendungsstrukturen der Seltenerd-Elemente als Ergänzung zu Abschnitt 1 sind in Abbildung 38 nochmals aufgezeigt und werden nachfolgend erläutert:

Magnete:

Neben den NdFeB-Magneten, die hier ausführlich betrachtet wurden, existieren auf Seltenerd-Basis noch Samarium-Cobalt-Magnete (SmCo). Diese spielen allerdings im Vergleich zu NdFeB nur eine extrem untergeordnete Rolle und werden auf Grund des reversiblen Temperaturkoeffizienten vor allem bei Hochtemperaturanwendungen eingesetzt, die 200 °C übersteigen, da hier NdFeB Magnete trotz hoher Beimischung von Dysprosium ungeeignet sind (vergl. Abbildung 6) und das Energieprodukt bei diesen Temperaturen ebenfalls höher liegt als bei NdFeB-Magneten. Da Samarium im Gemisch der Seltenerd-Produktion mit weniger als 1 % nur gering vertreten ist, (vergl. Abbildung 2), fehlt für diese Magnettechnologie auch die Rohstoffbasis für eine Massenherstellung (Gutfleisch et al., 2011).

Metallurgie:

Für die Herstellung verschiedener Metall-Legierungen werden vor allem Cer, Lanthan, Neodym und Praseodym, aber auch Scandium, Samarium und Yttrium verwendet. Es erscheint insgesamt schwierig den Seltenerd-Verbrauch der Eisen- und Stahlindustrie abzuschätzen, da die genauen Legierungszusammensetzungen nicht bekannt sind und häufig Seltenerd-Mischmetalle zum Einsatz kommen. Jedoch wird angenommen, dass beim Stahl- und Eisenguss, sowie in hochfesten, niederlegierten Stählen circa 13.000 Tonnen Seltenerd-Oxide jährlich verwendet

werden (vergl. z.B. Schüler et al., 2011). Weitere metallurgische Anwendungsbereiche von Seltenen Erden sind z.B. Aluminium- und Magnesiumlegierungen. Die geschätzte Gesamtnachfrage für Seltene Erden im Segment der Metallurgie wird auf 25.000 Tonnen geschätzt und macht damit ca. ein Viertel der Gesamtnachfrage aus.

Batterien / Akkumulatoren:

Seltene Erden (vor allem Neodym und Cer) werden weiterhin in Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren (Ni-MH) verwendet. Dabei werden an der Anode als Metallhydrid spezielle Legierungen eingesetzt, die neben den Hauptbestandteilen Nickel, Mangan, Aluminium oder Kobalt auch Cer, Neodym und Praseodym enthalten (Buchert et al., 2013). Durch den steigenden Marktanteil von Lithium-Ionen-Batterien wird die Nachfrage nach NiMH Batterien allerdings erwartungsgemäß in den kommenden Jahren weiter zurückgehen, wodurch dieser Anwendungsbereich an Bedeutung verliert.

Katalysatoren:

Für Katalysatoren werden vor allem Cer und Lanthan verwendet, teilweise ergänzt durch Beimischung von Neodym und Praseodym. Wichtigster Anwendungsbereich sind dabei Cracking-Prozesse bei der Erdölraffination (Fluid Catalytic Cracking, FCC). Weiterhin wird Cer in nahezu allen Autokatalysatoren zur Leistungssteigerung der verbauten Platinmetalle, sowohl bei Ottomotoren, als auch für eine vollständige Verbrennung in Dieselmotoren (Diesel Oxidation Catalytic Converter DOC) eingesetzt (Roskill, 2011).

Keramik:

Der wichtigste Anwender von seltenerdbasierten Keramikmaterialien ist die Elektronikindustrie. Hier werden vor allem keramische Kondensatoren, Halbleitermaterialien, oder Hochtemperatursupraleiter auf Seltenerd-Basis hergestellt. Insgesamt sind dies sehr spezielle Anwendungsfelder, die mengenmäßig eine untergeordnete Rolle spielen (Schüler et al., 2011).

Gläser:

Seltene Erden werden in vielen Bereichen der Glasindustrie benötigt. Beispielsweise werden Gläser mit Hilfe von Seltenen Erden gefärbt. Cer färbt das Glas gelb und braun, Neodym rot und Europium pink. Cer wird weiterhin zur Steigerung der UV-Beständigkeit von Glasflaschen, Sonnenbrillen und für die Beschichtung von Solarzellen eingesetzt. Auch in der Optik, für Linsen und optische Filter, finden Seltene Erden Verwendung. Cer-Oxid wird weiterhin in den Gläsern von Bildschirmen eingesetzt, wobei dieser Anwendungsbereich auf Grund der Verwendung alternativer Materialien eher rückläufig ist (Schüler et al., 2011).

Poliermittel:

Chemisch-mechanisches Polieren (CMP, engl: chemical mechanical polishing) ist ein Polierverfahren zur Bearbeitung von Wafern in der Elektronikindustrie oder Linsen für optische Geräte. In den Polituren kommt häufig Cer-Oxid zum Einsatz (Roskill, 2011).

Leuchtstoffe:

Seltene Erden werden aufgrund ihrer einzigartigen spektrografischen Eigenschaften als Leuchtstoffe und Pigmente eingesetzt. In fast allen energieeffizienten Beleuchtungssystemen basieren die Leuchtstoffe auf Seltenerd-Elementen. Klassische Energiesparlampen (CFL Compact Fluorescent Lamps), Leuchtstoffröhren, LEDs, OLEDs, LCDs, oder Plasmafernseher enthalten seltenerdbasierte Leuchtstoffe. Der prozentuale Anteil der weltweit verwendeten Seltenen Erden für dieses Segment ist mit 6% relativ klein. Auf Grund der Tatsache, dass hier fast nur Schwere

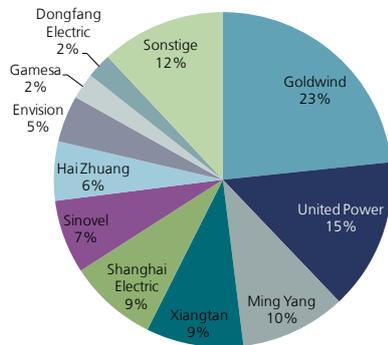
Seltene Erden (Yttrium, Europium und Terbium, aber auch Samarium, Erbium, Thulium, Gadolinium, and Lutetium) eingesetzt werden, ist wegen der entsprechend höheren Preise das Marktvolumen verhältnismäßig groß (Roskill, 2011).

A.2.1 Zusatzdaten Anwendungsbereiche NdFeB-Magnete

Tabelle 1: Aktuelle Windkraftanlagen europäischer Hersteller (Angaben wurden direkt den Produktblättern der jeweiligen Hersteller entnommen). Diejenigen Anlagen mit Getriebe sind mit "G" gekennzeichnet, diejenigen mit Permanentmagnet erregten Generatoren mit "PM".

Vestas				Vensys (Goldwind)			
V80-2.0 MW	-	G	onshore	Vensys 100 (2.5 MW)	PM	-	onshore
V90-1.8 MW	-	G	onshore	Vensys 109 (2.5 MW)	PM	-	onshore
V90-2.0 MW	-	G	onshore	Vensys 112 (2.5 MW)	PM	-	onshore
V100-1.8 MW IEC S	-	G	onshore	Vensys 120 (3 MW)	PM	-	onshore
V100-2.0 MW IEC 2B	-	G	onshore	Repower/Senvion			
V105-3.3 MW	-	G	onshore-/offshore	MM82 (2 MW)	-	G	onshore
V110-2.0 MW IEC 3A	-	G	onshore	MM92 (2 MW)	-	G	onshore
V112-3.0 MW IEC 2A	PM	G	onshore	MM100 (1.8 MW)	-	G	onshore
V112-3.3 MW IEC 2A	-	G	onshore-/offshore	3.0-M122 (3 MW)	-	G	onshore
V112-3.3 MW IEC 1B	-	G	onshore-/offshore	3.2-M114 (3.2 MW)	-	G	onshore
V117-3.3 MW IEC 2A	-	G	onshore-/offshore	3.4-M104 (3.4 MW)	-	G	onshore-/offshore
V126-3.0 MW	PM	G	onshore-/offshore	5-M (5 MW)	-	G	onshore-/offshore
V126-3.3MW	-	G	onshore-/offshore	6.2-M126 (6.2 MW)	-	G	offshore
V164-8.0MW	PM	G	offshore	6.2-M152 (6.2 MW)	-	G	offshore
Nordex				Siemens			
N131 (3,0 MW)	-	G	onshore	SWT-2.3-82	-	G	
N117 (3,0 MW)	-	G	onshore	SWT-2.3-93	-	G	
N100 (3,3 MW)	-	G	onshore	SWT-2.3-101	-	G	
N117 (2,4 MW)	-	G	onshore	SWT-2.3-108	-	G	
N100 (2,5 MW)	-	G	onshore	SWT-3.0-101 (3 MW)	PM	-	onshore-/offshore
N90 (2,5 MW)	-	G	onshore	SWT-3.2-101 (3.2 MW)	PM	-	onshore-/offshore
N150/6000 (6MW)	PM	-	offshore	SWT-3.0-108 (3 MW)	PM	-	onshore-/offshore
Enercon (Direktantrieb mit Ringgenerator)				SWT-3.2-108 (3.2 MW)			
E-70 (2 MW)	-	-	onshore	SWT-3.0-113 (3 MW)	PM	-	onshore-/offshore
E-82 (2 MW)	-	-	onshore	SWT-3.2-113 (3.2 MW)	PM	-	onshore-/offshore
E-92 (2.3 MW)	-	-	onshore	SWT-3.6-107	-	G	
E-101 (3 MW)	-	-	onshore	SWT-3.6-120	-	G	
E-115 (3 MW)	-	-	onshore	SWT-4.0-120	-	G	
E126-EP4 (4 MW)	-	-	onshore	SWT-4.0-130	-	G	
E-126 (7.5 MW)	-	-	onshore	SWT-6.0-154 (6 MW)	PM	-	offshore

a: Marktanteile nach Hersteller China



b: Marktanteile nach Hersteller Welt

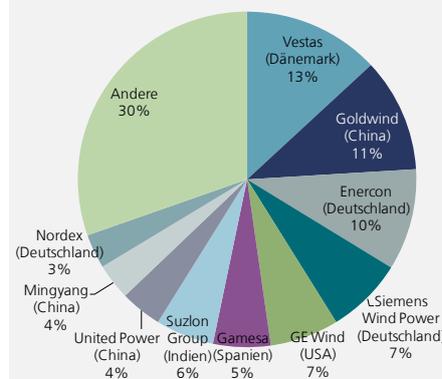


Abbildung 39: Marktanteile der Windkrafthersteller global und für China (Global Wind Energy Council).

Literaturverzeichnis

- ADAC Fahrzeugtechnik, 2013. Elektroautos: Marktübersicht und Kenndaten. Bericht. Allgemeiner Deutscher Automobilclub. München.
- Alonso, E., Sherman, A.M., Wallington, T.J., Everson, M.P., Field, F.R., Roth, R., Kirchain, R.E., 2012. Evaluating rare earth element availability: a case with revolutionary demand from clean technologies. *Environmental Science & Technology* 46, 3406–3414.
- Angerer, G., 2010. Zukunftstechnologien und Weltwirtschaft treiben die Märkte für Hightech-Metalle. *Chemie Ingenieur Technik* 82, 1955–1960.
- Angerer, G., Erdmann, L., Marscheider-Weideman, F., Scharp, M., Lüllmann, A., Handke, V., Marwede, M., 2009. Rohstoffe für Zukunftstechnologien: Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Bericht. Fraunhofer ISI and IZT. Fraunhofer Verlag Stuttgart.
- Avalon Rare Metals Inc., 2010. Rare Earth Information, Corporate and Project Information. Bericht. Avalon Rare Metals Inc. Toronto, Kanada.
- Bast, U., Treffer, F., Thürigen, C., Elwert, T., Marscheider-Weidemann, F., 2014. Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtrieben. Bericht. MORE (Motor Recycling), Projekt im Auftrag des BMBF. URL: https://www.ifa.tu-clausthal.de/fileadmin/Aufbereitung/Dokumente_News_ETC/MORE_Abschlussbericht.pdf.
- Bergbäck, B., Johansson, K., Mohlander, U., 2001. Urban metal flows: A case study of stockholm. review and conclusions. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus* 1, 3–24.
- Bossel, H., 1989. Simulation dynamischer Systeme: Grundwissen, Methoden Programme. Books on Demand, Norderstedt.
- Bradshaw, A.M., Reuter, B., Hamacher, T., 2013. The potential scarcity of rare elements for the energiewende. *Green* 3.
- Buchert, M., 2011. Rare Earths - a Bottleneck for future Wind Turbine Technologies? Bericht. Öko Institut e.V. Freiburg. URL: <http://www.oeko.de/oekodoc/1296/2011-421-en.pdf>.
- Buchert, M., Manhart, A., Sutter, J., 2013. Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg. Bericht. Öko-Institut e.V. Freiburg. URL: <http://www.oeko.de/oekodoc/2053/2014-630-de.pdf>.
- Buchert, M., Schüler, D., Bleher, D., Neurohr, N., Hagelüken, L., 2009. Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential: Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies. Bericht. Öko Institut e.V. Freiburg.
- Buijs, B., Sievers, H., Tercero Espinoza, L.A., 2012. Limits to the critical raw materials approach. *Proceedings of the ICE - Waste and Resource Management* 165, 201–208.
- Campbell, G.A., 2014. Rare earth metals: a strategic concern. *Mineral Economics* 27, 21–31.

- Campbell, P., 2008. System Cost Analysis for an Interior Permanent Magnet Motor. United States. Dept. of Energy and Distributed by the Office of Scientific and Technical Information, U.S. Dept. of Energy, Washington, D.C.
- Chau, K.T., Li Wenlong, 2014. Overview of electric machines for electric and hybrid vehicles. *Int. J. Vehicle Design* 2014, 46–71.
- Constantinides, S., 2011. Help Needed for Clean Energy Initiatives. Bericht. Arnold Magnetic Technologies. New York USA.
- Constantinides, S., 2012. The Demand for Rare Earth Materials in Permanent Magnets. Bericht. Arnold Magnetic Technologies. New York USA.
- Constantinides, S., 2013. Magnet FAQs. Bericht. Arnold Magnetic Technologies. New York USA.
- Du, X., Graedel, T.E., 2011. Global rare earth in-use stocks in ndfeb permanent magnets. *Journal of Industrial Ecology* 15, 836–843.
- Elwert, T., Goldmann, D., 2014. Entwicklung eines hydrometallurgischen Recyclingverfahrens für NdFeB-Magnete, in: Kozmiensky-Thomé, K.J., Goldmann, D. (Herausgeber), *Recycling und Rohstoffe*, Band 7. TK-Vlg, Nietwerder, Seiten 147–159.
- European Commission, 2014. Report on Critical raw materials for the EU. Bericht. European Commission (Enterprise and Industry), Brussels, Belgium.
- Forrester, J.W., 1961. *Industrial Dynamics*. [reprint of first ed. 1961] ed., Martino Pub, Mansfield Centre, USA.
- Gandenberger, C., Glöser, S., Marscheider-Weidemann, F., Ostertag, K., Walz, R., 2012. Die Versorgung der deutschen Wirtschaft mit Roh- und Werkstoffen für Hochtechnologien: Präzisierung und Weiterentwicklung der deutschen Rohstoffstrategie: Innovationsreprot. Bericht. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). Berlin.
- Gantner, O., Grimm, J., Hutner, Petra, Lubberger, Ariane, 2013. Wissenschaftliche Begleitung der Althandy-Sammelaktion "Handy clever entsorgen". Bericht. Universität Augsburg. URL: http://www.physik.uni-augsburg.de/lehrstuehle/rst/downloads/althandy_sammlung.pdf.
- Gieras, J., 2010. Permanent magnet motor technology: Design and applications. 3rd ed ed., CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Glöser, S., Faulstich, M., 2012. Quantitative analysis of the criticality of mineral and metallic raw materials based on a system dynamics approach, in: *Proceedings of the 30th International Conference of the System Dynamics Society*, St. Gallen, Switzerland 2012.
- Goldmann, D., 2010. Recycling als Beitrag zur Rohstoffsicherung - neue strukturelle und technologische Herausforderungen. *Chemie Ingenieur Technik* 82, 1851–1860.
- Graedel, T.E., Allwood, J., Birat, J.P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B.K., Sibley, S.F., Sonnemann, G., 2011. What do we know about metal recycling rates? *Journal of Industrial Ecology* 15, 355–366.
- Gutfleisch, O., 2013. Permanent Magnets: Magnetic Materials for Energy. Bericht. Universität Darmstadt. URL: <http://magnetism.eu/esm/2013/slides/gutfleisch-slides1.pdf>.

- Gutfleisch, O., Willard, M.A., Brück, E., Chen, C.H., Sankar, S.G., Liu, J.P., 2011. Magnetic materials and devices for the 21st century: Stronger, lighter, and more energy efficient. *Advanced Materials* 23, 821–842.
- Haan, P.d., Zah, R., 2013. Chancen und Risiken der Elektromobilität in der Schweiz. Ausgabe 59/2013 von *TA-SWISS / Zentrum für Technologiefolgen-Abschätzung*. Vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich.
- Habib, K., Schibye, P.K., Vestbø, A.P., Dall, O., Wenzel, H., 2014. Material flow analysis of ndfeb magnets for denmark: A comprehensive waste flow sampling and analysis approach. *Environmental Science & Technology* 48, 12229–12237.
- Habib, K., Wenzel, H., 2014. Exploring rare earths supply constraints for the emerging clean energy technologies and the role of recycling. *Journal of Cleaner Production* 84, 348–359.
- Hagelücken, C., 2010. Lagerstätten auf Rädern: Intelligente Recyclingkonzepte könnten wesentlich zur Versorgungssicherheit bei Technologiemetallen beitragen. *ReSource* , 30–33.
- Hatch, G., 2011. Critical Rare Earths: Global supply & demand projections and the leading contenders for new sources of supply. Bericht. Technology Metals Research (TMR). Carpentersville, IL, USA.
- Hirato, T., Daigo, I., Matsuno, Y., Adachi, Y., 2009. In-use stock of steel estimated by top-down approach and bottom-up approach. *ISIJ international* 49, 1967–1971.
- Hoenderdaal, S., Tercero Espinoza, L., Marscheider-Weidemann, F., Graus, W., 2013. Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies? *Energy* 49, 344–355.
- Hofmann, H., Kaufmann, R., Tschop, O., Widmer, R., Gauch, M., Haefeli, Ueli, Schwegler, Urs, 2013. E-Scooter: Sozial- und naturwissenschaftliche Beiträge zur Förderung leichter Elektrofahrzeuge in der Schweiz : Schlussbericht 2013. Bericht. Bundesamt für Energie BFE. Bern.
- Hurst, C., 2010. China's Rare Earth Elements Industry: What Can the West Learn? Bericht. Institute for the Analysis of Global Security (IAGS). Washington, DC. URL: <http://www.iags.org/rareearth0310hurst.pdf>.
- INSG, 2014. The Global E-bike Market: INSG SECRETARIAT BRIEFING PAPER. Bericht. International Nickel Study Group. Lissabon, Portugal. URL: http://www.insg.org/%5Cdocs%5CINSG_Insight_23_Global_Ebike_Market.pdf.
- Kahle, W., Liebscher, E., 2013. Zuverlässigkeitsanalyse und Qualitätssicherung. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München.
- Kaufhold, M., Jöckel, A., 2002. Permanenterregte Großmaschinen: Potenziale in der Oberklasse. *ETZ Antriebstechnik* , 2–7.
- Kennedy, D., 2014. Aufbereitung und Verarbeitung von Seltenerdmetallen, in: Kausch, P., Bertau, M., Gutzmer, J., Matschullat, J. (Herausgeber), *Strategische Rohstoffe - Risikovorsorge*. Springer Spektrum, Berlin, Seiten 201–217.
- Kingsnorth, D., 2014. Der globale Markt der Seltenen Erden - Ein Balanceakt, in: Kausch, P., Bertau, M., Gutzmer, J., Matschullat, J. (Herausgeber), *Strategische Rohstoffe - Risikovorsorge*. Springer Spektrum, Berlin, Seiten 97–120.

- Kühn, A., Glöser, S., 2012. System-based feedback analysis of e-mobility diffusion in china., in: Proceedings of the 30th International Conference of the System Dynamics Society, St. Gallen, Switzerland 2012. System Dynamics Society, St. Gallen.
- Kühn, A., Glöser, S., 2013. The influence of potential raw material shortages on the market penetration of alternative drives: A case study for lithium and cobalt, in: Proceedings of the World Conference on Traffic Research (WCTR), Rio de Janeiro, Brazil.
- Manchester, F., Sakai, T., Hazama, T., Miyamura, H., Kuriyama, N., Kato, A., Ishikawa, H., 1991. Rare-earth-based alloy electrodes for a nickel-metal hydride battery. *Journal of the Less Common Metals* 172, 1175 – 1184.
- McGill, I., 2000. Rare earth elements, in: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany.
- Moss, R.L., Tzimas, E., Kara, H., Willis, P., Kooroshy, J., 2011. Critical Metals in Strategic Energy Technologies: Assessing Rare Metals as Supply Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies. Bericht. JRC Scientific and Technical Reports. European Commission, Brussels Belgium.
- Olivetti, E., Field, F., Kirchain, R., 2015. Understanding dynamic availability risk of critical materials: The role and evolution of market analysis and modeling. *MRS Energy & Sustainability* 2.
- Parthemore, C., 2011. Elements of security: Mitigating the risks of U.S. dependence on critical minerals. Center for a New American Security, Washington DC.
- Pauliuk, S., Wang, T., Müller, D.B., 2013. Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries. *Resources, Conservation and Recycling* 71, 22–30.
- Research and Markets, 2014. Global and Chinese NdFeB Industry Report, 2014-2018. Bericht. Research and Markets Ltd.. Dublin, Ireland. URL: http://www.researchandmarkets.com/research/3qd7s3/global_and.
- Reuter, M., Hudson, C., Van Schaik, A., Heiskanen, K., Meskers, C., Hagelüken, C., 2013. Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure. Bericht. United Nations Environment Programme. Nairobi, Kenya.
- Rochlin, L.L., 2003. Magnesium alloys containing rare earth metals: Structure and properties. Ausgabe 3 von *Advances in metallic alloys*. Taylor & Francis, London.
- Roskill, 2011. Roskill Information Services Ltd.: Rare Earths & Yttrium: Market Outlook to 2015: A quick introductory guide to rare earths. Bericht. Roskill Information Services Ltd.. London, England.
- Schade, W., Zanker, W., Kühn, A., Kinkel, S., Jäger, A., Hettesheimer, T., Schmall, T., 2012. Arbeitsbericht Nr.152 - Zukunft der Automobilindustrie. Bericht. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). Berlin.
- Schüler, D., Buchert, M., Schüler, Liu, R., Dittrich, S., Merz, C., 2011. Study on Rare Earths and Their Recycling: Final Report for The Greens/EFA Group in the European Parliament. Bericht. Öko-Institut e.V.. Freiburg.
- Solar, S., Shields, D., Miller, M., 2009. Mineral policy in the era of sustainable development: historical context and future content. *Materials and Geoenvironment* 2009, 304–321.

- Sprecher, B., Kleijn, R., Kramer, G.J., 2014. Recycling potential of neodymium: the case of computer hard disk drives. *Environmental Science & Technology* 48, 9506–9513.
- Sterman, J., 2000. *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. Irwin/McGraw-Hill, Boston, USA.
- Sverdrup, H.U., Ragnarsdottir, K.V., Koca, D., 2014. On modelling the global copper mining rates, market supply, copper price and the end of copper reserves. *Resources, Conservation and Recycling* 87, 158–174.
- Tercero, L., 2012. The role of emerging technologies in rapidly changing demand for mineral raw materials. *Polinares Working Paper*.
- U. S. DoE, 2010. *Critical Materials Strategy: 2010*. Bericht. U. S. Department of Energy. Washington, DC.
- USGS, 2011. *Rare Earth Elements - End Use and Recyclability: Scientific Investigations Report 5094*. Bericht. U.S. Geological Survey. Reston, Virginia, USA.
- USGS, 2013. *Minerals Yearbook: Rare Earths*. Bericht. U.S. Geological Survey. Reston, Virginia, USA.
- USGS, 2014. *Mineral Commodity Summaries*. Bericht. U.S. Geological Survey. Reston, Virginia, USA.
- Wallentowitz, H., Freialdenhoven, A., 2011. *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges: Technologien, Märkte und Implikationen*. Springer Vieweg + Teubner Verlag, Berlin.
- Wehrspohn, R.B., 2014. *Leitprojekt Kritikalität Seltener Erden: Interner Newsletter*. Bericht. Faunhofer Gesellschaft. München.
- Weinert, J., Ma, C., Yang, X., Cherry, C., 2007. Electric two-wheelers in china: Effect on travel behavior, mode shift, and user safety perceptions in a medium-sized city. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2038, 62–68. arXiv:<http://dx.doi.org/10.3141/2038-08>.
- Wellmer, F.W., Dalheimer, M., 2012. The feedback control cycle as regulator of past and future mineral supply. *Mineralium Deposita* 47, 713–729.
- Westphal, L., Kuchta, K., 2013. Versorgungsempässen vorbeugen: Seltene Erden in Permanentmagneten können nicht gleichwertig substituiert werden, in: Reiser, B. (Herausgeber), *ReSource*. Rhombos-Verlag, Berlin. Ausgabe 4 2013, Seiten 10–15.
- Wilde, A., 2008. *NdFeB Magnets in the Context of Automotive Applications*. Bericht. Robert Bosch GmbH. Stuttgart. URL: http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/20080702_alexandrawilde.pdf.
- Wübbeke, J., 2013. Rare earth elements in china: Policies and narratives of reinventing an industry. *Resources Policy* 38, 384–394.
- Zepf, V., 2013. *Rare earth elements: A new approach to the nexus of supply, demand and use - as exemplified by the use of neodymium in permanent magnets*. Springer theses, Springer, Berlin.
- Ziemann, S., Schebek, L., 2010. *Substitution knapper Metalle - ein Ausweg aus der Rohstoffknappheit?* *Chemie Ingenieur Technik* 82, 1965–1975.



Autoren

Simon GLÖSER-CHAHOUH und Luis TERCERO ESPINOZA
Geschäftsfeld Systemische Risiken

André KÜHN
Geschäftsfeld Mobilität

Competence Center Nachhaltigkeit und Infrastruktursysteme
Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)

Kontaktdaten

Simon GLÖSER-CHAHOUH
Geschäftsfeld Systemische Risiken
Competence Center Nachhaltigkeit und Infrastruktursysteme
Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)
Breslauer Straße 48 | 76139 Karlsruhe
Telefon +49 721 6809-387 | Fax +49 721 6809-135
simon.gloeser@isi.fraunhofer.de
<http://www.isi.fraunhofer.de>

Karlsruhe, Juni 2016