

Simon GLÖSER-CHAHOUD
Luis TERCERO ESPINOZA

Dynamische Materialfluss-Analyse von Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe

AP11: Stoffströme, Märkte und Umwelt
Dokumentation der globalen und deutschlandweiten
Neodym- und Dysprosium-Stoffstrommodellen

Karlsruhe, 27. Oktober 2015

Kontakt

Dr.-Ing. Luis TERCERO ESPINOZA
Leitung Geschäftsfeld Systemische Risiken
Competence Center Nachhaltigkeit und Infrastruktursysteme
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48 | 76139 Karlsruhe
Telefon +49 721 6809-401 | Fax +49 721 6809-135
luis.tercero@isi.fraunhofer.de
<http://www.isi.fraunhofer.de>

Inhaltsverzeichnis

1. Die Seltenen Erden Neodym und Dysprosium	7
1.1. Globales Angebot und Verwendungsstrukturen Seltener Erden	8
1.1.1. Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe	12
2. System Dynamics als Methode zur Modellierung von Rohstoffsystemen	23
2.1. Der System Dynamics Ansatz	23
2.1.1. Rückkopplungseffekte und zeitliche Verzögerungen	24
2.2. Dynamische Stoffkreisläufe und Produktverwendungszyklen	25
2.3. Modellierung von Marktdynamik	28
3. Ergebnisse der dynamischen Stoffstrommodelle	31
3.1. Globales Modell der Neodym- und Dysprosium-Materialflüsse	31
3.2. Neodym und Dysprosium in der deutschen industriellen Wertschöpfung	33
4. Ergänzung der physischen Stoffströme um Marktdynamik und Rückkopplungseffekte	49
4.1. Auswirkungen der Diffusion alternativer Fahrzeugantriebe	49
4.1.1. Das Globale Mobilitätsmodell (GloMo)	50
4.1.2. Prinzip der Kopplung des Flottenmodells mit den Stoffstrommodellen	52
4.1.3. Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe für Traktionsmotoren	55
5. Zusammenfassung	69
A. Anhang	73

Abstract

Im Kontext der aktuellen Diskussion um kritische und wirtschaftsstrategische Rohstoffe werden Seltene Erden auf Grund der nahezu monopolistischen Stellung Chinas als Lieferant häufig an erster Stelle genannt. Auch hinsichtlich der Produktion der derzeit stärksten Permanentmagnete, den NdFeB-Magneten, die insbesondere für permanentmagnetisch erregte Synchron-Servomotoren und Generatoren in verschiedensten Zukunftstechnologien (Elektromobilität, Windenergie etc.) wichtig sind, nimmt China eine zentrale Rolle ein.

Trotz zunehmender Anzahl an Publikationen zu diesem Thema ist die Informationslage zu Verwendungsmengen- und Verwendungsstrukturen von NdFeB-Magneten und den enthaltenen Seltenen Erden Neodym und Dysprosium nach wie vor unzureichend. Insbesondere zur Analyse und Bewertung von Substitutions- sowie Recyclingpotenzialen, aber auch zur Untersuchung von Rohstoffabhängigkeiten ist die Kenntnis über Materialflüsse und Verbrauchsmengen in den verschiedenen Anwendungsbereichen entscheidend.

Ein wirkungsvolles Instrument zur Erhöhung der Markttransparenz und des Verständnisses von komplexen anthropogenen Stoffkreisläufen ist die dynamische Stoffflussmodellierung. Im vorliegenden Bericht wird dieses Instrument zur eingehenden Analyse der Verwendungsstrukturen von NdFeB-Magneten und den enthaltenen Seltenen Erden Neodym und Dysprosium auf globaler Ebene sowie innerhalb Deutschlands eingesetzt. Über die dynamische Modellierung von Produkt-Verwendungszyklen werden heutige Verwendungsstrukturen offengelegt und zukünftige Magnetmengen in obsoleten Produktströmen quantifiziert. Auf diese Weise lassen sich potenzielle Recyclingmengen bestimmen, was für die Analyse der Wirtschaftlichkeit der Etablierung von Recyclingsystemen sowie zur Bewertung des potenziellen Anteils von Sekundärmaterial zur Reduzierung der Rohstoffabhängigkeit einen entscheidenden Beitrag leisten kann.

In einem weiteren Schritt wird unter Verwendung eines systemdynamischen Modells die Auswirkung der Diffusion alternativer Antriebe im Automobilmarkt auf den Bedarf von Dysprosium als Magnetwerkstoff für Traktionsmotoren analysiert und es werden mögliche Anpassungsmechanismen in Form verschiedener Substitutionseffekte am Markt für NdFeB-Magnete simuliert.

1. Die Seltenen Erden Neodym und Dysprosium

Die Seltenen Erden sind wegen ihrer einzigartigen chemisch-physikalischen Eigenschaften von grundlegender Bedeutung für die europäische und globale Technologieentwicklung (vergl. z.B. Moss et al., 2011; Parthemore, 2011). Geologisch betrachtet 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 U.S. Geological Survey, 2013). Die 17 Elemente der Seltenen Erden werden aber derzeit als besonders kritisch eingestuft, da ihre Bedeutung für die Wirtschaft äußerst hoch ist, ihre aktuelle Versorgungslage jedoch als unsicher einzustufen ist, was vor allem auf die Konzentration der Produktion auf China zurückzuführen ist. 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 (vergl. z.B. Kennedy, 2014).

Die Schweren Seltenen Erden (**Heavy Rare Earth Elements, HREE**, siehe Abbildung 1.1) sind dabei bezüglich der Versorgungslage am kritischsten, da sie im Vergleich zu einigen leichten Seltenen Erden (**Light Rare Earth Elements, LREE**), wie nachfolgend näher erläutert, im Gemisch der im Verbund

1																	18		
1	1															2			
	H															He			
2	3	4											5	6	7	8	9	10	
	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
3	11	12	Gruppe										13	14	15	16	17	18	
	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	55	56	57-71 siehe unten	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	87	88	89-103 siehe unten	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116		118	
	Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	UUt	UUq	UUu	UUh		Uuo	
			Für die Magnetherstellung relevante Seltene Erden																
			Lanthanoide																
			57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	39	
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	
			Leichte Seltene Erden										Schwere Seltene Erden						

Abbildung 1.1.: 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. U.S. Geological Survey, 2011; Zepf, 2013, S.15).

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 Seltenern Erden aus China (vergl. Abbildung 1.2). Die Volksrepublik hat allerdings zur Konsolidierung des heimischen Marktes und auf Grund der negativen Umweltauswirkungen ihre Produktion gedrosselt und will ihre Ressourcen über Exportquoten für die eigenen Zwecke bewahren. Auch spielen hier, wie bereits in der Einleitung dieser Arbeit erläutert, 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. Die bedeutendsten nicht chinesischen Projekte, welche die globale Seltenerdproduktion in jüngster Vergangenheit ergänzt haben¹ und in unmittelbarer Zukunft erweitert werden, werden hauptsächlich leichte Seltene Erden (LREE) hervorbringen.

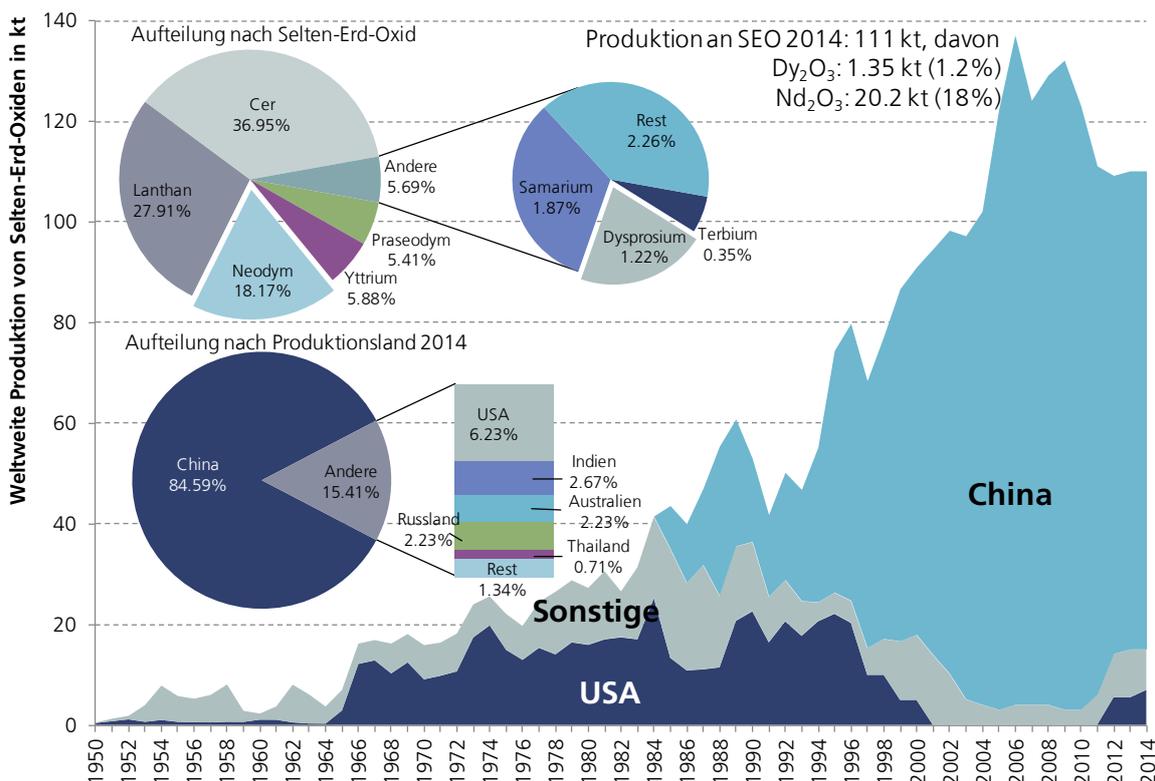


Abbildung 1.2.: Globale Seltenerd-Produktion nach Ländern sowie Zusammensetzung der gewonnenen Elemente (Daten basieren auf U.S. Geological Survey, 2013).

¹ insbesondere die Mountain Pass Mine in den USA (Molycorp Inc.) und die Mount Weld Mine in Australien (LYNAS corp.).

Obwohl das Gesamtangebot an Seltenen Erden die Gesamtnachfrage erwartungsgemäß übersteigen wird (siehe z.B. Hatch, 2011; Alonso et al., 2012a; Kingsnorth, 2014), werden Engpässe bei der Versorgung mit HREE erwartet, da die verschiedenen Seltenen Erden nicht im gleichen Verhältnis konsumiert werden wie sie geologisch in den Erzen vorkommen. So ist davon auszugehen, dass die häufigsten leichten Seltenen Erden Cer und Lanthan (vergl. Abbildung 1.2 oben) in Zukunft im Überfluss vorhanden sein werden (was sich schon heute in den Preisniveaus zeigt), Neodym als wichtigster Magnetrohstoff den Wachstumstreiber der Selten-Erd-Förderung darstellen wird (Alonso et al., 2012a) 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 Schwere Seltenen Erden als versorgungskritischer einschätzt. Da Dysprosium als wichtiger Bestandteil von Hochleistungs-Magneten eine zentrale Rolle für die Elektromobilität, aber auch für andere Wachstumsbranchen wie den Windenergiesektor, insbesondere bei wartungsarmen, direkt-angetriebenen großen Offshore-Windanlagen, spielt, ist die Versorgungslage hier als besonders problematisch einzustufen, was im Folgenden näher untersucht wird (vergl. hierzu auch z.B.: Hoenderdaal et al., 2013; Habib und Wenzel, 2014).

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, vergl. U.S. Geological Survey, 2011).

Auf Grund der großen chemischen und physikalischen Ähnlichkeiten ist die Aufbereitung und Trennung der verschiedenen Selten-Erd-Oxide sehr aufwendig und teilweise mit erheblichen Umwelteinwirkungen verbunden. Bei den Gewichtsangaben muss zwischen den metallischen Selten-Erd-Elementen (SEE) und Selten-Erd-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 Seltenen Erden liefert Abbildung 1.3.

Hinsichtlich der Produktionsdaten zu einzelnen Selten-Erd-Elementen herrscht einige Unsicherheit und Unklarheit. Dies liegt u.a. an den erheblichen Mengen illegalen Bergbaus, der bezogen auf die Gesamtheit der Selten-Erd-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). Da die leichten Seltenen Erden über 80% der Gesamtförderung ausmachen, erscheint eine Quote von 50 % illegalen Bergbaus bei schweren Seltenen Erden (HREE) nicht unrealistisch. Dies ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass im Süden Chinas einzigartige Tonerden mit enorm hohem Anteil an HREE vorkommen (vergl. Abbildung 1.4). Angesichts des großen Preisunterschieds zwischen Cer, Lanthan und HREE wie Terbium, Dysprosium oder Europium, ist es naheliegend, dass es für dortige Minenbetreiber auf Grund der hohen Konzentration an HREE auch

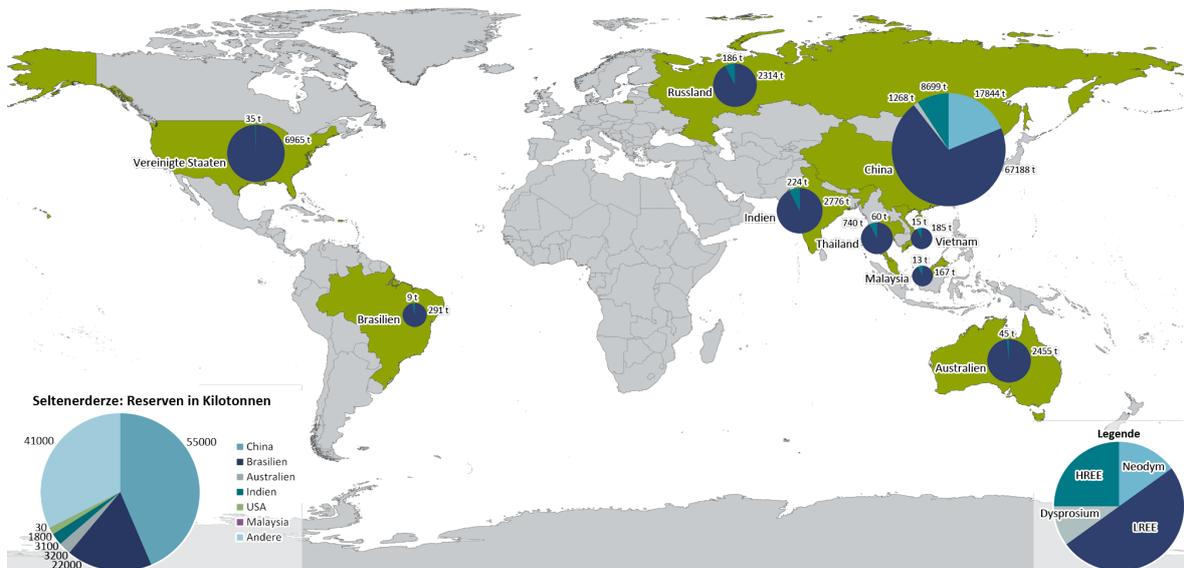


Abbildung 1.3.: Globale Verteilung der Seltenerdproduktion (U.S. Geological Survey, 2013). Zwar haben die USA und Australien ihre Produktion in den vergangenen Jahren ausgeweitet (vergl. auch Abbildung 1.2). Die gewonnenen Monazit und Bastnäsit-Erze enthalten allerdings nur geringe Mengen an schweren Seltenen Erden und nahezu kein Dysprosium (Kingsnorth, 2014). Hier hat China nach wie vor eine klare Monopolstellung.

wirtschaftlich sein kann, die abgetrennten LREE zu deponieren und über die Produktionsvorgaben der Zentralregierung in Peking hinaus HREE zu fördern. Insgesamt ist 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 1.4), die tatsächlichen Produktionszahlen weit höher liegen als die offiziell veröffentlichten Daten in Abbildung 1.2 (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 Selten-Erd-Verarbeitung in China stattfindet. So hat China nicht nur bei der Selten-Erd-Förderung einen Marktanteil von über 85%, sondern auch bei der Herstellung von NdFeB-Magneten (vergl. z.B. Du und Graedel, 2011). Eine Abschätzung der tatsächlichen Produktionsmengen bestimmter Selten-Erd-Elemente ist daher nur mit einer erheblichen Fehlerspanne möglich (vergl. Abschnitt 1.1.1, insbesondere Abbildung 1.10).

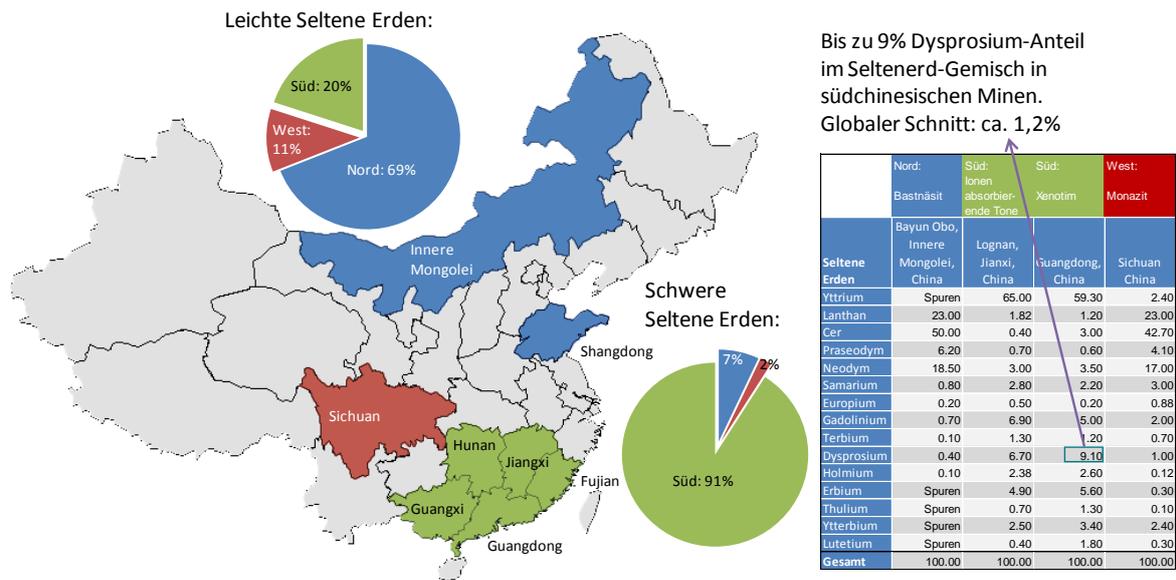


Abbildung 1.4.: Chinesische Abbauggebiete Seltener Erden und Erzzusammensetzung verschiedener Minen (U.S. Geological Survey, 2011; Wübbeke, 2013; Kennedy, 2014).

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 1.1 zusammengefasst (vergl. z.B. Schüler et al., 2011; Buchert et al., 2013; Zepf, 2013, S.33 ff.).

Dies sind lediglich die wichtigsten aus der Literatur entnommenen Anwendungsfelder. Die Liste der Spezialanwendungen für die Hightechmetalle der Seltenen Erden ist sehr lange, da dies für die wei-

Tabelle 1.1.: Verwendungsbereiche Seltener Erden aufgeteilt nach Elementen (vergl. z.B. Zepf, 2013, S.33 ff.) ergänzt um weitere Anwendungsbereiche nach (Roskill, 2011, 2014; Schüler et al., 2011; Kingsnorth, 2014).

Rohstoff	Anwendungsbereich																
	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: ⊗

teren Betrachtungen in der vorliegenden Arbeit aber keine Rolle spielt, wurde auf zusätzliche Recherchen verzichtet.

In dieser Arbeit werden lediglich die Magnetwerkstoffe Neodym und Dysprosium untersucht und Stoffstromanalysen auf globaler Ebene sowie für Deutschland durchgeführt.

1.1.1. Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe

In der vorliegenden Arbeit werden die Verwendungsstrukturen der Seltenen Erden Neodym und Dysprosium, die zum größten Teil bzw. ausschließlich in Neodym-Eisen-Bor-Magneten (NdFeB-Magneten) eingesetzt werden (vergl. Tabelle 1.1), analysiert. Diese 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. Die Entwicklung von Permanentmagnet-Materialien seit Beginn des 20. Jahrhunderts ist in Abbildung 1.6 dargestellt.

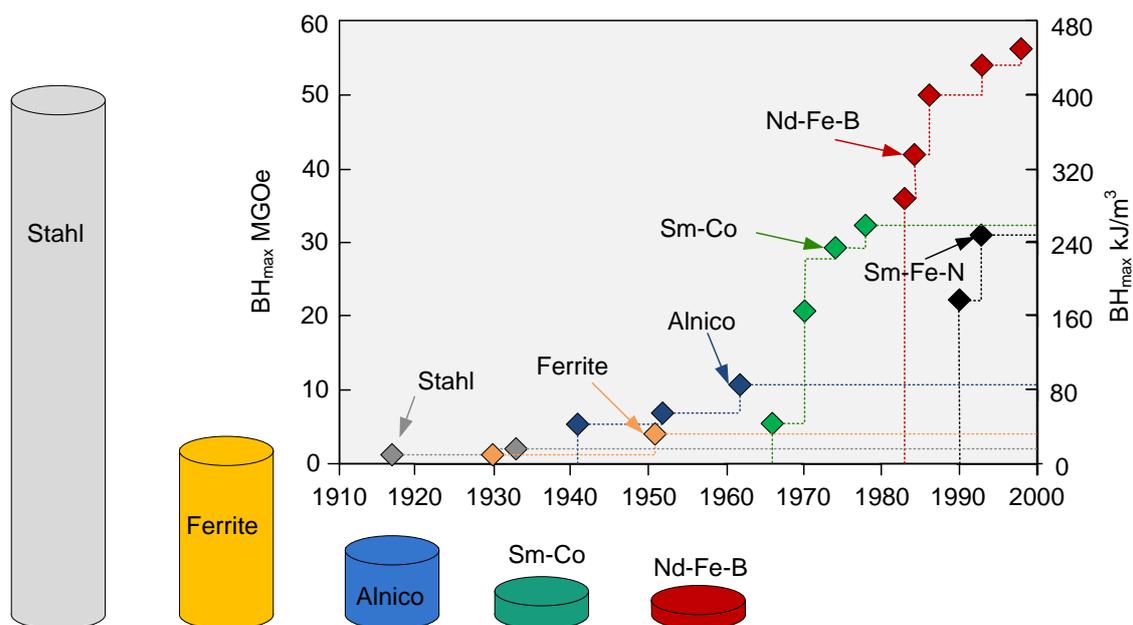


Abbildung 1.5.: Entwicklung der Permanentmagnet-Technologien sowie Vergleich der Volumina verschiedener Magnettypen gleicher Stärke. NdFeB Magnete sind heute die Magnete mit der mit Abstand höchsten Energiedichte und daher für kompakte Synchron-Elektromotoren hervorragend geeignet (Gutfleisch et al., 2011). Abkürzungen: Sm-Co: Samarium-Cobalt, AlNiCo: Aluminium-Nickel-Cobalt.

Neodym als dritthäufigste Seltene Erde (nach Cer und Lanthan, vergl. Abbildung 1.2) wird neben der Verwendung als Magnetwerkstoff (ca. 90 % der Weltproduktion, vergl. z.B. 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, vergl. Rochlin, 2003), sowie in Leuchtstoffen (siehe Tabelle 1.1) 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 Mengenverhältnisse 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 1.6).

Zur Erläuterung der hier relevanten Materialeigenschaften, werden nachfolgend einige zentralen Größen definiert. Im Gegensatz zu fremderregten Elektromagneten bestehen Permanentmagneten aus einem magnetisierten Werkstoff, der dauerhaft ein magnetisches Feld aufweist. Ferromagnetische Stoffe sind z.B. Eisen, Nickel, Kobalt und Legierungen, die diese Elemente beinhalten. Die maximale magnetische Energie eines Magneten ist das Produkt aus Feldstärke H [A/m] und Flussdichte B [T]. Sie wird Energiedichte BH genannt. Diese Energiedichte wird auf das Volumen des Magneten bezogen und in Kilojoule pro Kubikmeter [kJ/m^3] oder Mega-Gauss-Oersted [$MGOe$] angegeben. Die Größe, mit der die im Magnetwerkstoff verbleibende Flussdichte B nach Entfernung eines extern angelegten Magnetfeldes beschrieben wird, heißt Remanenz B_r , mit der Einheit Tesla, bzw. Gauss [$1 T = 10000 G$]. Die Koerzitivfeldstärke H_c gibt an, wie groß die Feldstärke eines externen Magnetfeldes in [A/m] sein muss, um diesen Magneten wieder vollständig zu entmagnetisieren. Sie gibt auch die Widerstandsfähigkeit gegen Entmagnetisierung bei höheren Temperaturen an. Dies ist besonders wichtig für Anwendungen in Motoren, da dort beide Arten der Entmagnetisierung (externes Magnetfeld und höhere Temperaturen) kontinuierlich auftreten.

Wie in Abbildung 1.6 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 1.6). Gleichzeitig sinkt allerdings auch die Restmagnetisierung (Remanenz). Wie die Tabelle in Abbildung 1.6 unten zeigt, steigen mit zunehmendem Anteil

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

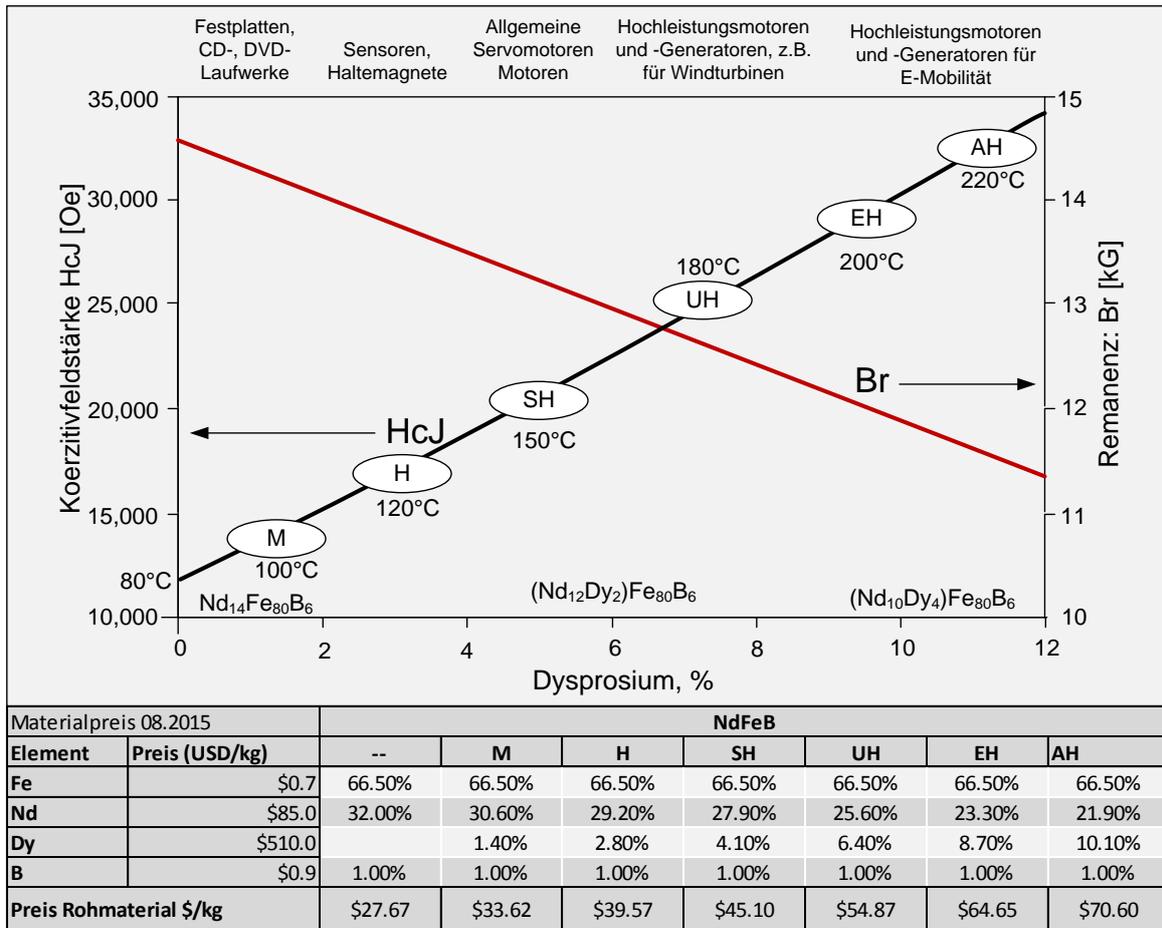


Abbildung 1.6.: Einfluss des Dysprosiumanteils auf die Magneteigenschaften (Remanenz und Koerzitivität, vergl. z.B. Constantinides, 2013; Gutfleisch et al., 2011). Die Bezeichnungen M, H, SH, UH, EH, AH sind typische Klassifizierungen von NdFeB-Magneten nach entsprechenden Einsatzbereichen.

an Dysprosium wegen des ca. 5-fachen Preises von Dysprosium gegenüber Neodym auch die Materialkosten erheblich. Dies kann sich wegen höherer Wirtschaftlichkeit auch positiv auf das Recycling auswirken.

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

Energiedichte BH:

Die Energiedichte ist die magnetische Energie, die ein Magnet im Verhältnis zu seinem Volumen aufweist. Einheit: $[kJ/m^3]$, bzw. $[MGOe]$ wobei $[1 MGOe = 7.96kJ/m^3]$. Sie entspricht, wie zuvor erläutert, dem Produkt aus Feldstärke $H [A/m]$ und Flussdichte $B [T]$ bezogen auf das Volumen.

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: Ampere pro Meter (A/m).

Remanente Polarisation J :

Die remanente Polarisation ist eine Angabe über die Magnetisierung eines Werkstoffes die er beibehält, nachdem das extern angelegte magnetische Feld entfernt wurde. Einheit: Tesla (T).

Betriebstemperatur T :

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

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, um das Pulvergemisch zusammenzuhalten. Der Vorteil polymergebundener Magnete liegt in der besseren Formbarkeit, was vor allem für Kleinmo- toren (z.B. im Automobilbereich) eine Rolle spielt. Circa 94 % der NdFeB-Magnete sind gesinterte und 6 % gebundene Magnete (Roskill, 2011, 2014, S.237). In Abbildung 1.7 wird die jährliche globale Pro- duktion 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 Selte- nen 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.

Die wichtigsten Anwendungsbereiche der Magnete werden nachfolgend kurz erläutert und bezüglich ihrer Verbrauchsmengen untersucht, was die um Literaturangaben ergänzte Marktaufteilung in Abbil- dung 1.7 bekräftigt.

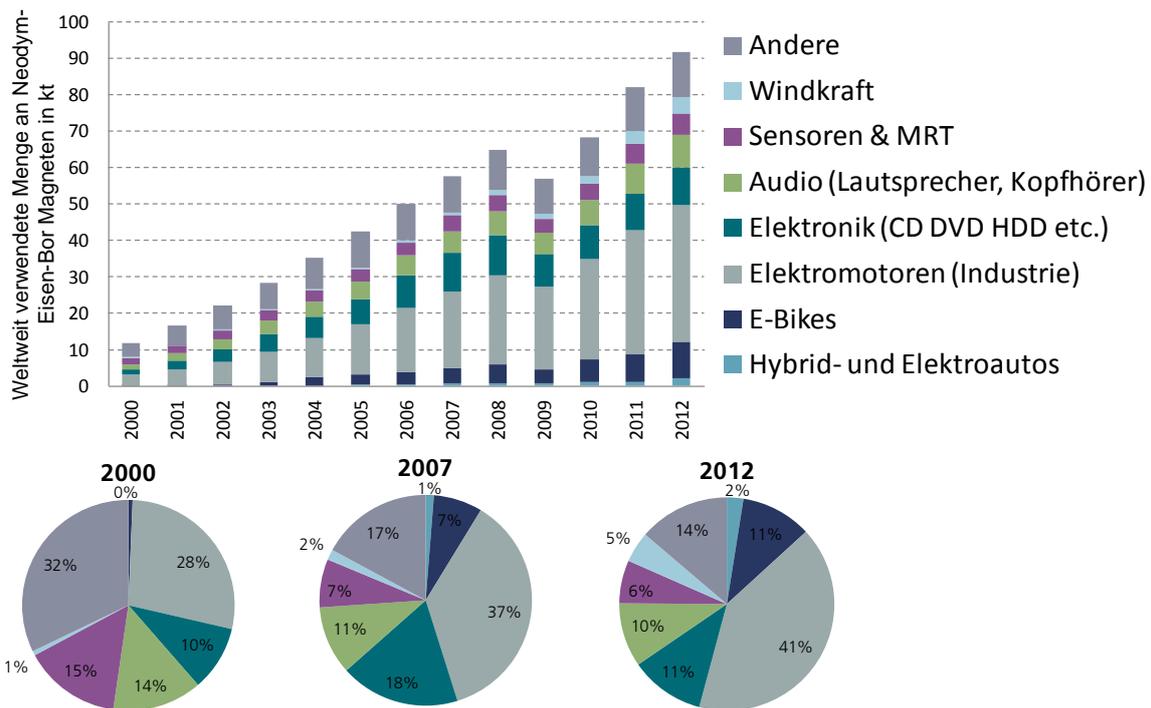


Abbildung 1.7.: Globale Produktions- und Verwendungsstrukturen von NdFeB Magneten (Daten basieren auf Gutfleisch et al., 2011; Roskill, 2011, 2014; Constantinides, 2011, 2012, 2013; Research and Markets, 2014).

Elektrische Zweiräder:

Wie in Abbildung 1.5 erläutert, lassen sich mit Hilfe von NdFeB-Permanentmagneten 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 Effizienz einsparungen 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, die die Nachfrage nach NdFeB-Magneten vorantrieben. Diese Elektrozweiräder enthalten nur relativ kleine Magnete mit ca. 0.2 - 0.5 kg (vergl. Hoenderdaal et al., 2013; Hofmann et al., 2013, Anhang Seite 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 insge-

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

samt 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 von NdFeB-Magneten von ca. 10.5 Mio. Tonnen was einem Marktanteil von etwas über 10 % entspricht (vergl. Abbildung 1.7). Während unter dem Begriff "E-Bike" grundsätzlich alle elektrischen Zweiräder zusammengefasst werden (E-Scooter, Motorräder, aber auch Fahrräder mit elektrischer Kraftverstärkung "Pedelecs"⁴), ist für die detailliertere Betrachtung eine Unterscheidung zwischen den hauptsächlich in Asien verkauften Elektrorollern und den in Europa inzwischen immer weiter verbreiteten "Pedelecs" zu machen (vergl. hierzu Abschnitt 3.2).

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. Hoenderdaal et al., 2013; Habib et al., 2014). Je nach Pkw-Segment und Motorleistung variiert die Menge an benötigtem Magnetmaterial. In Tabelle 1.2 werden verschiedenen 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 1.6).

Tabelle 1.2.: Mengenmäßige Verwendung von NdFeB bzw. Neodym für Traktionsmotoren in Elektrofahrzeugen. Die Mengenangaben zu Neodym und Dysprosium wurden nach Abbildung 1.6 berechnet wobei ca. 22-24% Neodym (mit Beimischung von Praseodym) und 8-10% Dysprosium verwendet werden.

	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 Seite 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 Kapitel 4. Dabei wird auch nochmals detailliert auf den Zusammenhang zwischen Motorleistung und Magnetmasse eingegangen. Basierend 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 Kapitel 4 allerdings dargestellt, hätte eine stärkere Diffusion alternativer Antriebe insbesondere auf die Nachfrage nach Dysprosium eine starke Auswirkung, was höchstwah-

⁴Pedelec steht für "Pedal Electric Bicycle"

scheinlich zu Substitution in anderen Bereichen, wie der Verwendung von NdFeB-Magneten in Servomotoren für allgemeine industrielle Anwendungen führen würde.

Windkraftanlagen:

Nachdem sich Windkraftanlagen (WKA) standardmäßig aus drei Teilen zusammensetzen (Rotor, Getriebe und Generator), werden seit einigen Jahren auch getriebelose 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 1.8 dargestellt. Da doppeltgespeiste Asynchronmaschinen 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").

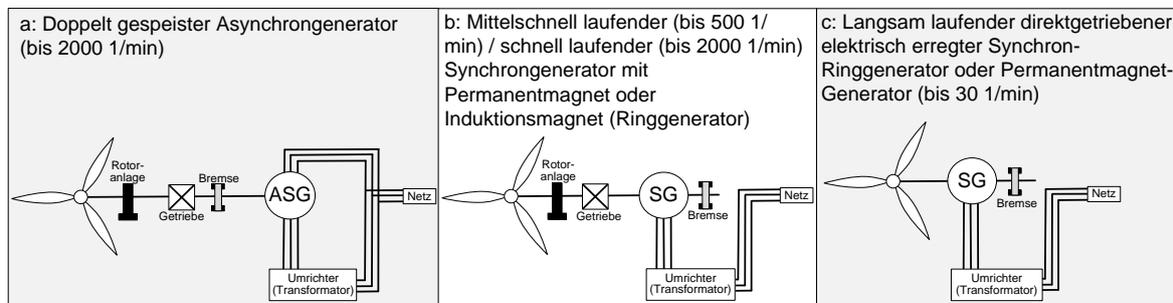


Abbildung 1.8.: Die drei grundlegenden Konzepte für Windkraftanlagen (vergl. z.B.: Buchert, 2011).

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 (vergl. z.B. 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 befindet sich im Anhang. Dieser bestätigt die Tendenz einer verstärkten Verwendung von PM-Generatoren durch führende chinesische WKA-Hersteller.

Bei Synchronmaschinen mit Direktantrieb (Abbildung 1.8c) werden ca. 650 kg Magnetmasse pro MW Leistung verwendet (Buchert, 2011). Da diese Anlagen, insbesondere die Offshore-Anlagen, häufig mehr als 5MW 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 1.8b dargestellt. Dieses Konzept benötigt wegen des kleineren Generators nur ca. 100 kg/MW an Magnetmasse (Buchert, 2011). In Abbildung 1.9 sind die jährlich neu installierten Kapazitäten von Windkraftanlagen (a) und deren

Verteilung nach Ländern im Jahr 2012 (b) dargestellt.

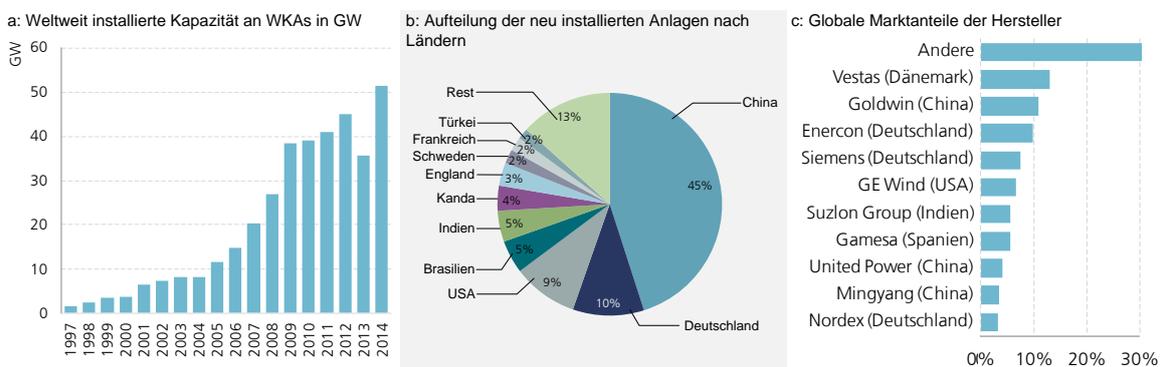


Abbildung 1.9.: Weltweit installierte Leistung von Windkraftanlagen und deren Verteilung nach Ländern (Daten basieren auf Global Wind Energy Council (GWEC) 2015).

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 circa 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 im Anhang 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 1.7) von 3-4 % ausmacht. 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. Tabellen im Anhang) 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 in dieser Arbeit daher auf ca. 5% geschätzt (vergl. neben der obigen Erläuterung z.B. Constantinides, 2013), obwohl auch hier sehr unterschiedliche Werte zwischen 2% (Hoenderdaal et al., 2013; Habib und Wenzel, 2014) 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 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., 2012a; Hoenderdaal et al., 2013; Habib und Wenzel, 2014).

Elektronik und Audio:

Der Bereich der Verwendung von NdFeB-Magneten in Kleinmotoren für die Elektronikindustrie (von der HDD-Festplatte (Hard-Disk-Drive), über CD- und DVD-Player bis hin zu Kleinmotoren für Vibrationsalarm-

Funktionen in Mobiltelefonen), aber auch für Magnete in Lautsprechersystemen, Kopfhörern etc. bildeten in den ersten Jahren des 21. Jahrhunderts die wichtigsten Anwendungsbereiche für NdFeB-Magnete (vergl. Abbildung 1.5). 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). 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 3.1), 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 Soundsystemen") 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 bis hin zu Pump-Systemen oder Elektromotoren für Aufzüge- und Rolltreppen. Auch spielen hier Kleinmotoren für konventionelle PkW, vom Lenkungsmotor für die Servo-Lenkung über Scheibenwischermotoren bis hin zu Motoren für die elektrische Sitzverstellung eine nicht unerhebliche Rolle (Wilde, 2008; Gieras, 2010, S.58 ff.). Insgesamt ist es allerdings enorm schwierig die genaue Menge an NdFeB-Magneten zu bestimmen, da in nahezu allen Bereichen auch Alternativen in Form sonstiger Permanentmagnete wie Ferrite (vergl. Abbildung 1.7) 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 auf ca. 40 % der Gesamtproduktion geschätzt (vergl. Abbildung 1.7, sowie Roskill, 2011, 2014; Gutfleisch et al., 2011; Constantinides, 2013).

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.

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.

Weitere 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 (U.S. Geological Survey, 2011, vergl. auch Abbildung 1.2). Auf Grund der unterschiedlichen Erz-Zusammensetzung nach Mine und Region (siehe auch Abbildung 1.4) sowie der weit höheren Preise schwerer Seltener Erden wie Dysprosium, Terbi-um 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 1.10).

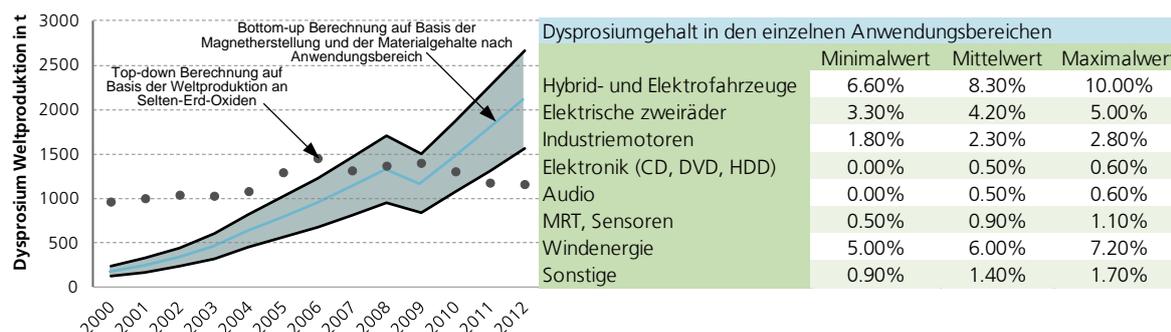


Abbildung 1.10.: Top-down (als Anteil der Gesamtproduktion an SEO) und Bottom-up (Auf Basis der Produktions- und Verwendungsmengen von NdFeB-Magneten) Berechnung der industriell verarbeiteten Dysprosiummengen.

Dies spiegelt die problematische Datenlage hinsichtlich der tatsächlichen Produktion einzelner Seltener Erden wider. Dabei wirkt sich sowohl die Tatsache, dass es sich bei Seltenern Erden um 17

⁵U.S. Geological Survey

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 Seltenen Erden weit höher liegen. So wird davon ausgegangen, dass nach wie vor zwischen 10 und 20 kt an SEO in China inoffiziell gefördert werden (Kingsnorth, 2014). Da ein Großteil des illegalen Bergbaus in den HREE-reichen südchinesischen Minen stattfindet (vergl. z.B. Wübbeke, 2013, siehe auch Abbildung 1.4), 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 1.10 berechneten Verbrauchsmengen trotz der niedrigeren Einschätzungen seitens der geologischen Dienste realistisch. 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 1.11 dargestellt.

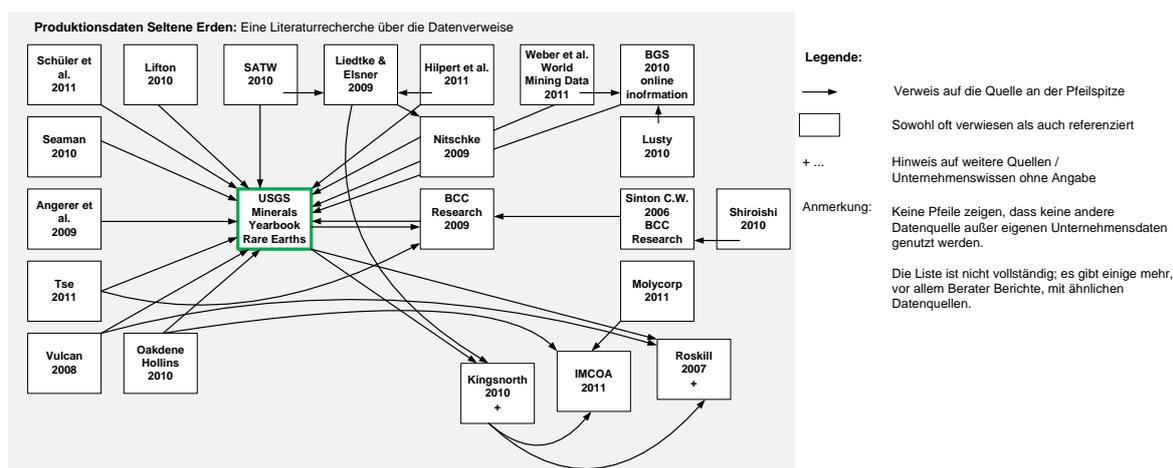


Abbildung 1.11.: Vernetzung verschiedener Berichte, Marktanalysen und Studien zur Produktion Seltenen Erden (vergl. Zepf, 2013, S.52). Wie hier gezeigt, beziehen sich nahezu alle Studien und Publikationen direkt oder indirekt auf die Zahlen des USGS (U.S. Geological Survey, 2014), die wiederum auf den 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. Die Ergebnisse des globalen Stoffstrommodells für NdFeB-Magnete sowie für Neodym und Dysprosium werden im Folgenden vorgestellt.

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 Kapitel 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.

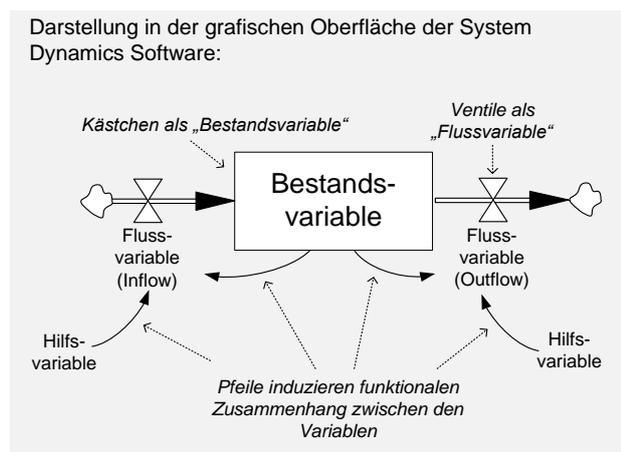
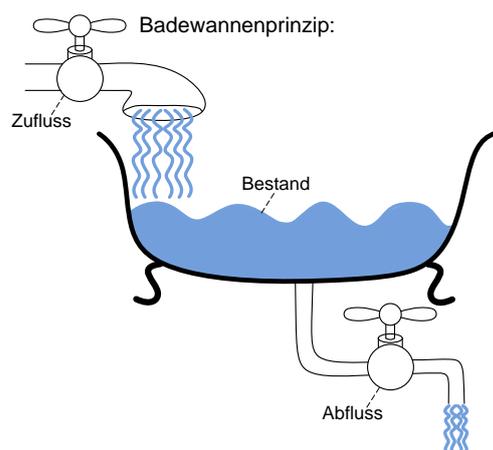


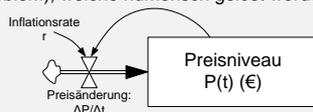
Abbildung 2.1.: Das Badewannenprinzip zur Veranschaulichung von Bestands- und Flussvariablen sowie die Darstellung der verschiedenen Variablentypen innerhalb der System-Dynamics Entwicklungsumgebung (vergl. Sterman, 2000, S.52).

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 2.1). 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 2.1 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 2.2 zeigt die grundsätzliche Implementierung von Rückkopplungs- und Verzögerungseffekten.

Rückkopplungen (Feedbacks), die zu einem System von Differenzialgleichungen 1. Ordnung führen (reines Anfangswert-Problem), welche numerisch gelöst werden.



$$\text{Differenzialgleichung: } \frac{\partial P(t)}{\partial t} = f(P(t)) = r \cdot P(t)$$

Einfachste numerische Lösung über das explizite Euler-Verfahren

$$P_{t+1} = [(Preisänderung_t) \cdot \Delta t] + P_t$$

mit Preisänderung_t = f(P_t) = P_t · r

Zeitliche Verzögerungen, z.B. Materialakkumulation über Verwendungsdauern:



$$B_t = \sum_{t=t_0}^t (P_t - S_t) + B_{t_0}$$

Verzögerung mit fixer durchschnittlicher Verwendungsdauer mit $S_t = P_{t-1}$ und 1 als durchschnittliche Verwendungsdauer

Abbildung 2.2.: Rückkopplungen, die zu einem System aus Differenzialgleichungen 1. Ordnung führen, welches dann als reines Anfangswertproblem numerisch gelöst wird.

Wie nachfolgend erläutert, eignet sich dieser Ansatz 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.

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 Produktverwendungsdauern 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 aus der Differenz aus Gesamtproduktion und Primärproduktion errechnet werden. Was allerdings nicht bestimmt werden kann ist die Frage, 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 2.3 und Abbildung 2.4 beschriebenen Prinzip herangezogen werden. Die Abschätzung des Schrottaufkommens erfolgt als Verzögerungsfunktion historischer Produktionszahlen (vergl. Abbildung 2.3).

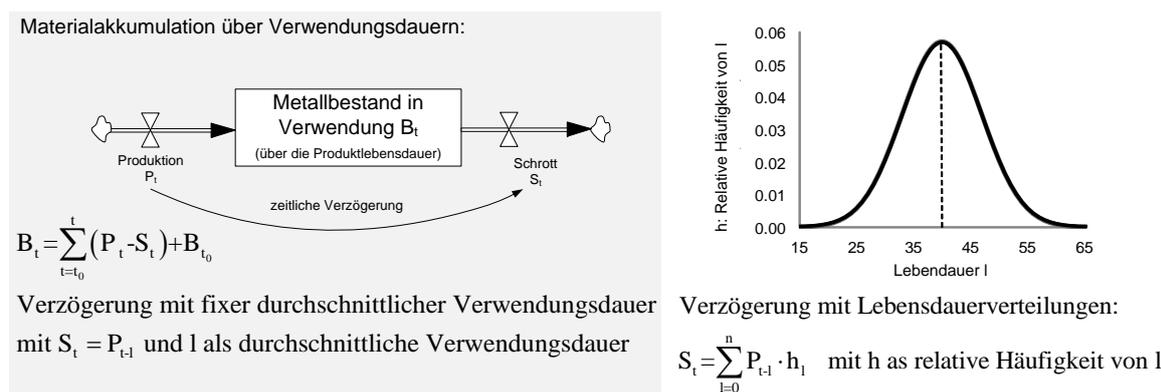


Abbildung 2.3.: Akkumulation von Produkten und Materialien über die Verwendungsdauern mit Hilfe von fixen durchschnittlichen Verwendungsdauern bzw. Verteilfunktionen.

Gelangen obsoletere Produkte (alte Elektroware, Altfahrzeuge etc.) in falsche Abfallkanäle (z.B. alte Mobiltelefone in den Hausmüll und dann in Müllverbrennungsanlagen), oder werden als Gebrauchsgüter 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 Mikrokondensatoren 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 2.4 beschriebene “Aging Chain” herangezogen werden.

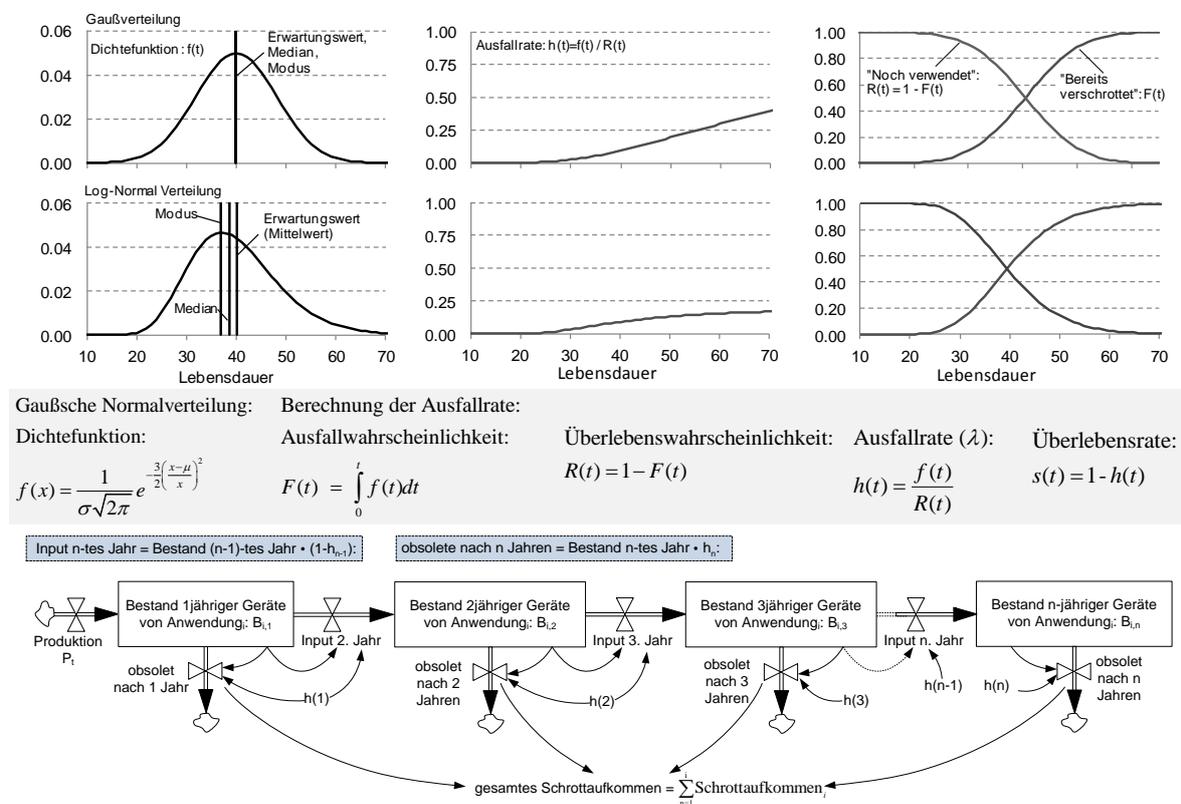


Abbildung 2.4.: Detaillierte Simulation von Produktlebenszyklen und Alterungsprozessen über sogenannte “Aging Chains” und korrespondierende Ausfallwahrscheinlichkeiten.

Auf Basis historischer Produktions- und Verkaufszahlen werden die Materialien (bzw. Produktbestände) für jeden Zeitschritt simuliert, wobei am Ende des Zeitschrittes die Materialien entweder der Verschrottung zugeführt werden, oder in den Bestand nächst höheren Alters fließen. Die jeweiligen Ausfallraten lassen sich aus den angesetzten Verteilfunktionen nach dem in Abbildung 2.4 dargestellten Prinzip berechnen. Während in Abbildung 2.4 das Beispiel der Gaußschen Normalverteilung sowie

einer rechtschiefen Log-Normalverteilung aufgeführt ist, werden im Anhang (Abbildung A.1) 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 Altfahrzeugen 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 2.5 dargestellt.

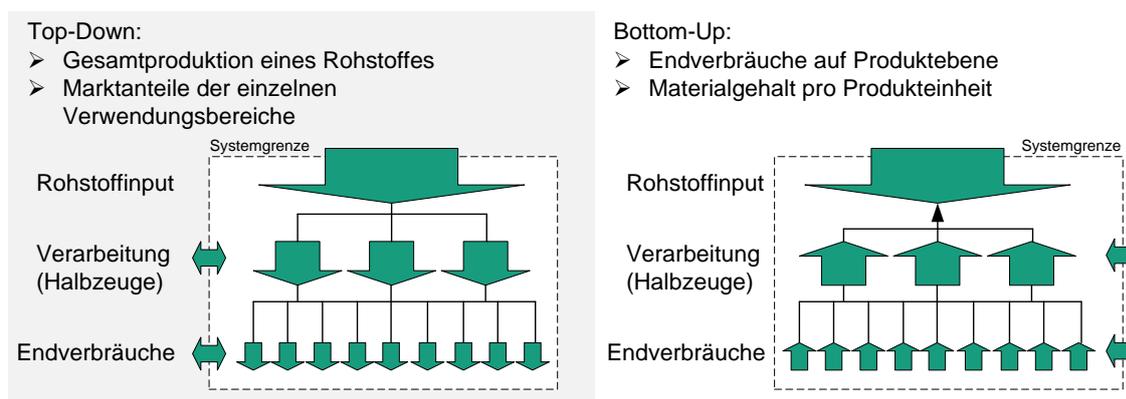


Abbildung 2.5.: Top-down und Bottom-up-Ansätze zur Modellierung von Materialflüssen.

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 (vergl. 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. kg Kupfer 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 2.6).

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 (vergl. z.B: 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 kaum Flexibilität Seitens des Angebots besteht. Insgesamt lassen sich aus der Literatur die in Abbildung 2.6 zusammengefassten Kausalitäten formulieren. Dabei stellt Abbildung 2.6a eine Erweiterung des klassischen Regelkreises der Rohstoffversorgung dar, während Abbildung 2.6b ein Kausaldiagramm dieses erweiterten Regelkreises an Rohstoffmärkten zeigt.

Auf Basis dieser Zusammenhänge und Rückkopplungseffekte werden die im folgenden Kapitel (Kapitel 3) vorgestellten Stoffstrommodelle in Kapitel 4 um marktdynamische Effekte ergänzt. Diese Kombination auf physischen Stoffstrommodellen und Marktdynamiken ermöglicht eine verhältnismäßig

realistische und auf verschiedenste Problemstellungen anwendbare Modellierung von Rohstoffsystemen.

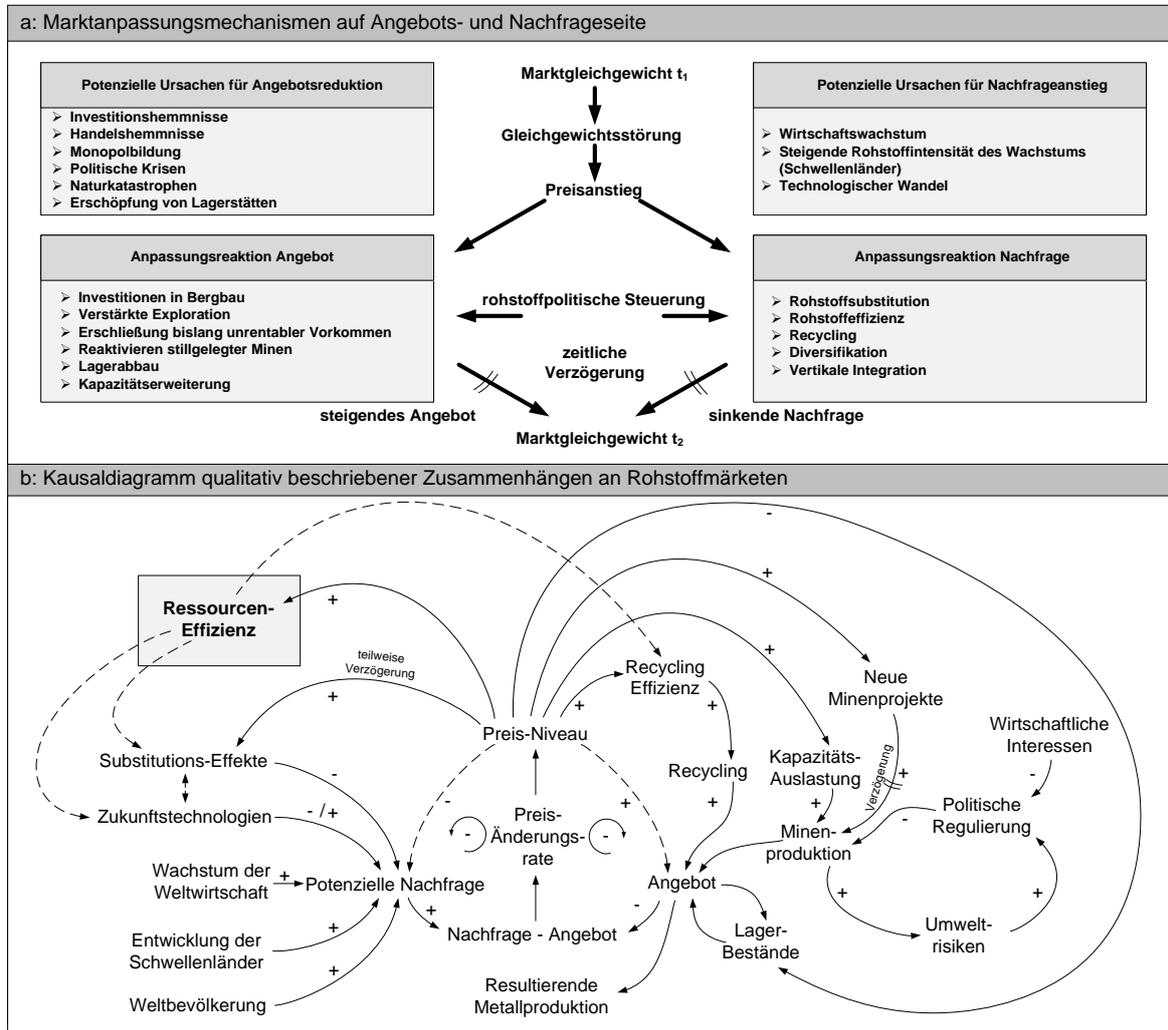


Abbildung 2.6.: Anpassungseffekte an Rohstoffmärkten.

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

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

3. Ergebnisse der dynamischen Stoffstrommodelle

Die Ergebnisse der Stoffstrommodelle nach der zuvor beschriebenen Methodik werden nachfolgend vorgestellt.

3.1. Globales Modell der Neodym- und Dysprosium-Materialflüsse

Die grundlegende Struktur des globalen Stoffstrommodells für Neodym und Dysprosium, bzw. für NdFeB-Magnete, ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Auf Basis der Produktionsdaten der vergangenen 15 Jahre wird über einen Top-down-Ansatz der Verwendungszyklus in den einzelnen Bereichen, basierend auf den zuvor diskutierten Produktionsdaten (vergl. Abbildung 1.7) 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.

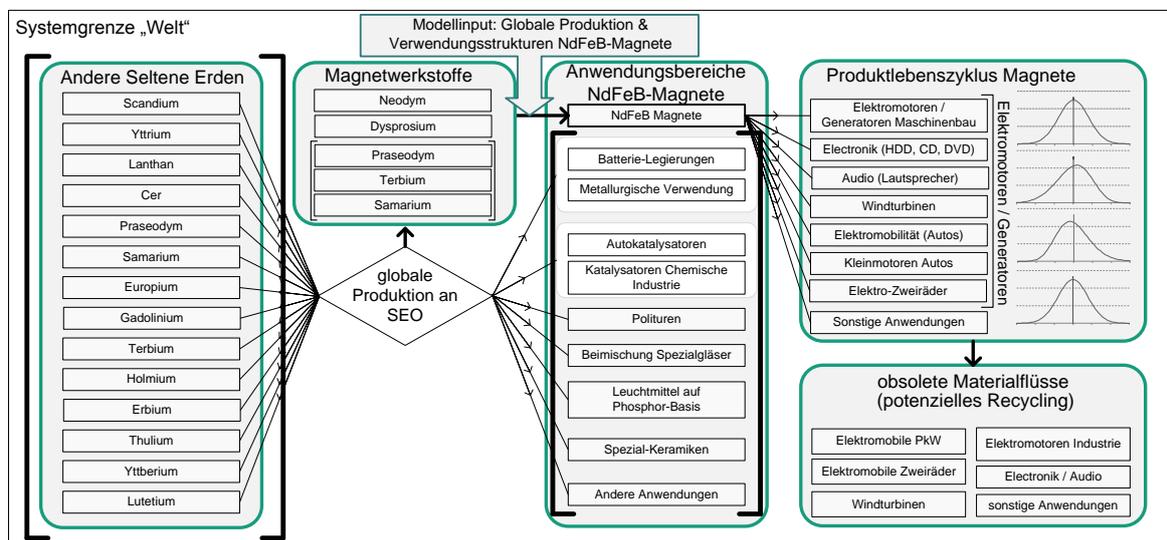


Abbildung 3.1.: Struktur des globalen Stofffluss-Modells für Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe und Abgrenzung von der restlichen Wertschöpfung von Seltene-Erd-Elementen.

Tabelle 3.1 zeigt die literaturbasierten Annahmen zu den Verwendungsdauern in den verschiedenen Anwendungsbereichen von NdFeB-Magneten.

Tabelle 3.1.: 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	9

Im Modell wurden aufgrund mangelnder Daten zu genauen Verläufen der Verteilfunktionen analog zu den zuvor vorgestellten globalen Modellen von Gaußschen Normalverteilungen ausgegangen. Zentrale Ergebnisse des globalen Magnetmodells sind in Abbildung 3.2 zusammengefasst.

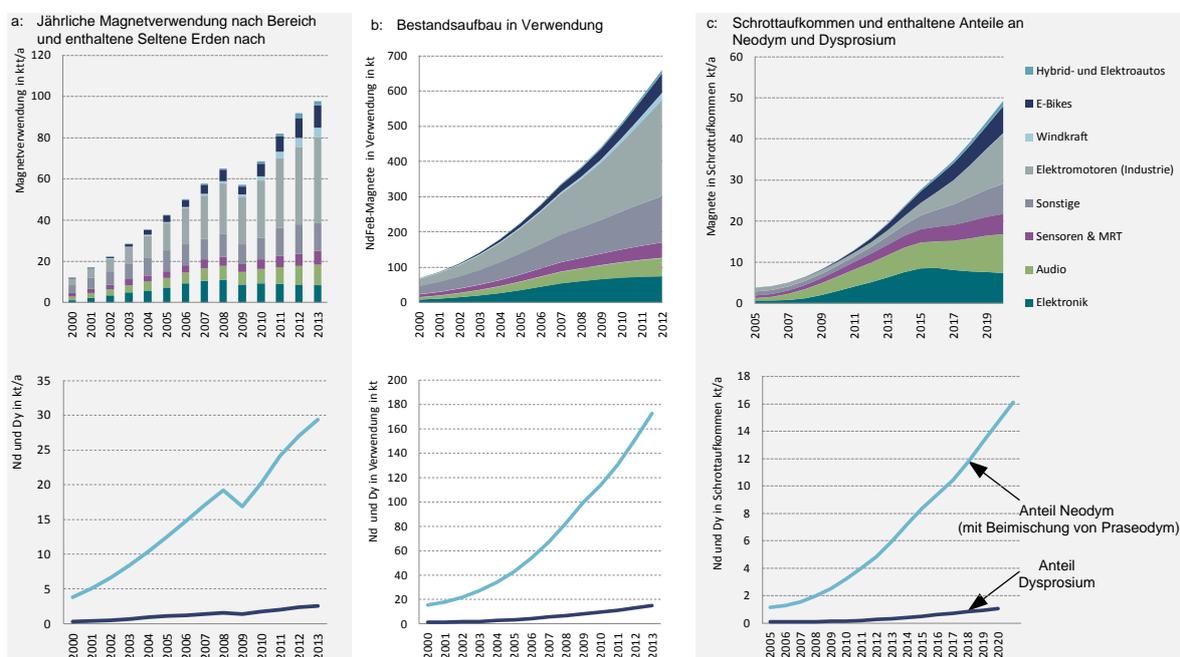


Abbildung 3.2.: Ergebnisse des globalen Stoffstrommodells für NdFeB-Magnete.

- a: Jährlich verbrauchte Menge an Magneten sowie die enthaltenen Seltene-Erd-Elemente.
- b: Bestand an NdFeB-Magneten in Verwendung.
- c: Obsolete Materialströme.

Die Zusammensetzung der Magnete nach Anwendungsbereich (insbesondere hinsichtlich des Dysprosiumanteils) entspricht den in den Abbildung 1.6 und 1.10 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 1.6).

Allerdings ist Terbium noch knapper und teurer als Dysprosium (vergl. Abbildung 1.2) und wird zusammen mit Europium in erster Linie für die Herstellung von Leuchtstoffen in Energiesparlampen verwendet (siehe hierzu auch Tabelle 1.1). 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.

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 Audiobereich (vergl. Abbildung 3.2c) 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.

Inwiefern Magnetrecycling aus verschiedenen Anwendungsbereichen zur Rohstoffversorgung in Deutschland beitragen kann, wird im folgenden Abschnitt über einen technologiespezifischen Bottom-up-Ansatz analysiert.

3.2. Neodym und Dysprosium in der deutschen industriellen Wertschöpfung

Die Datengrundlage bezüglich der Verarbeitung von NdFeB-Permanentmagneten, bzw. Seltener Erden insgesamt, ist eher spärlich. Über die Güterklassifikationen in den Handels- und Produktionsdaten lassen sich weder einzelne Seltener-Erd-Elemente noch NdFeB-Magnete von Ferriten oder AlNiCo Magneten unterscheiden. Daher kann eine Abschätzung des direkten Verbrauchs an Neodym und Dysprosium in Deutschland nur über eine Herstelleranalyse erfolgen. Eine Zusammenstellung verschiedener Unternehmen der deutschen Magnetindustrie ist in Tabelle 3.2 gegeben.

Da die Unternehmen kaum Daten zu ihren Produktionsmengen nennen¹, bleibt lediglich eine grobe Abschätzung der Kapazitäten. Insgesamt ist die europäische Produktion von NdFeB-Magneten nahezu vollständig auf deutsche Hersteller zurückzuführen (Roskill, 2011, 2014, S.267 ff.). Diese wird auf ca. 2000 t/a geschätzt (vergl. Du und Graedel, 2011), wobei die Kapazitäten des größten europäischen Herstellers, der Vakuumschmelze in Hanau, bei bis zu 5000 t/a an gesinterten NdFeB-Magneten liegen (vergl. Roskill, 2011, 2014, S.267). Da die Vakuumschmelze, wie auch weitere Unternehmen aus Tabelle 3.2 neben dem Produktionsstandort Deutschland auch in China eigene Produktionsstätten betreiben, oder Partnerschaften mit chinesischen Herstellern haben, ist es kaum möglich, genaue Zahlen zum Produktionsvolumen in Deutschland zu bekommen. Dies hängt auch damit zusammen,

¹Gezielte Anfragen bei einzelnen Unternehmen wurden nicht eindeutig beantwortet.

Tabelle 3.2.: Hersteller von NdFeB-Magneten in Deutschland basierend auf Firmendatenbanken und eigener Recherche.

Unternehmen	Beschreibung/Bemerkung	geschätzte Kapazität in Deutschland (NdFeB Magnete in t)
VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG	Größter europäischer Hersteller von NdFeB-Magnete im Sinterverfahren, Tochtergesellschaften weltweit	ca. 1500t in Deutschland (Erdmann et al., 2011, Anhang, S.142), Kapazitäten von bis zu 5000t (Roskill, 2011, 2014, S.267)
MS Schramberg GmbH	Hersteller von polymergebundenen NdFeB-Magneten	ca. 150t in Deutschland (Roskill, 2011, 2014, S.267)
ThyssenKrupp Magnettechnik, Geschäftsbereich der ThyssenKrupp Schulte GmbH	Vertrieb von gesinterten NdFeB-Magneten	Produktionsmenge in Deutschland unklar, wahrscheinlich reine Importware
Tridelta Magnetsysteme GmbH	Produktion und Vertrieb von polymergebundenen und gesinterten NdFeB-Magneten (Übernahme von Teilen der Thyssen Krupp Magnettechnik)	Produktionsmenge unklar, höchst wahrscheinlich keine Sintermagneten in Deutschland
Kolektor Magnet Technology GmbH	Herstellung von polymergebundenen NdFeB-Magneten in Deutschland, Vertrieb von gesinterten NdFeB-Magneten aus China	Produktionsmenge unklar
Magnetfabrik Bonn GmbH	Herstellung von polymergebundenen NdFeB-Magneten in Deutschland, Vertrieb von gesinterten NdFeB-Magneten aus China	Produktionsmenge unklar
MAX BAERMANN GmbH	Herstellung von polymergebundenen NdFeB-Magnete in Deutschland	Produktionsmenge unklar
Gussmagnete Bitterfeld GmbH, Schallkammer Magnetsysteme GmbH, Veekim AG, DST Dauermagnet-System Technik GmbH, Calamit Magnete GmbH, Magnequench GmbH (weitere kleine Handelsunternehmen werden hier nicht gelistet)	Unternehmen, die zwar teilweise Ferrite und AlNiCo Magnete in Deutschland fertigen, aber offensichtlich ausschließlich mit importierten NdFeB-Magneten (aus China) handeln	keine Produktion in Deutschland

dass Seitens der Industrie kein Interesse besteht, genaue Produktionsmengen offenzulegen (vergl. insbesondere Buchert et al., 2013; Bast et al., 2014). Allerdings gibt es in Deutschland neben der Vakuumschmelze eine Reihe mittelständischer Unternehmen (vergl. Tabelle 3.2), die sich auf polymergebundene Magnete spezialisiert haben. Diese Magnete weisen zwar eine etwas geringere Energiedichte als gesinterte Magnete auf, lassen sich aber einfacher in bestimmte Formen pressen. Dies ist insbesondere bei kleineren Synchronmotoren, wie sie z.B. im Automobilbereich (Scheibenwischer, elektrische Sitzverstellung etc.) eingesetzt werden, von Vorteil. Zwar produzieren diese Unternehmen verhältnismäßig geringe Mengen von ca. 50-100 t/a an polymergebundenen NdFeB-Magneten, dennoch hängt eine relativ große Wertschöpfungskette an diesen Magneten.

Wieviel fertige NdFeB-Magnete, aber auch entsprechende PM-Synchron-Servomotoren nach Deutschland importiert werden, ist auf Basis herkömmlicher Produktions- und Güterklassifikationen aufgrund

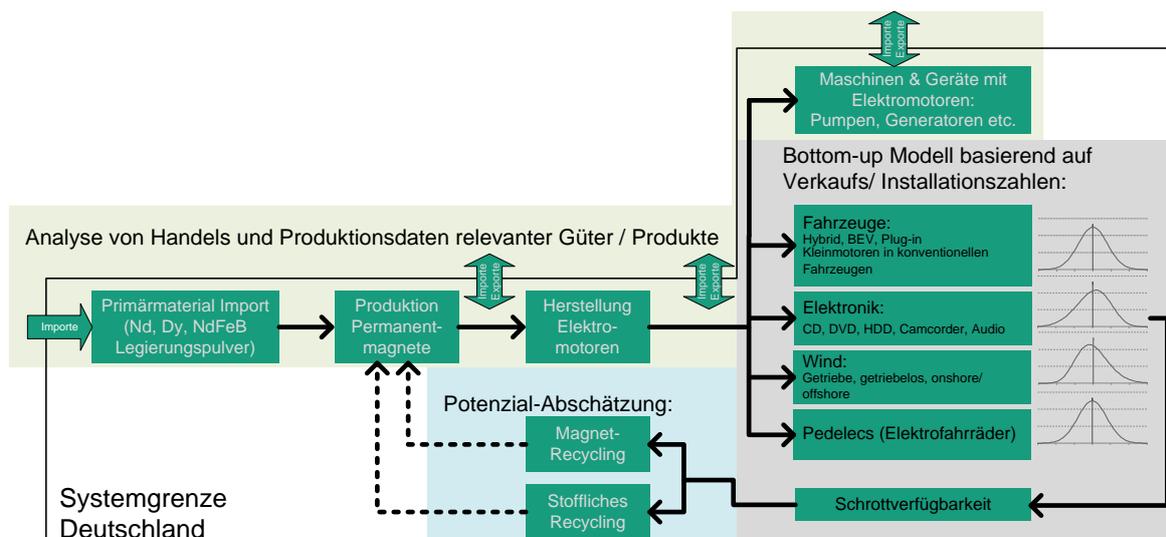


Abbildung 3.3.: Struktur der Stoffstromanalyse für Neodym und Dysprosium in Deutschland. Aufgrund der schlechten Datenlage wird lediglich eine Bottom-up-Modellierung basierend auf die Bereiche Automobil, Elektronik, Wind und Elektrofahrräder umgesetzt. Für die anderen Wertschöpfungsstufen werden Modell-unabhängige Analysen von Handels- und Produktionszahlen durchgeführt.

mangelnder Produktspezifikationen nicht nachvollziehbar (vergl. auch Buchert et al., 2013). Hier können lediglich allgemeine Handelsbilanzen und Produktionsstatistiken entlang der Wertschöpfung betrachtet werden, was einen gewissen Rückschluss auf Rohstoff- und Materialbedarfe ermöglicht.

Zur Analyse des Recyclingpotenzials von NdFeB-Magneten, bzw. Neodym und Dysprosium in Deutschland wurde ein Bottom-up-Ansatz auf Basis von deutschen Verkaufszahlen, Zulassungszahlen etc. umgesetzt. Dabei wurden, wie in Abbildung 3.3 gezeigt, die Bereiche Elektronik (Computer, Laptops, Mobiltelefone, Smartphones, Tablets, DVD & und CD-Player, Digitalkameras etc.), Audio (Kopfhörer & Soundsysteme & Lautsprecher), Pkw (Kleinmotoren in konventionellen Automobilen sowie alternative Antriebskonzepte mit großen Traktionsmotoren), Windenergieanlagen sowie Pedelecs (Fahrräder mit elektrischer Kraftverstärkung) berücksichtigt.

Dies sind zwar nur ausgewählte Anwendungs-Bereiche von NdFeB-Magneten, wobei ein erheblicher Teil der Magnete in kleinen Synchron-Servomotoren verschiedenster Industrieprodukte (Haushaltsgeräte, Waschmaschinen, Elektro-Werkzeuge, Pumpen etc.) steckt, da in diesen Bereichen aber auch Ferrit-Magnete, elektrisch erregte Synchron- und Asynchronmotoren (vergl. auch Abbildung 4.6) eingesetzt werden, erscheint eine sinnvolle Quantifizierung der Verwendungsmengen an NdFeB-Magneten auf Basis von Produktions- und Verkaufszahlen (Bottom-up-Ansatz) unmöglich. Hier müssten systematisch Stichproben an Altgeräten durchgeführt werden, wobei zu beachten ist, dass der Anteil der Verwendung von PM-Synchronmotoren mit NdFeB-Magneten aufgrund des höheren Wirkungsgrades und der kompakteren Bauweise seit der Jahrtausendwende kontinuierlich zugenommen hat, also davon auszugehen ist, dass in neueren Geräten auch häufiger PM-Synchronmotoren verbaut werden.

NdFeB Permanentmagnete in Elektronikprodukten in Deutschland

Da, wie bereits auf globaler Ebene gezeigt, das aktuelle Aufkommen von NdFeB-Magneten in Altprodukten von Elektronikanwendungen (PCs, Laptops, CD- und DVD-Player etc.) geprägt ist, und zu Konsumelektronik fundierte Verkaufszahlen der vergangenen Jahre existieren, lassen sich in diesem Bereich über den Bottom-up-Ansatz relativ gute Schätzungen zu den verwendeten Magnetmengen durchführen. Da insbesondere der Elektronikschrott aus diesen kleineren Geräten häufig nicht in die richtigen Recyclingkanäle gelangt, eignet sich der Modell-Ansatz gut zur Analyse von Recyclingpotenzialen, die durch entsprechende Optimierung des Sammelsystems besser ausgeschöpft werden könnten². Die Verkaufszahlen von Elektronikprodukten in Deutschland, die teilweise, oder hauptsächlich NdFeB-Magnete enthalten sind in Abbildung 3.4a zusammengefasst. Wie bereits erwähnt, werden Synchron-Servomotoren mit NdFeB-Magneten in der unteren Leistungsklasse bis 10kW in verschiedenen Bereichen, unter anderem für Konsumelektronik-Anwendungen verwendet (Küchengeräte, Staubsauger, Rasierapparate, Werkzeuge, elektrische Zahnbürsten etc.). Da in diesen Bereichen auch Synchron- und Asynchron-Induktionsmotoren sowie andere Magnetwerkstoffe wie Ferrite eingesetzt werden, erscheint es unmöglich über eine bottom-up Analyse wie sie hier durchgeführt wird fundierte Schätzungen zu verwendeten Materialmengen zu bekommen. Tabelle 3.3 zeigt die für die bottom-up Analyse zu Grunde gelegten Materialgehalte.

Tabelle 3.3.: Literaturbasierte Annahmen zu Materialgehalten (NdFeB-Magnete) in Elektronikanwendungen. Beimischungen an Praseodym werden hier ebenfalls zum Neodymanteil gezählt.

Produkt	Materialgehalt in g Magnetmasse	Anteil NdFeB-haltiger Komponenten in %	Quelle
Desktop PC	15-20 (HDD, CD, Lautsprecher)	100	(Böni et al., 2015; Sprecher et al., 2014; Zepf, 2013; Westphal et al., 2014; Habib et al., 2014)
Laptop / Notebook	10-15 (HDD, CD, Lautsprecher)	90	(Böni et al., 2015; Sprecher et al., 2014; Zepf, 2013; Habib et al., 2014)
CD/DVD Player	10	100	(Böni et al., 2015; Habib et al., 2014)
Spiel-Konsole	10	100	(Böni et al., 2015; Habib et al., 2014)
Kopfhörer	1-5	30	(Westphal und Kuchta, 22.03.2012)
Soundsysteme (Lautsprecher-Boxen)	50	10-20	(Westphal und Kuchta K., 2013; Habib et al., 2014)
Kameras	3	100	eigene Schätzung
Drucker	5-25	100	eigene Schätzung
Mobiltelefone	1-2	100	(Westphal et al., 2014; Zepf, 2013; Habib et al., 2014, S.466)
Smartphones	1-2	100	(Westphal et al., 2014; Zepf, 2013; Habib et al., 2014, S.466)
Tablets	1-2	100	eigene Schätzung
MP3-Player	1-2	100	eigene Schätzung

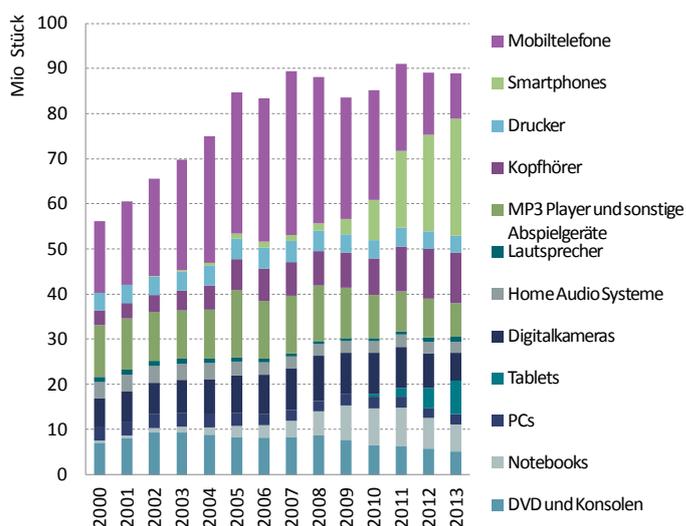
Der Dysprosiumanteil in den Kleinmotoren von Elektronikanwendungen ist gering und reicht von 0-2% (Habib et al., 2014, vergl. auch Abbildung 1.6). Im Modell wird pauschal mit 1% Dy-Anteil gerech-

²z.B. durch die Einführung einer Wertstofftonne für Elektroschrott, eines Pfandsystems für Elektronikware etc.

net. Aufgrund der Variation in den Stichproben und der unterschiedlichen Bemessungsgrundlagen (Gewicht der Magnete, Menge des rückgewinnbaren Neodyms) weichen die jeweiligen Quellen teilweise relativ stark voneinander ab. Da der Großteil der NdFeB-Magnete in PCs und Notebooks, sowie optischen Laufwerken verbaut ist, für die gute Werte vorhanden sind, ist die Auswirkung dieser Abweichungen auf die Modellergebnisse relativ gering. Bei Angabe von Bereichsspannen wurde im Modell mit dem Mittelwert gerechnet. Weiterhin ist bei Laptops und PCs davon auszugehen, dass erst seit 2010 der Anteil an SSD (Solid State Drive) Speichern ohne NdFeB-Magnete langsam ansteigt (vergl. Sprecher et al., 2014). Dies spielt für heutige Recyclingmengen allerdings noch keine Rolle.

Insgesamt ergeben sich auf Basis dieser Datengrundlage die in Abbildung 3.4b dargestellten Materialströme innerhalb der betrachteten Elektronikprodukte, woraus sich über die Simulation der Produktlebenszyklen ein theoretisch maximales Recyclingpotenzial errechnen lässt (siehe hierzu Abschnitt 3.2).

a: Verkaufszahlen Kleinelektronik



b: Enthaltene Materialmengen

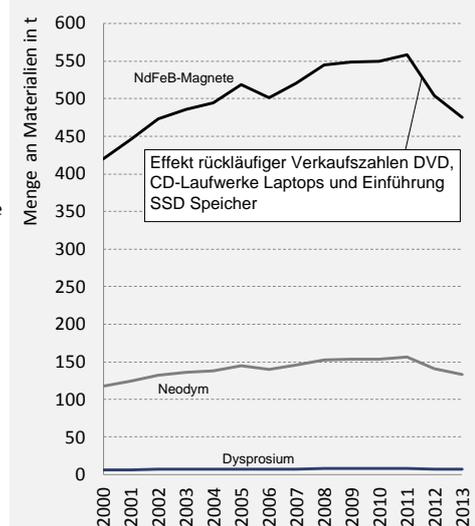


Abbildung 3.4.: Deutsche Verkaufszahlen ausgewählter Elektronikprodukte und deren aggregierte Gehalte an NdFeB-Magneten.

a: Verkaufszahlen Konsumelektronik in Deutschland. Daten basieren auf Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien (Bitkom) und Consumer Electronics Market Index (Cemix)

b: Enthaltene Magnet- und Selten-Erd-Ströme basierend auf den Annahmen in Tabelle 3.3.

NdFeB Permanentmagnete in Automobilen (Pkw)

Neben den Traktionsmotoren für Hybrid- und Batterie-elektrische Fahrzeuge enthalten auch konventionelle Pkws nicht zu vernachlässigende Mengen an Magnete in kleinen Elektromotoren. Dabei kann

für Elektrofahrzeuge von 1-3kg Magnetmasse pro Traktionsmotor ausgegangen werden (vergl. Tabelle 1.2, wobei die im Modell zu Grunde gelegten Magnetgrößen nach Technologie und Fahrzeugsegment in Abbildung 4.7 dargestellt sind).

Eine klare Quantifizierung der Mengen an NdFeB-Magneten in konventionellen Pkw ist nicht eindeutig möglich, dennoch ist davon auszugehen, dass nahezu jeder moderne Pkw kleinere NdFeB-Magnete in einigen der zahlreichen Elektromotoren enthält (vergl. Tabelle A.1). In Pkws aus den oberen Preissegmenten werden heute weit über 100 verschiedene Elektromotoren für Komfort (z.B. automatische Sitz-, Rückspiegel-, Scheinwerfer- und Lenkradeinstellung), Sicherheit (ABS, ESP, Scheibenwischer usw.) und Funktionalität (Anlasser, Lenkungsmotor, Kraftstoffpumpe) verbaut. Einige dieser Motoren sind im Anhang in Tabelle A.1 zusammengetragen. Natürlich kommen hier häufig Ferrit-Magnete zum Einsatz, auch werden oft reine Induktionsmotoren ohne Permanentmagnet verbaut, dennoch werden aufgrund der kompakteren Bauweise und der damit verbundenen Materialeinsparungen (weniger Gehäuse, kleinere Kupfer-Spulen) in vielen Bereichen unter anderem NdFeB-Magnete (gesintert und Kunststoff-gebunden) verbaut. Elektromotoren in konventionellen Pkw, die bevorzugt auf NdFeB-Magneten basieren sind insbesondere Lenkungsmotoren für die Servolenkung, Motoren für die automatische Kupplung und Schaltung sowie Kleinmotoren im Komfortbereich, wie die automatische Sitzverstellung, Spiegel- und Scheinwerferausrichtung etc. (vergl. z.B. Wilde, 2008).

Hier ist auch zu berücksichtigen, dass eine gewisse Flexibilität in der Materialverwendung besteht. So wurden aufgrund der extremen Preisanstiege für Neodym 2010-2011 wieder vermehrt Ferrit-Magnete, bzw. reine Induktionsmotoren verbaut, während die Automobilzulieferer inzwischen wieder verstärkt auf NdFeB-Magnete zurückgreifen³. Derartige Effekte erschweren eine Schätzung der Verwendungsmengen von NdFeB-Magneten zusätzlich. Die Literaturwerte zur durchschnittlichen Menge an NdFeB-Magneten in konventionellen Pkw variieren, wie in Tabelle 3.4 dargestellt, relativ stark. Dies liegt auch daran, dass es einen erheblichen Unterschied macht, ob aktuelle Verwendungsmengen von NdFeB-Magneten in konventionellen Pkw betrachtet werden, oder aktuelle Altauto-Schredderfraktionen. Da NdFeB-Magnete erst seit der Jahrtausendwende in Pkw verbaut werden und ihre Verwendungsmenge seitdem kontinuierlich angestiegen ist, zeigen derzeitige Analysen von verschrotteten Altautos (die im Schnitt 12 bis 13 Jahre alt sind) noch sehr geringe Anteile an NdFeB-Magneten (vergl. Widmer et al., 2015), während in absehbarer Zukunft definitiv mit einem erheblichen Anstieg an NdFeB-Magneten in den Schredderfraktionen von Altautos (speziell in der Eisenfraktion) zu rechnen ist.

Für das Modell wird auf Basis der Literaturrecherche von aktuell 100 g/Pkw im Segment der Kompaktklasse und Kleinwagen, 150 g/Pkw im Mittelklasse-Segment und 250 g/Pkw in der Oberklasse ausgegangen, wobei die Mengen seit 2000 mit Ausnahme von 2011 und 2012 (wegen der Hochpreisphase) kontinuierlich ansteigt. Da die genauen Mengen an verwendeten Permanentmagneten kaum zu bestimmen sind, erscheint dies ein realitätsnaher Ansatz für die Simulation des Schrottaufkommens in konventionellen Pkw zu sein. Dabei zeigt sich die Problematik der niedrigen Transparenz hinsichtlich

³Diese Aussage basiert auf persönlicher Korrespondenz mit Vertretern aus der Automobilindustrie.

Tabelle 3.4.: Annahmen zu Gehalten von NdFeB-Magneten in konventionellen Pkw aus der Literatur.

Quelle	Methode	Masse NdFeB-Magnete pro Pkw
(Roskill, 2011, 2014)	Expertenschätzung	150-250g
(Kohlmeyer et al., 2015a,b)	Zerlegung eines Mittelklassewagens	ca. 150g
(Widmer et al., 2015)	Analyse von Altauto-Schredderfraktionen Schweiz	<10g
(Alonso et al., 2012b)	Analyse der Kleinmotoren bei Automobilzulieferern	>1kg
(Cullbrand und Olof, 2011)	Analyse einzelner Bauteile (Kleinmotoren)	ca. 150g

der Verwendungsstrukturen von NdFeB-Magneten insgesamt. Da zahlreiche Bauteile (z.B. Autositze, Rückspiegel, Scheibenwischer) bereits in fertiger Form extern geliefert werden, ist selbst den Autobauern in der Endfertigung nicht immer klar, wie die genaue Materialzusammensetzung des Bauteils aussieht, da in erster Linie auf Funktionalität und Bauteileigenschaften Wert gelegt wird⁴. Angesichts der Tatsache, dass ein Großteil der Kunden der in Tabelle 3.2 gelisteten Hersteller aus der Automobilindustrie kommen, muss von einem vermehrten Einsatz von PM-Synchronmotoren in konventionellen Pkw ausgegangen werden (Erdmann et al., 2011, Anhang, S.142). Dies wird durch Analysen aktueller Pkw-Modelle und Zulieferer-Angaben bestätigt (vergl. neben Tabelle 3.4 insbesondere Kohlmeyer et al., 2015a; Alonso et al., 2012b; Wilde, 2008).

Die deutschen Zulassungszahlen der Pkw mit alternativem Antrieb sowie der Pkw insgesamt, auf deren Basis die bottom-up Modellierung der Materialströme erfolgt, sind in Abbildung 3.5 zusammengefasst.

⁴Diese Aussage basiert ebenfalls auf persönlicher Korrespondenz mit Vertretern der Automobilindustrie.

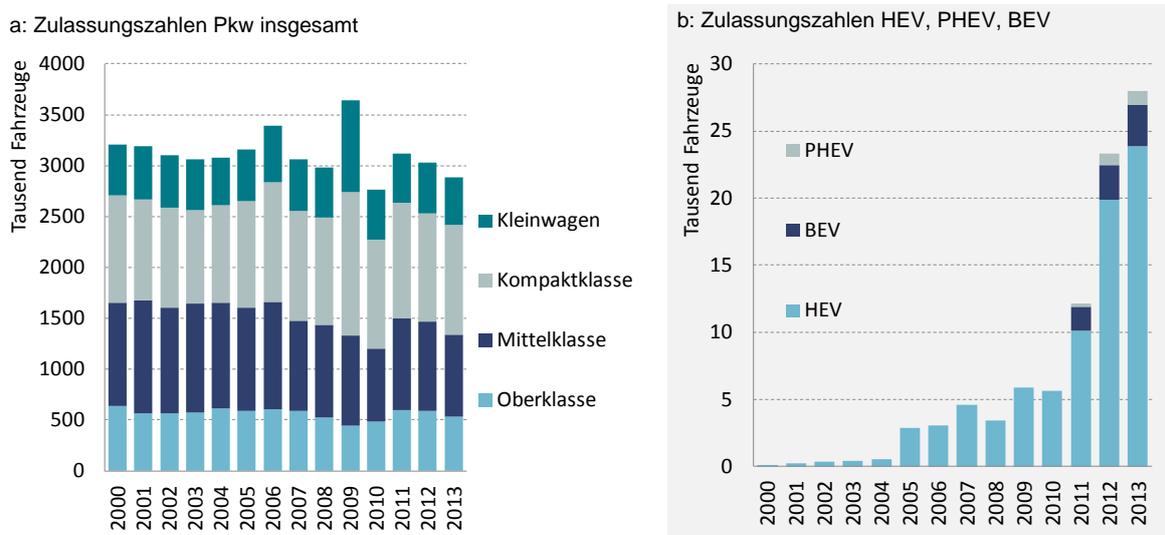


Abbildung 3.5.: Pkw Zulassungszahlen in Deutschland (Daten basieren auf dem Verband der deutschen Automobilindustrie (VDA, 2000-2013) sowie auf dem Kraftfahrt-Bundesamt (KBA)).

NdFeB Permanentmagnete in Windkraftanlagen in Deutschland

In Deutschland ist die insgesamt installierte Kapazität von Windkraftanlagen (WKA) vom Jahr 2000 bis zum Jahr 2013 um mehr als das Fünffache gestiegen (dies entspricht den kumulierten Werten in Abbildung 3.6). Zur Abschätzung des Anteils von WKA mit Permanentmagneten (langsam laufender Direktantrieb, oder Schnellläufer mit Getriebe) wurde eine Herstelleranalyse durchgeführt (vergl. hierzu Tabellen im Anhang). Im Jahr 2012 setzte sich der Markt der neu installierten Leistung in Deutschland entsprechend Abbildung 3.6 zusammen. Der Offshore-Anteil aller WKA betrug in Deutschland Ende 2012 nur 1% (vergl. Abbildung 3.6b nach dem Bundesverband Windenergie⁵). Generell ist der Direktantrieb ohne Getriebe aufgrund der geringen Wartungsintensität vor allem für Offshore-WKA interessant (Kaufhold und Jöckel, 2002, vergl. auch Abbildung 1.8).

Die Herstelleranalyse ergab, dass der größte und der drittgrößte Marktteilnehmer, Enercon und Senvion (ehemals REPower), mit einem gemeinsamen Marktanteil von derzeit ca. 70%, keine Permanentmagnete in ihren WKA verwenden. Der zweitgrößte Anbieter, Vestas (Weltmarktführer), verwendet Permanentmagnete in drei seiner über zehn angebotenen Turbinen, wovon eine ausschließlich im Offshore-Bereich eingesetzt wird (vergl. Tabelle 3.5). Diese drei Turbinen sind Hybridturbinen⁶. Die Firma Nordex produziert derzeit sechs verschiedene Onshore-WKA, verbaut jedoch nur in ihrer Offshore-WKA Permanentmagnete. Lediglich kleinere Unternehmen wie die VENSYS Energy AG, die

⁵Bundesverband Windenergie (BWE): www.wind-energie.de

⁶Hybridturbinen verbinden das Konzept des PM-Synchrongenerators mit einem kleiner dimensionierten Getriebe, meist mit Planetengetriebe, was eine kompaktere Bauweise ermöglicht.

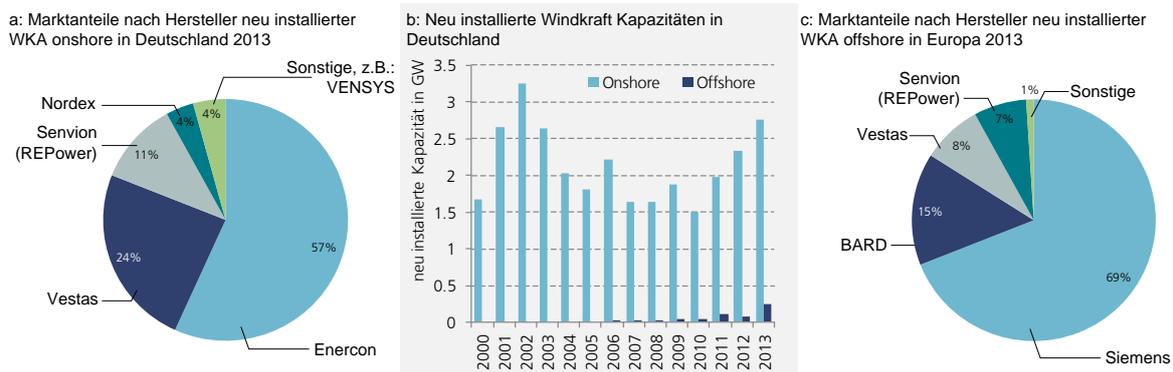


Abbildung 3.6.: Hersteller von Windkraftanlagen nach deutschen Marktanteilen sowie installierte jährliche Neuleistungen.

a: Marktanteile der Hersteller im Onshore-Bereich (Wallasch et al., 2012)

b: Jährliche neu installierte Leistung in Deutschland nach dem Bundesverband Windenergie (BWE)

c: Marktanteile der Hersteller im Offshore-Bereich (Wallasch et al., 2012).

in Deutschland einen Marktanteil von ca. 1,5% hat, setzt auf getriebelose PM-Direktantriebe im onshore Bereich (Wallasch et al., 2012). In erster Linie werden diese Anlagen allerdings vom größten chinesischen Hersteller "Glodwind Ltd." in China produziert, der 2008 die Mehrheitsanteile der VENSYS Energy AG übernommen hat, und hauptsächlich innerhalb Chinas installiert⁷.

Der Marktführer im Offshore-Bereiche, Siemens Windpower, setzt vor allem bei größeren Turbinen auf Direktantriebe mit Permanentmagnete⁸. Auch hat der Weltmarktführer für WKA (onshore und offshore), Vestas, die derzeit größte Offshore-Turbine mit 8MW Leistung und PM-Generator auf den Markt gebracht⁹. Zwar wird der offshore Windenergie starkes Wachstum in absehbarer Zukunft zugesprochen (vergl. z.B. IEA, 2013), insgesamt spielt der Offshore-Bereich derzeit aber nach wie vor eine untergeordnete Rolle (vergl. Abbildung 3.6).

Der genaue Anteil der Anlagen, die mit Neodym-Magneten arbeitet, lässt sich auf Basis der verfügbaren Daten nicht eindeutig bestimmen. Wie zuvor erläutert, kann weltweit von einem Anteil der WKA mit PM-Direktantrieb von 10-15% ausgegangen werden, zusätzlich kommen einige Schnellläufer mit Getriebe und kleineren PM-Synchrongeneratoren hinzu. Die Ergebnisse der Herstelleranalyse im deutschen Markt in Verbindung mit dem geringen Offshore-Anteil lassen aber den eindeutigen Schluss zu, dass in Deutschland der Prozentsatz neuer WKA mit Permanentmagneten deutlich unter 10% liegt. Wie bereits in Abschnitt 1.1.1 erläutert, konzentriert sich die Verwendung von NdFeB-Magneten in kleineren WKA im Onshore-Bereich mit und ohne Getriebe auf China, während die installierten Anlagen auf dem deutschen Festland nur sehr selten Permanentmagnete enthalten. Lediglich die größer

⁷ siehe hierzu Herstellerangaben Goldwind Ltd.: www.goldwindglobal.com

⁸ Hierzu wird derzeit in Cuxhaven ein neues Produktionswerk für die Endmontage aufgebaut (vergl. www.siemens.com/press/de).

⁹ vergl. Herstellerangaben: V1648MW www.mhivestasoffshore.com

Tabelle 3.5.: Windkraftanlagen mit NdFeB-Permanentmagnet, die in Deutschland in den vergangenen Jahren installiert wurden. Die Angaben wurden den Produktblättern der jeweiligen Hersteller entnommen.

Hersteller	Anlage	Getriebe vorhanden?	Einsatzbereich
Vensys	Vensys 100/109/112 (2.5 MW)	-	onshore
Vensys	Vensys 120 (3 MW)	-	onshore
Vestas	V112-3.0 MW IEC 2A	G	onshore
Vestas	V126-3.0 MW	G	onshore-/offshore
Vestas	V164-8.0MW	G	offshore
Nordex	N150/6000 (6MW)	-	offshore
Siemens	SWT-3.0-101 (3 MW)	-	onshore-/offshore
Siemens	SWT-3.2-101 (3.2 MW)	-	onshore-/offshore
Siemens	SWT-3.0-108 (3 MW)	-	onshore-/offshore
Siemens	SWT-3.2-108 (3.2 MW)	-	onshore-/offshore
Siemens	SWT-3.0-113 (3 MW)	-	onshore-/offshore
Siemens	SWT-3.2-113 (3.2 MW)	-	onshore-/offshore
Siemens	SWT-6.0-154 (6 MW)	-	offshore

dimensionierten Offshore-Anlagen basieren hauptsächlich auf der DD-Technologie (Direct Drive) mit NdFeB-Magneten von bis zu 3-4t.

Insgesamt wird auf Basis der hier zusammengetragenen Daten im Onshore-Bereich von einem Anteil von 5% der installierten WKA mit Permanentmagnet ausgegangen, wobei 2.5% keinen Direktantrieb, sondern als Schnellläufer mit Getriebe und kleinerem Generator ausgelegt ist. Der Anteil der Offshoreanlagen mit PM-Generator wird auf Basis der Marktanteile der einzelnen Hersteller und ihres Anteils an PM-Direktantrieben im Produktportfolio (vergl. Tabelle 3.5, sowie Tabellen im Anhang) auf aktuell ca. 50% geschätzt. Dabei basieren die sehr großen Turbinen ab 5MW Leistung fast immer auf einem PM-Synchrongenerator¹⁰, während bei kleineren Offshore-Anlagen durchaus auch schnelllaufende doppeltgespeiste Asynchron-Generatoren oder Synchron-Ringgeneratoren mit Elektromagnet im Rotor eingesetzt werden¹¹). Daher ist davon auszugehen, dass aufgrund der Tendenz zu immer größeren Turbinen in Zukunft verstärkt auf die PM-Direktantriebe gesetzt wird, während die in der Vergangenheit installierten Offshore-Anlagen eher geringere Anteile an PM-Direktantrieben aufweisen. Dies wurde im Modell durch entsprechend niedrigere Anteile der DD-Technologie (**D**irect **D**rive) in der Vergangenheit berücksichtigt.

NdFeB-Magnete in Pedelecs (E-Velos)

Während in Asien, insbesondere in China, die Verkaufszahlen elektrischer Zweiräder (E-Scooter) in den vergangenen Jahren einen enormen Zuwachs erlebt haben, spielen Motorroller, bzw. Motorräder mit Elektro-Antrieb in Europa bisher kaum eine Rolle.

¹⁰vergl. Siemens SWT-6.0-154, Nordex N150/6000, oder Vestas V164-8.0MW

¹¹So basiert z.B. der 2015 in Betrieb genommene Windpark "Baltic 2" der EnBW auf 80 Anlagen des Typs SWT-3,6-120 mit

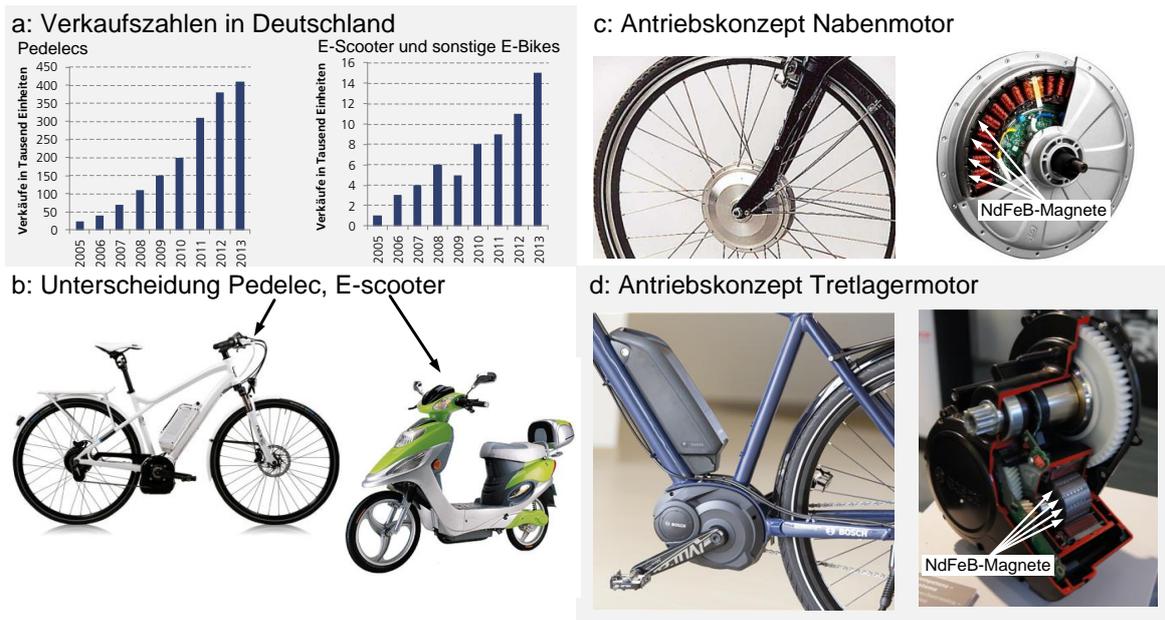


Abbildung 3.7.: Pedelec Verkäufe in Deutschland und der Abgrenzung von E-Scootern.

a: Pedelec Verkäufe in Deutschland (Daten basieren auf ZIV Zweirad Industrie-Verband e.v.)

b: Unterscheidung Pedelec und E-Scooter (Bilder entnommen von Bosch E-Bike, <http://www.bosch-ebike.de/de/home/home.html>)

c+d: Antriebskonzepte (vergl. z.B. Bosch E-Bike).

Dagegen verbreiten sich in Deutschland in den vergangenen Jahren verstärkt Fahrräder mit elektrischem Hilfsantrieb, bzw. elektrischer Kraftverstärkung, die im Allgemeinen als "Pedelecs" (Pedal Electric Cycle) bezeichnet werden und sich von E-Scootern dadurch unterscheiden, dass der Fahrer über die Pedale zum Antrieb beisteuert, bzw. den Antrieb reguliert und nicht wie beim klassischen E-Bike ausschließlich über einen Gasgriff. Technisch gesehen unterscheiden sich Pedelecs von E-Scootern auch durch die geringere Motorleistung und entsprechend niedrigere Magnetmengen in den Elektromotoren. Häufig werden diese unterschiedlichen Konzepte unter dem allgemeinen Begriff der "E-Bikes" zusammengefasst wodurch gewisse Mißverständnisse entstehen können. Zwar kann davon ausgegangen werden, dass auch in Pedelecs aus Platz- und Gewichtsgründen nahezu ausschließlich PM-Synchronmotoren mit NdFeB-Magneten verbaut werden, durch die geringeren Betriebstemperaturen sind hier allerdings nur Dysprosiumgehalte im Bereich um 1% nötig¹². Je nach Leistungsklasse kann bei Pedelecs von einer verbauten Magnetmenge von 100-300g ausgegangen werden (vergl. insbesondere Hofmann et al., 2013, Anhang Seite 55 ff.). Im Modell wird mit einem Durchschnittswert von 200g NdFeB-Magnet pro Pedelec gerechnet, während die größeren E-Scooter bis zu 500g Magnetmasse enthalten können (siehe ebenfalls Hofmann et al., 2013, Anhang Seite 55 ff.). In diesen Motoren ist auch aufgrund der höheren Leistung von Gehalten an Dysprosium um 5% auszugehen.

doppeltgespeistem Asynchron-Generator (vergl. www.enbw.com/media)

¹²Diese Aussage basiert auf persönlicher Korrespondenz mit Motor-Herstellern.

Abbildung 3.7 zeigt die Entwicklung der Pedelec-Verkäufe in den vergangenen Jahren sowie deren Unterscheidung gegenüber E-Scootern und das grundlegende Funktionsprinzip der Kraftverstärkung durch den elektrischen Antrieb. Zu unterscheiden ist auch die Position des Elektromotors als Tretlagermotor, oder als Nabenmotor direkt in den Radnaben.

Weitere Anwendungsbereiche von NdFeB Permanentmagneten

Wie bereits erläutert, werden NdFeB Magnete für die industrielle Verwendung hauptsächlich in kleineren Synchron-Servomotoren eingesetzt (bis 10kW Leistung, vergl. z.B. Kaufhold und Jöckel, 2002; Buchert et al., 2013). Hierzu gehören, wie in Abschnitt 1.1.1 bereits erwähnt, neben den oben genannten Punkten z.B. Haushaltsgeräte von einfachen Küchenmaschinen bis hin zu Spül- und Waschmaschinen, verschiedenste Formen elektrischer Pumpen, sowie Servomotoren im allgemeinen Maschinenbau. Zwar haben die permanentmagneterregten Servomotoren im Gegensatz zu den Induktionsmotoren einen höheren Wirkungsgrad, dennoch spielen sie im Vergleich zu Induktionsmotoren vor allem aufgrund der hohen Kosten für NdFeB-Magnete nach wie vor eine untergeordnete Rolle. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass, wenn nicht zwingend volumeneffizient konstruiert werden muss, auch häufig schwächere Ferrit-Magnete in Elektromotoren verbaut werden. Die neue, 2015 in Kraft tretende Richtlinie der EU zur Energieeffizienz von Elektromotoren¹³, könnten den Trend hin zu PM-Synchronmotoren allerdings nochmals forcieren. Theoretisch ist die Verwendung von Permanentmagneten in langsam-drehenden Großmaschinen sinnvoll, da durch die Ersparnis des Energieaufwands zum Aufbau eines elektrisch induzierten Magnetfelds grundsätzlich höhere Wirkungsgrade erreicht werden, durch die hohen Kosten der Magnetmaterialien und die Unsicherheit über die Versorgungslage, werden diese Systeme allerdings bisher hauptsächlich für große Offshore-Windanlagen eingesetzt (vergl. z.B. Buchert, 2011; Westphal und Kuchta K., 2013) und kommen außer für einige Schiffsmotoren (Kaufhold und Jöckel, 2002) bisher industriell kaum zum Einsatz.

Insgesamt ist folglich davon auszugehen, dass neben den oben betrachteten Bereichen in zahlreichen weiteren Anwendungsgebieten von kleineren Elektromotoren (Maschinenbau, Haushaltstechnik usw.) unter anderem PM-Synchronmotoren auf NdFeB-Basis eingesetzt werden. Eine eindeutige Quantifizierung erscheint hier allerdings kaum möglich. Dies liegt auch daran, dass Elektromotoren meist nur nach den Leistungskennzahlen und Spannungsart (Gleichstrom/Wechselstrom) unterschieden werden, und der genaue Motortyp in den meisten Elektrogeräten unbenannt bleibt. Weiterhin besteht von Seiten der Industrie wenig Interesse, ihre Wertschöpfung offenzulegen, was dazu führt, dass selbst die Produktionszahlen von NdFeB-Magneten in Deutschland nur mit einem breiten Unsicherheitsbereich quantifiziert werden können (siehe Tabelle 3.2, vergl. auch Buchert et al., 2013). Sicher ist, dass die Versorgungskrise 2010-2011, ausgelöst durch die verstärkten Exportrestriktionen Seitens der chinesi-

¹³In Deutschland umgesetzt durch die Ökodesign-Richtlinie Elektromotoren, siehe Umweltbundesamt: www.umweltbundesamt.de.

schen Regierung¹⁴, viele Unternehmen des Maschinenbaus getroffen hat und dadurch eine gewisse Vorsicht bei der Verwendung von Selten-Erd-Magneten entstanden ist.

Während die Magnetresonanztomographie (MRT) wie in Abschnitt 1.1.1 bereits erläutert, nahezu vollständig auf elektrisch induzierten Magnetfeldern in stark gekühlten Supraleitern mit sehr geringem elektrischen Widerstand basieren, hier also erwartungsgemäß kaum NdFeB-Magnete verbaut werden, ist ein in Deutschland mit Sicherheit breites Einsatzgebiet von NdFeB-Magneten –neben den oben beschriebenen Verwendungsbereichen– die Sensorik in der Mess- und Automatisierungstechnik, die für nahezu alle Bereiche des Maschinen- und Anlagenbaus eine Rolle spielen. Dieser sehr undurchsichtige Anwendungsbereich lässt sich allerdings mit dem hier durchgeführten Bottom-up-Ansatz nicht sinnvoll untersuchen.

Basierend auf den zuvor aufgezeigten Verkaufszahlen und Magnetgehalten in den Produkten, werden nachfolgend unter Annahme entsprechender Verwendungsdauer-Verteilungen die sich ergebenden Recyclingpotenziale analysiert.

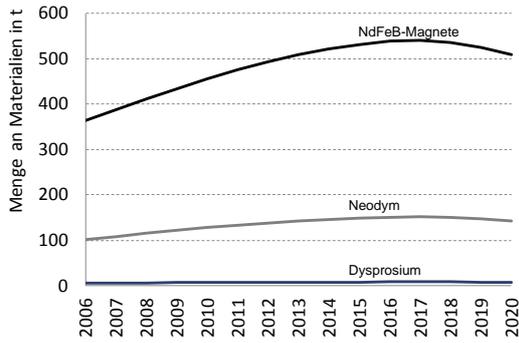
Recyclingpotenziale von NdFeB-Magneten aus Altprodukten in Deutschland

Über das Prinzip der “Aging Chain” (vergl. Abbildung 2.4 in Kapitel 2.2) und den in Tabelle 3.1 gelisteten durchschnittlichen Verwendungsdauern, wobei aufgrund mangelnder Daten von Gaußschen Normalverteilungen ausgegangen wird, wurden die jeweiligen Produktlebenszyklen simuliert. Auf diese Weise lassen sich die Recyclingpotenziale aus den betrachteten Bereichen simulieren und relativ verlässliche Aussagen über zukünftige Materialmengen im Schrottaufkommen treffen. Die Ergebnisse der gegenwärtigen und zukünftigen Materialströme in obsoleten Produkten aus der bottom-up Simulation sind in Abbildung 3.8 zusammengefasst.

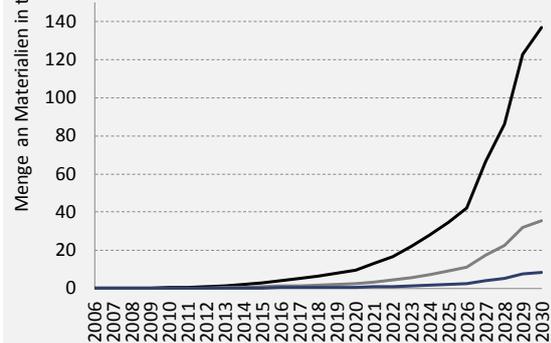
Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass in verschiedenen Anwendungsbereichen ein erheblicher Teil an gebrauchten Produkten exportiert wird. Bei Altfahrzeugen werden von den ca. 3 Mio. jährlich in Deutschland abgemeldeten Fahrzeugen lediglich ca. 0.5 Mio. Pkw verschrottet. Der Rest wird als Gebrauchtwagen ins europäische und nicht-europäische Ausland exportiert (vergl. hierzu Sander und Schilling, 2010). Die Wirtschaftlichkeit des Recyclings der Magnete aus Traktionsmotoren von Hybrid- und Elektrofahrzeugen wird neben der Größe der Magnete (1-3 kg, vergl. Abbildung 4.7, sowie Tabelle 1.2) durch den hohen Anteil an hochpreisigem Dysprosium zusätzlich gestärkt (Elwert und Goldmann, 2014, S.151). Wie in Abbildung 1.6 gezeigt, liegt der Materialwert eines NdFeB-Magneten mit knapp 10% Dysprosiumanteil auf Basis aktueller Preise mit ca. 65\$/kg bei mehr als dem doppelten Wert eines reinen NdFeB-Magneten ohne Dysprosium (ca. 30\$/kg). Es ist folglich davon auszugehen, dass insbesondere Traktionsmotoren und größere Elektromotoren aus konventionellen Pkw, wie z.B. Lenkungsmotoren, die häufig auf NdFeB-Magneten basieren, rezykliert werden. Inwiefern sich die

¹⁴Vor allem der Territorialkonflikt mit Japan und die vorübergehende komplette Einstellung der Exporte nach Japan führten in westlichen Industrieländern Ende 2010 zu einer erheblichen Versorgungskrise.

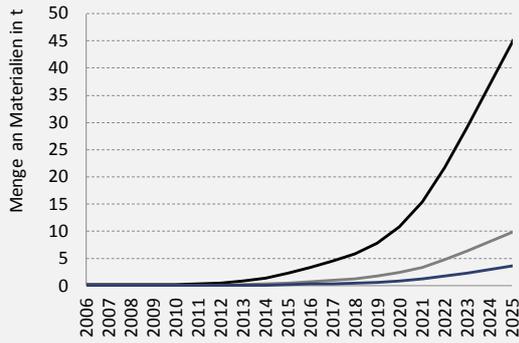
Materialaufkommen Elektronik



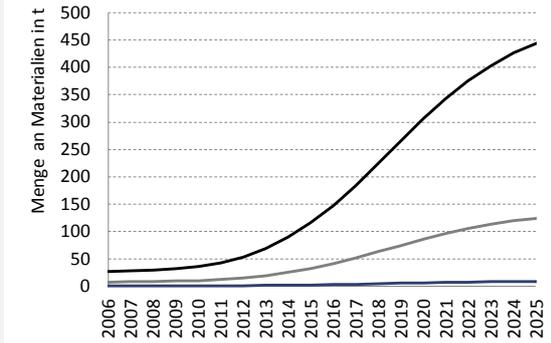
Materialaufkommen Windenergie



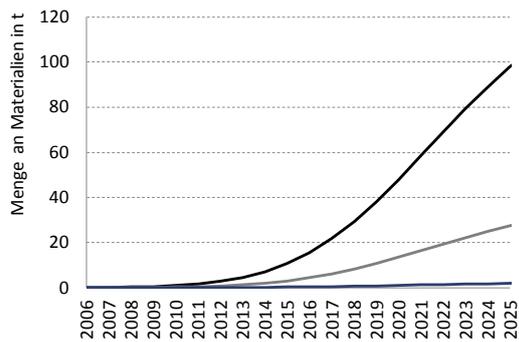
Materialaufkommen Traktionsmotoren alternative Antriebe



Materialaufkommen konventionelle PKW



Materialaufkommen Pedelecs



Materialaufkommen E-Scooter + sonstige E-Bikes)

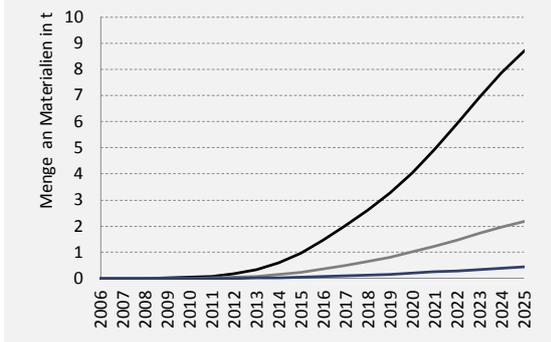


Abbildung 3.8.: Recyclingpotenzial NdFeB-Magnete aus der bottom-up Simulation.

Exportquoten von Pkw mit alternativem Antrieb von denen konventioneller Pkw unterscheiden bleibt abzuwarten. Insgesamt wirkt sich wie in Abbildung 3.9 dargestellt, der Export alter Fahrzeuge aber massiv auf das Recyclingpotenzial in Deutschland aus.

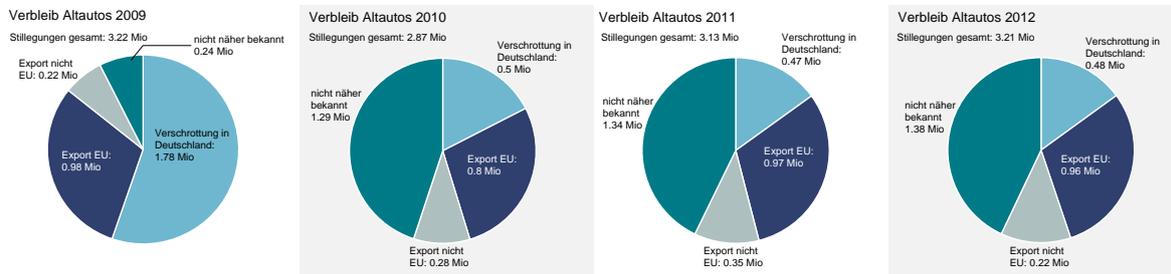


Abbildung 3.9.: Verbleib von Altfahrzeugen in Deutschland (Daten basieren auf UBA, 2012). Die Abweichungen 2009 entsprechen einem Einmaleffekt durch die Abwrackprämie. Ansonsten wird ein Großteil der in Deutschland stillgelegten Altfahrzeuge exportiert. Da einzeln exportierte Pkw häufig nicht erfasst werden, ist auch der Verbleib der Altfahrzeuge nicht immer nachvollziehbar.

Das Problem der erheblichen Mengen an exportiertem oder falsch entsorgtem Elektronikschrott wird in der Literatur regelmäßig diskutiert (vergl. z.B. Hagelüken, 2014). Hinsichtlich des Recyclingpotenzials von NdFeB-Magneten in Deutschland kann hier allerdings klar aufgezeigt werden, dass in Zukunft sowohl die absolute Menge an NdFeB-Magneten als auch der prozentuale Schrottanteil von NdFeB-Magneten aus Kleinstmotoren für Festplatten (HDD) sowie CD und DVD-Laufwerken aufgrund neuer Technologien (insbesondere SSD-Festplatten) in absehbarer Zukunft abnehmen wird. Da sich die Trennung dieser sehr kleinen Magnete aus der Schredderfraktion von Elektronik-Schrott ohnehin sehr aufwendig gestaltet (vergl. z.B. Westphal et al., 2014) und nicht zuletzt aufgrund der derzeit verhältnismäßig niedrigen Preise für Seltene Erden kaum wirtschaftlich erscheint, ist eine Fokussierung des Recyclings auf größere Synchron-Servomotoren aus Altfahrzeugen und elektrischen Maschinen (Pumpen, Klimaanlage, Waschmaschinen etc.) in absehbarer Zukunft zu erwarten. Da allerdings, wie bereits erläutert, die Spanne an verschiedenen Motorkonzepten sehr groß ist und es selbst nach dem Ausbau der Motoren bei Betrachtung des Gehäuses nicht eindeutig bestimmbar ist, ob es sich um einen PM-Synchronmotor mit NdFeB-Magneten handelt, wäre eine gesetzlich vorgeschriebene Markierung der Motoren durchaus sinnvoll. Auch wäre in diesem Zusammenhang ein direktes Einbeziehen der Hersteller in den Recyclingprozess zur Identifikation relevanter Motoren sinnvoll. Bereits heute werden größere NdFeB-Magnete aus Elektromotoren von einigen Schrotthändlern zwischengelagert, in der Voraussicht, diese in Zukunft gewinnbringend veräußern zu können (vergl. Bast et al., 2014).

Bei Windkraftanlagen mit PM-Generator ist eine Sammlung und wiederverwertung der NdFeB-Magnete aufgrund der reinen Magnetgröße und des entsprechenden Wertes¹⁵ naheliegend. Hier ist allerdings die sehr lange Nutzungsdauer der WKA von 20 bis 25 Jahren zu berücksichtigen, die wie in Abbildung 3.8 dargestellt, erst nach 2025 größere Mengen an potenziellem Recyclingmaterial erwarten

¹⁵auf Basis heutiger Preise bei 3t Magnetmasse für große WKA mit Direktantrieb entspricht der Materialwert über 100k€

lassen. Auch kommt es vor allem im Onshore-Bereich aufgrund des Mangels an Fläche für Windkraftanlagen regelmäßig zu einem "Repowering", d.h. zu einem Ersetzen kleinerer WKA durch größere, leistungsstärkere. Dabei werden die alten Anlagen nicht zwingend verschrottet, sondern unter Umständen in Entwicklungs- und Schwellenländern wieder aufgebaut. Daher kann auch im Bereich der Windkraft der Export von Altanlagen zu einer erheblichen Minderung des Recyclingpotenzials in Deutschland führen.

Während die in Asien (insbesondere in China, vergl. Abschnitt 1.1.1) weit verbreiteten E-Scooter in Europa nach wie vor eine sehr untergeordnete Rolle spielen und daher in absehbarer Zukunft auch keine große Quelle für Recyclingmaterial darstellen werden (vergl. Abbildung 3.8), ist die Zahl der Pedelecs in Deutschland in den vergangenen Jahren stark angestiegen. Da die Motoren einfach zugänglich sind (vergl. Abbildung 3.7c+d) erscheint das Recycling hier recht vielversprechend.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass angesichts der Produktionszahlen von NdFeB-Magneten in Deutschland in Höhe von ca. 2000t/a (vergl. Tabelle 3.2), das Recycling von Magnetmaterialien nicht unerheblich zur Deckung des Rohstoffbedarfs der deutschen Magnetindustrie beitragen kann, zumal die hier durchgeführte bottom-up Schätzung nur einzelne Bereiche abdeckt und ein erheblicher Teil der magnetisch erregten Synchron-Servomotoren im allgemeinen Maschinenbau (Haushaltstechnik, Pumpen, Werkzeuge etc.) aufgrund der schlechten Datenlage nicht einbezogen wurde. Zu berücksichtigen bleibt allerdings die Tatsache, dass der Großteil der von der deutschen Industrie verbauten NdFeB-Magnete nicht in Deutschland hergestellt wird, sondern in Form von fertigen Magneten, Motoren, oder innerhalb entsprechender Zwischen- und Endprodukte importiert wird. So ist es, ohne genaue Zahlen quantifizieren zu können, naheliegend, dass der exportorientierte deutsche Maschinenbau einen weit höheren Rohstoffverbrauch hat, als durch Recycling gedeckt werden könnte. Während in Deutschland z.B. jährlich 5.5 Mio. Pkw produziert werden (vergl. VDA, 2000-2013) und ca. 3 Mio Pkw zugelassen werden, liegt, wie zuvor erläutert, die Zahl der in Deutschland verschrotteten Pkw lediglich bei ca. 0.5 Mio. (vergl. Abbildung 3.9).

4. Ergänzung der physischen Stoffströme um Marktdynamik und Rückkopplungseffekte

Während die im vorherigen Kapitel beschriebenen Stoffstrom-Modelle den System Dynamics Ansatz zur reinen Materialfluss-Modellierung nutzen und die Bestandsvariablen lediglich zur Darstellung der Akkumulation von Materialmengen über Produktnutzungsdauern (durch verschiedene Formen von Verzögerungsfunktionen) zum Einsatz kommen, werden im folgenden Kapitel aufbauend auf das globale Stoffstrommodell marktdynamische Anpassungsmechanismen untersucht.

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

Während bei klassischen Industriemetallen die Weltwirtschaft und insbesondere die Entwicklung verschiedener Schwellenländer den entscheidenden Nachfragemotor bilden, ist der Bedarf von Neodym und Dysprosium in erster Linie Technologie-getrieben (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. Angerer et al., 2009; Alonso et al., 2012a; Hoenderdaal et al., 2013; Habib und Wenzel, 2014). 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.

Was hier allerdings ebenfalls nicht abgebildet wird, ist die Frage, wie sich die Nachfrage an das erwartete Angebot anpasst, denn mehr als der physisch verfügbare Rohstoff kann nicht verteilt werden. 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. Diese Anpassungsmechanismen lassen

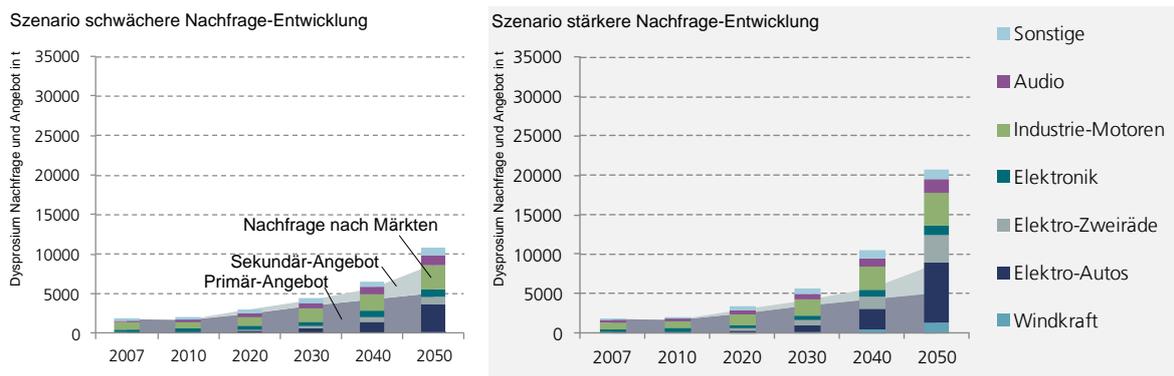


Abbildung 4.1.: Beispiel der separaten Betrachtung von Nachfrage und Angebot (diese Szenarien sind als Beispiel entnommen aus Habib und Wenzel, 2014). Diese Form der Analyse der Nachfrageentwicklung beinhaltet keine Marktanpassungsmechanismen und basiert ausschließlich auf exogenen Wachstumsannahmen.

sich mit den hier vorgestellten Modellen abbilden. So können diese Modelle als erweiterte Szenario-Analyse ergänzend zu den Studien gesehen werden, die auf reine Nachfragebetrachtungen basieren, oder Nachfrage- und Angebotsentwicklungen separat gegeneinanderstellen (vergl. Abbildung 4.1).

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. Detaillierte

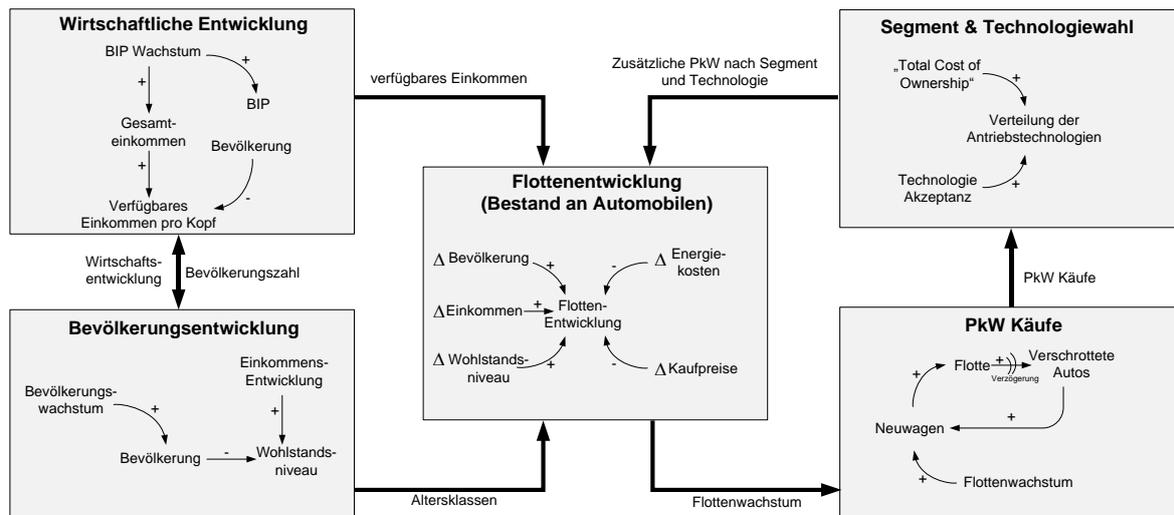


Abbildung 4.2.: Struktur und Zusammenhänge im globalen Flottenmodell GloMo.

Erläuterungen zum hier verwendeten globalen Flottenmodell wurden andersweitig veröffentlicht (vergl. hierzu insbesondere Kühn und Glöser, 2012; Schade et al., 2012; Kühn und Glöser, 2013). 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 4.2 zeigt den schematischen Aufbau des GLOMO-Modells mit seinen fünf Modulen.

In diesem Modell wird zunächst basierend auf exogenen Prognosen zur Wirtschafts- und Bevölkerungsentwicklung, die Entwicklung der Gesamt-Pkw Zahl in den entsprechenden Wirtschaftsregionen modelliert. Unter Berücksichtigung der Verschrottung von Altagos 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 der Energiekosten) 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

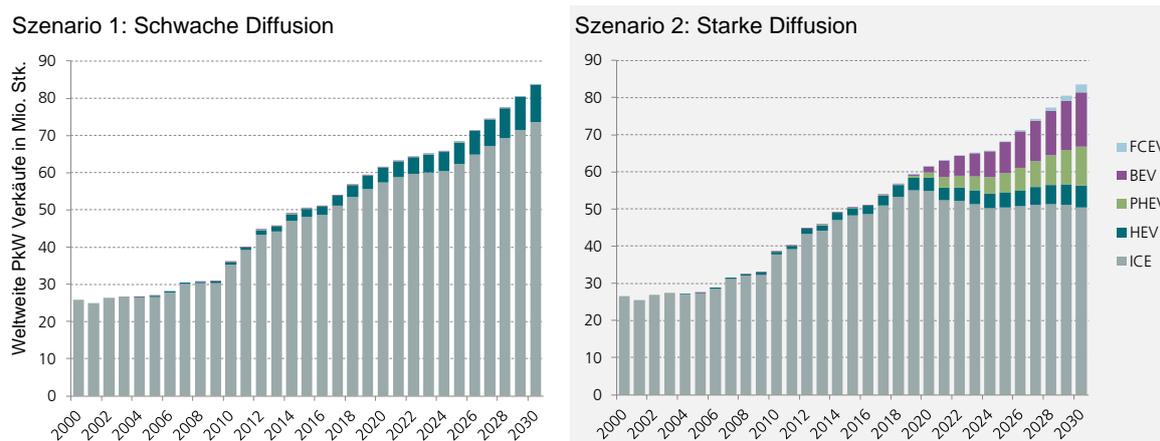


Abbildung 4.3.: Für die folgenden Betrachtungen werden zwei Szenarien zur Entwicklung alternativer Antriebe im Pkw Markt verwendet, die als Extreme zu verstehen sind (vergl. Schade et al., 2012).

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.

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 4.3 dargestellt. 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 4.4 dargestellt.

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 4.3 dargestellten Szenarien zur Diffusion alternativer Antriebe auf die Rohstoffnachfrage und die Anpassungsreaktionen des Marktes auf potenzielle Rohstoffengpässe modellieren.

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

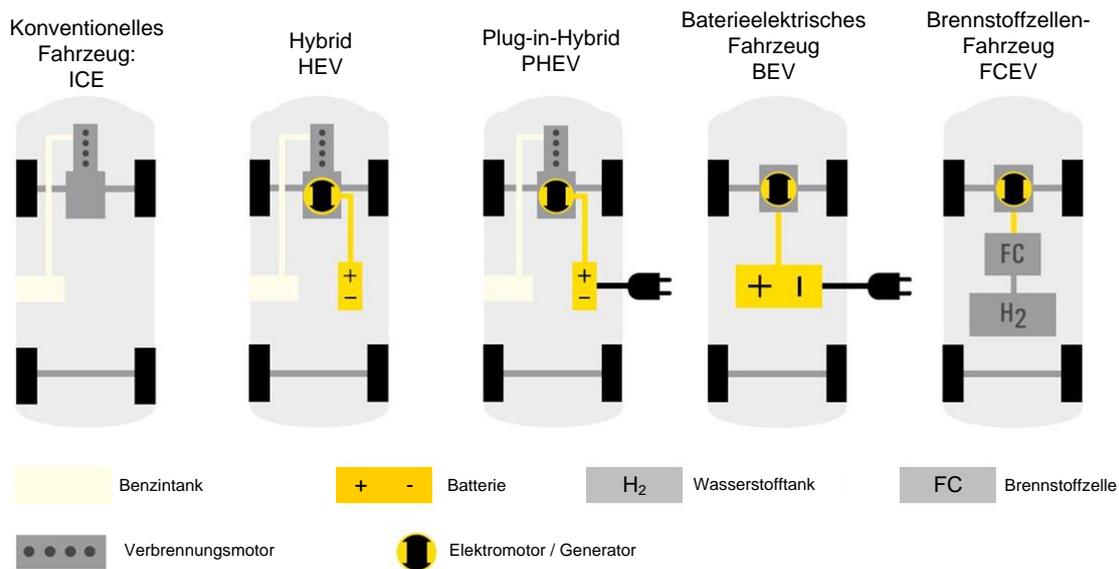


Abbildung 4.4.: Antriebskonzepte für Pkw in der Form, wie sie in GloMo unterschieden werden (vergl. auch Abbildung 4.3).

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 jeweiligen 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 4.5 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.

Global Mobility Model [GloMo]: Entwicklung der Automobilnachfrage unter besonderer Berücksichtigung alternativer Antriebssysteme

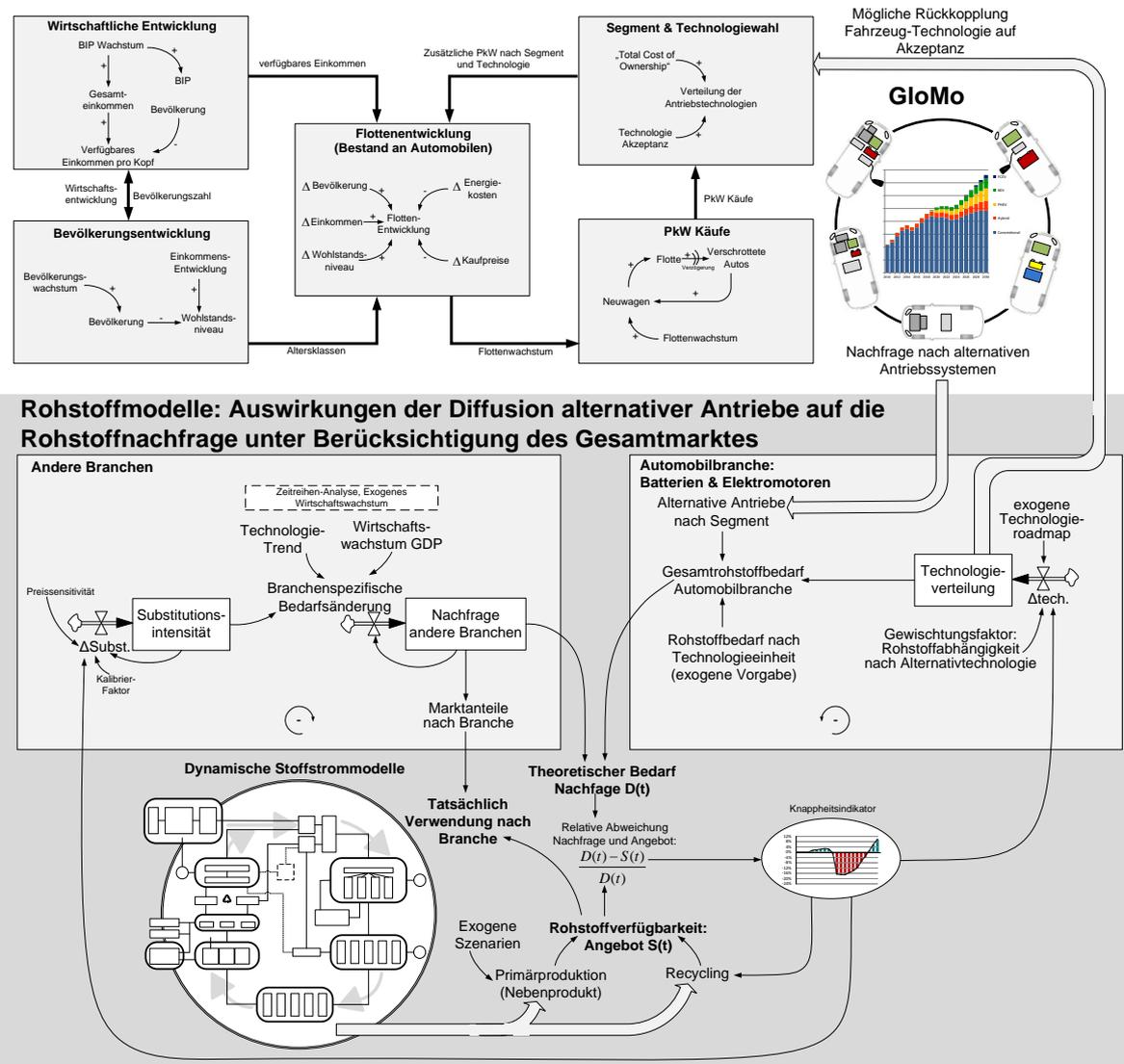


Abbildung 4.5.: Prinzip der Kopplung des Flottenmodells mit den Stoffstrommodellen unter Berücksichtigung von Anpassungsmechanismen.

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 Selten-Erdelement (vergl. Abbildung 1.2) auf Grund der kontinuierlich steigenden Nachfrage nach NdFeB-Magneten in Zukunft als der Wachstumstreiber der Selten-Erd-Förderung gilt (Alonso et al., 2012a) und auch außerhalb Chinas in größeren Mengen gefördert wird (vergl. Abbildung 1.3), beschränkt sich die Gewinnung von Dysprosium als Teil der schweren Seltenen Erden nahezu vollständig auf China (vergl. Abbildung 1.4). 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 unerlässlich 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. Kapitel 3.1), 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 (Wehrspohn, 2014) als auch Recyclingverfahren für NdFeB-Magnete (Elwert und Goldmann, 2014; Bast et al., 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 K., 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 Kapitel 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 Selten-Erd-Elementen untereinander löst allerdings die Rohstoffproblematik nicht. Auch die Materialsubstitution ist problematisch, da alternative Magnetwerkstoffe wie Ferrite oder AlNiCo-Magnete weitaus niedrigere Magnetstärken aufweisen (vergl. Abbildung 1.5) und SmCo-Magnete mit Samarium ein Selten-Erd-Element benötigen, das nur in sehr geringen Mengen zur Verfügung steht (siehe Abbildung 1.2), 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 4.6 beschriebenen Käfigläufer-Asynchron-Motoren eingesetzt werden (Westphal und Kuchta K., 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 10kW, die das wichtigste Anwendungsgebiet von NdFeB-Magneten im Maschinenbau darstellen (Pumpsysteme, Aufzugmotoren, Waschmaschinen etc.), können ebenfalls Induktionsmotoren (Asynchronmotoren, oder Synchronmotoren mit Elektromagnet, vergl. Abbildung 4.6 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 1.8) aufgezeigt und erläutert wurden, zeigt Abbildung 4.6 verschiedene Alternativen für die Umsetzung von Elektromotoren. Diese werden nachfolgend näher beschrieben.

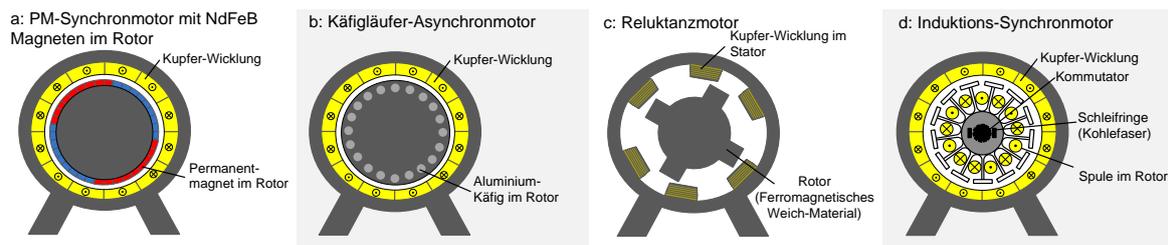


Abbildung 4.6.: Gängige Konzepte für Elektromotoren. Eigene Darstellungen nach (Bradshaw et al., 2013; Chau und Li Wenlong, 2014)

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 4.6 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 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.).

Eine Alternative zu Permanentmagnetmotoren bilden Induktions-Asynchronmotoren, die auch Käfigläufermotoren genannt werden (Abbildung 4.6 b). Hier enthält der Rotor kurzgeschlossene Aluminium- oder Kupferstäbe. Das Stator magnetfeld induziert in den Stäben einen Stromfluss, der wiederum ein Magnetfeld erzeugt. Dabei läuft der Rotor asynchron zum Magnetfeld im Stator. Zwar erreichen Käfigläufer-Asynchronmotoren inzwischen ebenfalls hohe Wirkungsgrade, die nur geringfügig niedriger als bei PM-Synchronmotoren liegen, dennoch kann der PM-Synchronmotor bis zu 30% kompakter und leichter gebaut werden (Gutfleisch et al., 2011).

Eine weitere Gruppe alternativer Elektromotoren, die keine Seltenen Erden verwenden, sind z.B. Reluktanz-Motoren (Abbildung 4.6 c), die in Brennstoffzellenfahrzeugen aus Kostengründen eingesetzt werden könnten (Angerer et al., 2009, S.10 f.). Diese besitzen einen Rotor aus weichmagnetischem Material, wie z.B. Eisen. Durch das Magnetfeld der elektrisch erregten Spulen im Stator wird im Rotor eine Reluktanzkraft induziert. Diese Anziehungskraft bewegt den Rotor, wobei sich im Rotor

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 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.)

weniger Pole befinden als im Stator (Abbildung 4.6 c), um einen Stillstand bei exakter Nordpol-Südpol-Stellung von Stator und Rotor zu vermeiden. Der Wirkungsgrad ist mit dem eines Permanentmagnet-Motors vergleichbar, aber das Drehmoment ist geringer (Bradshaw et al., 2013).

Insgesamt hat die Verwendung von Permanentmagneten gegenüber elektromagnetischer Erregung mehrere Vorteile, die nachfolgend zusammengefasst werden (Gutfleisch et al., 2011; Gieras, 2010; Chau und Li Wenlong, 2014; Bradshaw et al., 2013, 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 Batterie-elektrische 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 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 1.8) gibt es Alternativen zu Permanentmagnetgeneratoren im Bereich der Windkraftanlagen und insbesondere europäische Hersteller verwenden direktangetriebene PM-Generatoren inzwischen nahezu ausschließlich im Offshorebereich (vergl. Abschnitt 3.2 sowie Listen aktueller Windturbinen verschiedener Hersteller im Anhang). Eine weitere Alternative zum Direktantrieb mit Permanentmagnet im Bereich

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

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 Cerium, 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 (Hoenderdaal et al., 2013; Habib und Wenzel, 2014). Magnete in Festplatten können zukünftig durch Solid State Drives (SSD) abgelöst werden, die keine beweglichen Teile und damit auch keine Magnete besitzen (siehe hierzu auch Abschnitt 3.2).

Recycling

Wie in Abschnitt 3.1 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 K., 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 (Bast et al., 2014, vergl. auch Erläuterungen in Abschnitt 3.2). Der hohe Anteil an Dysprosium in diesen Magneten wirkt sich auf Grund des höheren Wertes (vergl. Abbildung 1.6) 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, S.151). 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 1.2). 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 4.7a). Auf Basis der Leistungskennzahlen einzelner Fahrzeuge aus den jeweiligen Segmenten wurden für das Modell die in Abbildung 4.7b gezeigten Magnetgrößen pro Traktionsmotor angenommen.

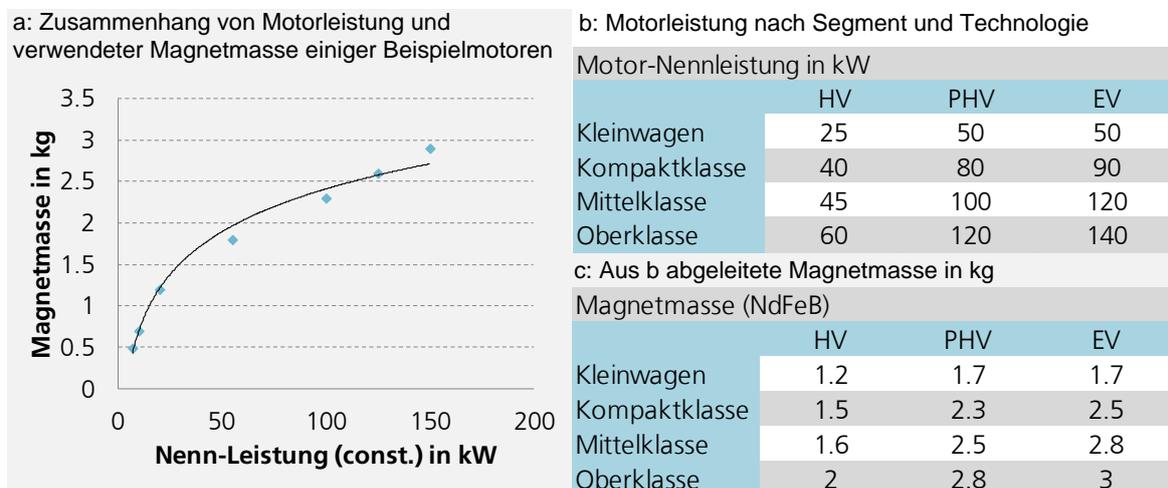


Abbildung 4.7.: Zusammenhang zwischen Motorleistung und Magnetgröße (siehe auch Tabelle 1.2) sowie Magnetgrößen nach Fahrzeugsegment und Antriebstechnologie.

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 Rohstoff-spezifischen 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 1.8), 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 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 4.5) in verschiedenen Szenarien sinnvoll abgebildet werden kann.

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 zukünftigen Entwicklung der Seltener-Erd-Förderung davon auszugehen, dass Bergbauprojekte mit einem hohen Anteil an schweren Seltenern 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

⁵Diese Aussage geht auf Mitarbeiter führender Automobilzulieferer zurück.

werden müssen (vergl. z.B. Kingsnorth, 2014). Folglich ist davon auszugehen, dass der Anteil an schweren Seltenen Erden innerhalb der gesamten Selten-Erd-Förderung tendenziell zunehmen wird. Für das Dysprosium-Angebot bedeutet dies, dass, wie in Abbildung 1.10 bereits aufgezeigt, der Anteil an der gesamten Selten-Erd-Förderung zunimmt. Folglich bedeuten die in Abbildung 4.8 aufgezeigten Angebotsszenarien zur Entwicklung der Dysprosium-Verfügbarkeit nicht zwingend, dass die gesamte Selten-Erd-Förderung im selben Maße wächst. Da Dysprosium ein Schlüsselement für verschiedene Zukunftstechnologien ist (direktangetriebene leistungsstarke Windturbinen, Elektromobilität, d.h. Hybrid- und reine Elektro-Pkw sowie Elektro-Zweiträder), ist von einer stärkeren Förderung auszugehen. Die Angebotsszenarien basieren auf einer jeweils linearen und polynomische Fortschreibung der historischen Entwicklung.

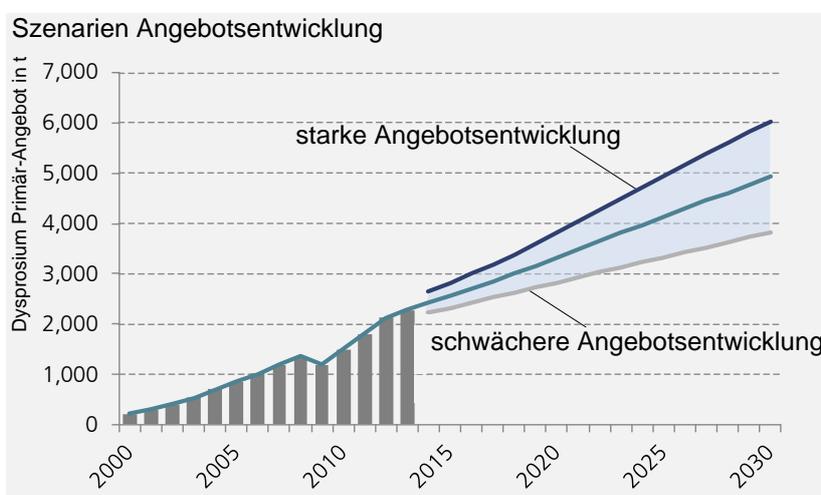


Abbildung 4.8.: Angebotsszenarien zur zukünftigen Verfügbarkeit von Dysprosium als Kuppelprodukt der gesamten Selten-Erd-Förderung. Die Szenarien basieren jeweils auf einer linearen und einer polynomischen Trendfortschreibung.

Inwiefern es zu Knappheiten bei den in Abbildung 4.8 gezeigten Angebotsszenarien auf Grund der durch die Diffusion alternativer Antriebe getriebenen Nachfrageentwicklung (vergl. Szenarien in Abbildung 4.3) 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 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 1.10 für aktuelle Massenanteile). 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 kommen.

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 4.3 Szenario 1). Wie in den Abbildungen 4.9 und 4.10 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 4.7), während die Batterien von Hybridfahrzeugen, da sie lediglich der Speicherung der Re-

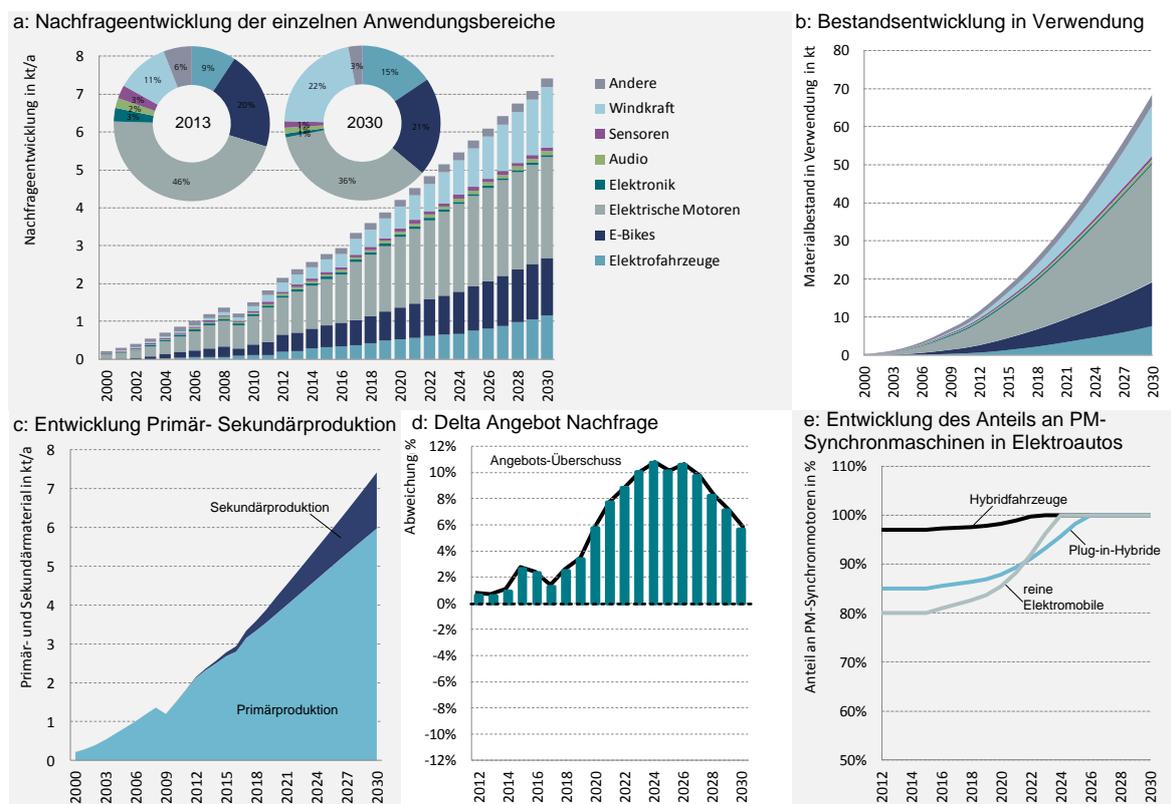


Abbildung 4.9.: Szenario starke Angebotsentwicklung Dysprosium, schwache Diffusion alternativer Antriebe.

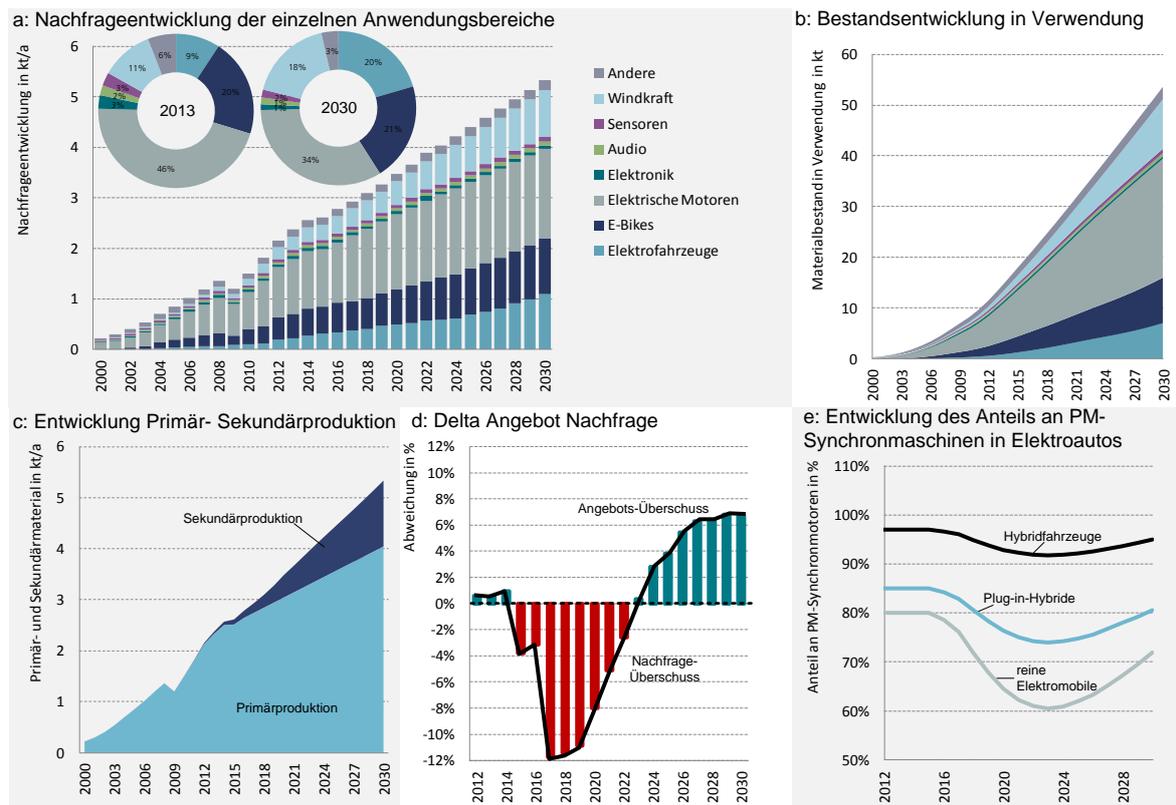


Abbildung 4.10.: Szenario schwache Angebotsentwicklung Dysprosium, schwache Diffusion alternativer Antriebe.

kuperationsenergie dienen, um ein Vielfaches kleiner dimensioniert sind als bei batterieelektrischen Fahrzeugen (1-2kWh im Vergleich zu 20-50kWh). 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, während die Auswirkungen auf die Nachfrage nach Li-Ionen-Batterien in diesem Szenario weit geringer ausfallen.

Wie in Abbildung 4.9 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 niedrigen Preisniveaus wahrscheinlicher erscheint, ist, wie Abbildung 4.9 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 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.

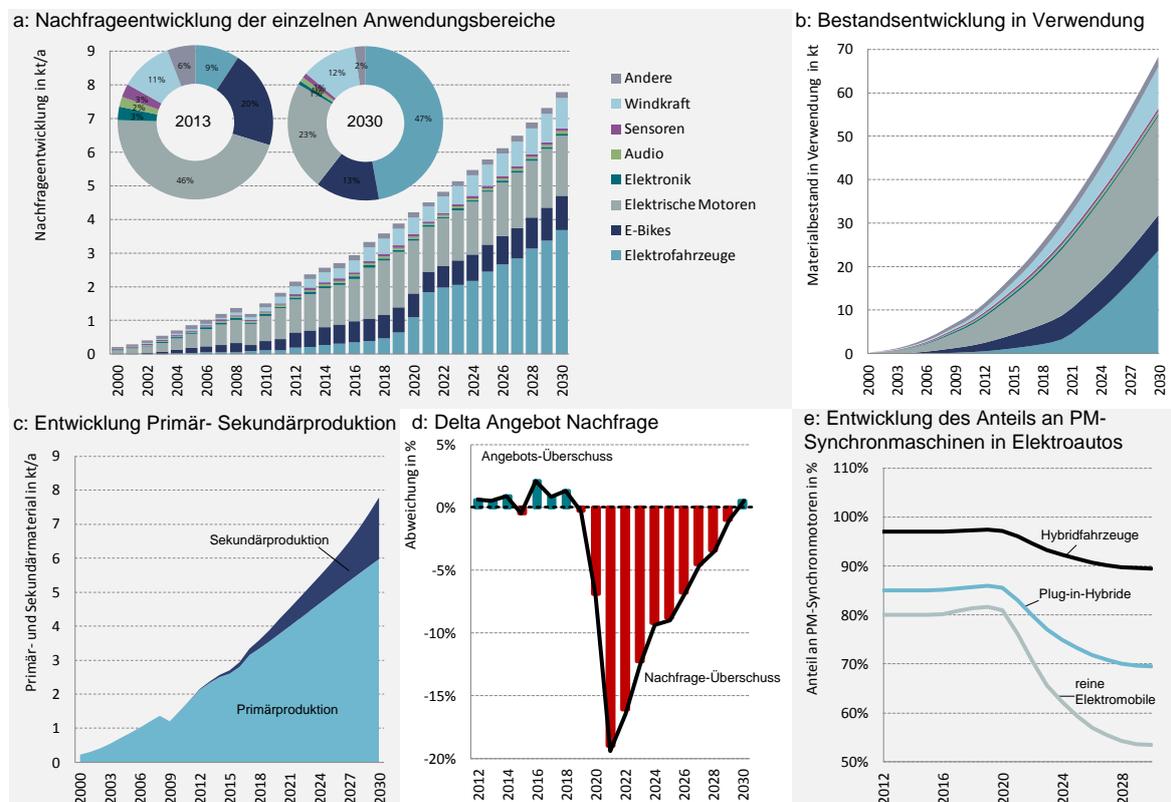


Abbildung 4.11.: Szenario starke Angebotsentwicklung Dysprosium, starke Diffusion alternativer Antriebe.

Eine verstärkte Entwicklung der Elektromobilität nach dem in Abbildung 4.3 beschriebenen Szenario 2 führt wie in den Abbildungen 4.11 und 4.12 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 4.3) 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 4.11d).

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

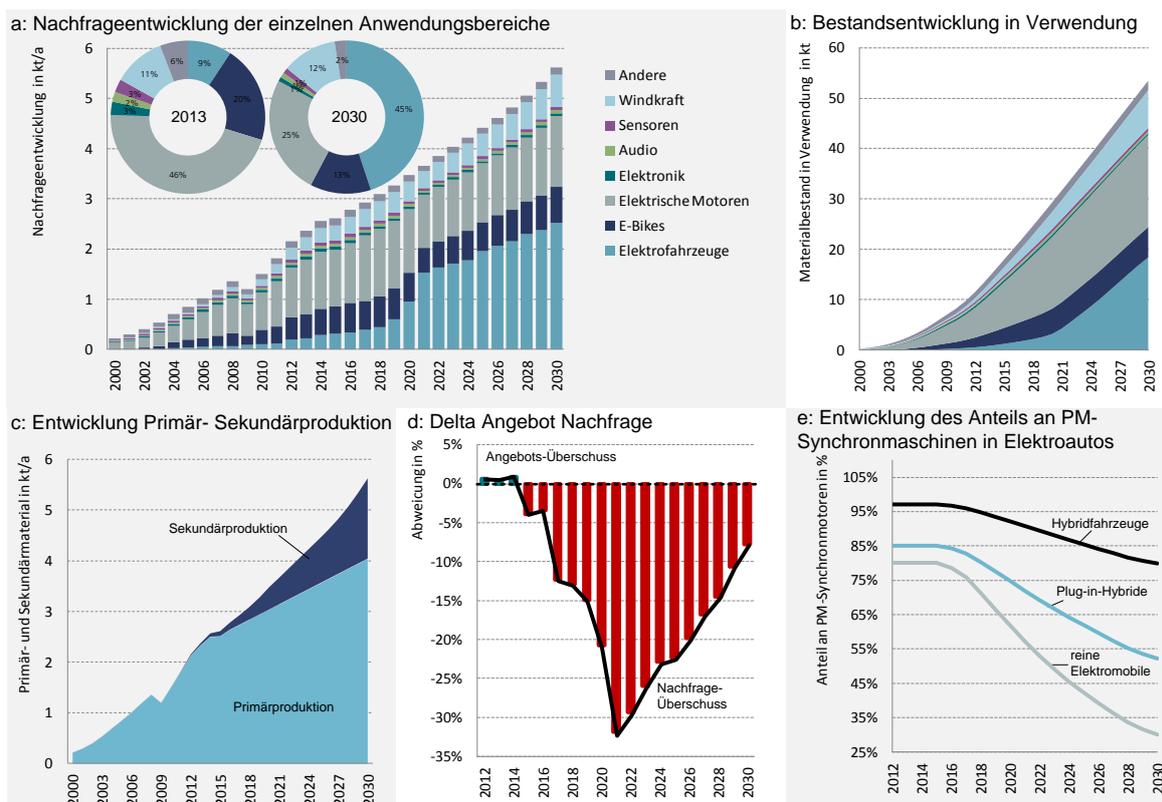


Abbildung 4.12.: Szenario schwache Angebotsentwicklung Dysprosium, starke Diffusion alternativer Antriebe.

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-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 Bericht an Hand 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. Während sich auf globaler Ebene ein Top-Down-Ansatz zur Modellierung der Materialbestände in Verwendung und der offenen Kreislaufsysteme als passend erwiesen hat, wurde für das deutsche Modell auf ein Bottom-Up-Ansatz zurückgegriffen um sowohl von detaillierteren Marktkenntnissen zu profitieren als auch um die mangelnde Verfügbarkeit von Top-Down-Daten zu umgehen.

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 relativ 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 recycelt werden. Da verschiedene Motorkonzepte mit und ohne Permanentmagnet (Käfigläufer-Asynchronmotor, Synchron-Induktionsmotor, PM-Synchronmotor, Reluktanzmotor etc.) sowie verschiedene Magnetmaterialien (NdFeB-Magnete, Ferrite) existieren, und das Motorkonzept von außen kaum ersichtlich ist, wäre eine (ggf. gesetzlich vorgeschriebene) Markierung der Motoren am Gehäuse für eine effiziente Sammlung von NdFeB-Magneten entscheidend.

Wie das Stoffstrommodell von NdFeB-Magneten für Deutschland gezeigt hat, könnte das Recycling von NdFeB-Magneten zu einem erheblichen Beitrag der in Deutschland produzierten Magnete führen. Die starke, exportorientierte Automobil- und Maschinenbau-Industrie in Deutschland hat allerdings erheblichen Bedarf an NdFeB-Magneten, der zwar nicht eindeutig quantifizierbar ist, aber mit Sicherheit das Recyclingpotenzial in Deutschland bei weitem übersteigt. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass ein Großteil der in Deutschland produzierten Maschinen exportiert wird und auch der Anteil an Exporten gebrauchter Geräte (gebrauchte PKW, alte Produktionsanlagen, leistungsschwächere Windanlagen in guter Lage, die durch größere Anlagen ersetzt werden) sehr hoch ist. So werden in Deutschland beispielsweise knapp 6 Mio. PKW jährlich produziert, ca. 3 Mio. PKW jährlich stillgelegt, aber nur 0,5 Mio. PKW verschrottet. Die restlichen ca. 2,5 Mio. PKW werden als Gebrauchtwagen exportiert, was das Potenzial der Rückgewinnung enthaltener Magnete stark einschränkt.

Während die Stoffstrommodelle insbesondere auf regionaler Ebene bereits erhebliche Informationen zum versorgungsstrategisch bedeutsamen potenziellen Beitrag von Sekundärmaterial zum gesamten Rohstoffverbrauch liefern, kann eine Ergänzung der globalen Modelle um marktdynamische Rückkopplungseffekte 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 wurden die globalen dynamischen Stoffstrommodelle 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 Dysprosimium essentiell für die Entwicklung und Verbreitung von Zukunftstechnologien wie die Elektromobilität, hoch effiziente Servomotoren im allgemeinen Maschinenbau, oder Leistungsstarke Windkraftanlagen mit Direktantrieb.

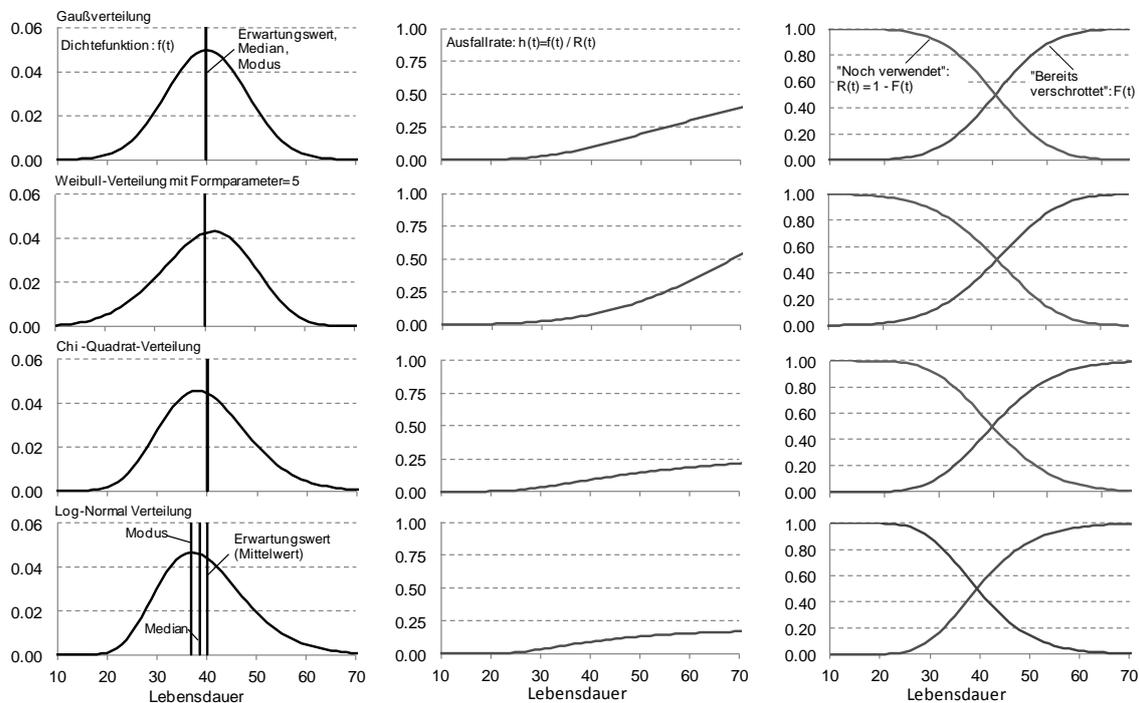
A. Anhang

Tabelle A.1.: Typische elektrische Kleinmotoren in konventionellen PKW und ihre theoretische Magnetmasse, wenn alle Motoren als PM-Synchronmotoren mit NdFeB-Magneten ausgelagert wären. Die Abschätzung der Magnetmasse erfolgte über die Motorleistung.

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 automatic 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, Palyer etc.)	10	
Zentralverriegelung	50	5 mal je 0.01
Sitzbelüftung	500	

Tabelle A.2.: Aktuelle Windkraftanlagen der für den deutschen Markt relevanten 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)	PM	-	onshore-/offshore
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



Typische Lebensdauerverteilungen 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:

$$f(x) = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{x}{T}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{T}\right)^b}$$

mit $t, T, b \geq 0$ b als Formfaktor und T als Charakteristische Zeit

Chi-Quadrat Verteilung:

$$f(x) = \frac{x^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{x}{2}}}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}, \quad x > 0$$

mit Γ 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 A.1.: Typische Lebensdauerverteilungen aus den Bereichen der Sicherheitstechnik und des Qualitätsmanagements.

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., 2012a. Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies. *Environmental Science & Technology* 46, 3406–3414.
- Alonso, E., Wallington, T., Sherman, A., Everson, M., Field, F., Roth, R., Kirchain, R., 2012b. An assessment of the rare earth element content of conventional and electric vehicles. Bericht. SAE Technical Paper.
- 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 Fahrtriebwerken. Bericht. MORE (Motor Recycling). 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.
- Böni, H., Wäger, P., Figi, R., 2015. Rückgewinnung von kritischen Metallen wie Indium und Neodym aus Elektronikschrott auf der Stufe der manuellen und mechanischen Vorbehandlung, in: Thomé-Kozmiensky, K.J., Goldmann, D. (Herausgeber), *Recycling und Rohstoffe*, Band 8. TK, Neuruppin. Ausgabe 8, Seiten 443–462.
- 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.
- Buchert, M., Manhart, A., Sutter, J., 2013. Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg. Bericht. Öko-Institut e.V. 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.

- 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 and Oak Ridge, Tenn. URL: <http://www2.metcer.ameslab.gov/Ames%20Laboratory%20Report%20IS-5191%20IPM%20Cost%20Analysis%20by%20P.%20Campbell.pdf>.
- 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.
- Constantinides, S., 2012. The Demand for Rare Earth Materials in Permanent Magnets. Bericht.
- Constantinides, S., 2013. Magnet FAQs. Bericht.
- Cullbrand, K., Olof, M., 2011. The Use of Potentially Critical Materials in Passenger Cars. Bericht. Department of Energy and Environment, Division of Environmental Systems Analysis. URL: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/162842.pdf>.
- 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.
- Erdmann, L., Behrendt, S., Feil, M., 2011. Kritische Rohstoffe für Deutschland, Anhang: Identifikation aus Sicht deutscher Unternehmen wirtschaftlich bedeutsamer mineralischer Rohstoffe, deren Versorgungslage sich mittel- bis langfristig als kritisch erweisen könnte. Bericht. IZT / adelphi, Berlin.
- 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.
- 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. Ausgabe 150 von *Arbeitsbericht*. Büro für Technikfolgenabschätzung beim deutschen Bundestag, 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.
- 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. System Dynamics Society, Seiten 1–20.

- 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.
- 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., Schibbye, 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.
- Hagelüken, C., 2010. Lagerstätten auf Rädern: Intelligente Recyclingkonzepte könnten wesentlich zur Versorgungssicherheit bei Technologiemetallen beitragen. *ReSource* , 30–33.
- Hagelüken, C., 2014. Aufbereitung und Verarbeitung von Seltenerdmetallen, in: Kausch, P., Bertau, M., Gutzmer, J., Matschullat, J. (Herausgeber), *Strategische Rohstoffe - Risikovororge*. Springer Spektrum, Berlin, Seiten 161–172.
- Hatch, G., 2011. Critical Rare Earths: Global supply & demand projections and the leading contenders for new sources of supply. Bericht.
- 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: Anhang zum Schlussbericht 2013. Universität Bern, IKAÖ, Bern.
- Hurst, C., 2010. CHina's Rare Earth Elements Industry: What Can the West Learn? Bericht. DTIC Document.
- IEA, 2013. Technology Roadmap: Wind Energy. Bericht. IEA. Paris.
- INSG, 2014. The Global E-bike Market: INSG SECRETARIAT BRIEFING PAPER. Bericht. International Nickel Study Group. URL: http://www.insg.org/%5Cdocs%5CINSG_Insight_23_Global_Ebike_Market.pdf.
- Kahle, W., Liebscher, E., 2013. Zuverlässigkeitsanalyse und Qualitätssicherung. Oldenbourg, 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.
- Kohlmeyer, R., Groke, M., Sander, K., Bergamos, M., 2015a. Perspektiven der zunehmenden Fahrzeugelektronik für das Altfahrzeugrecycling, in: Thomé-Kozmiensky, K.J., Goldmann, D. (Herausgeber), *Recycling und Rohstoffe*, Band 8. TK, Neuruppin. Ausgabe 8, Seiten 183–205.
- Kohlmeyer, R., Groke, M., Sander, K., Bergamos, M., 2015b. Rückgewinnung kritischer Metalle: Seltene erden in permanentmagneten können nicht gleichwertig substituiert werden. *ReSource*, 27–37.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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. 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. United Nations Environment Programme UNEP.
- 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, 2014. Roskill Information Services Ltd.: Rare Earths & Yttrium: Market Outlook to 2015: A quick introductory guide to rare earths. Bericht. Roskill Information Services Ltd.

- Sander, K., Schilling, S., 2010. Transboundary shipment of waste electrical and electronic equipment / electronic scrap –Optimization of material flows and control. Bericht.
- Schade, W., Zanker, W., Kühn, A., Kinkel, S., Jäger, A., Hettesheimer, T., Schmall, T., 2012. Arbeitsbericht Nr.152 - Zukunft der Automobilindustrie. Bericht.
- Schüler, D., Buchert, M., 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.
- 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.
- 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.
- UBA, 2012. *Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2012*. Bericht. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.
- U.S. Geological Survey, 2011. *Rare earth elements - end use and recyclability: Scientific investigations report 5094*. online.
- U.S. Geological Survey, 2013. *2013 minerals yearbook: Rare earths*. URL: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/myb1-2011-raree.pdf.
- U.S. Geological Survey, 2014. *Mineral commodity summaries 2014*.
- VDA, 2000-2013. *Tatsachen und Zahlen*. Bericht. Verband der deutschen Automobilindustrie.
- Wallasch, A.K., Ekkert, M., Rehfeldt, K., 2012. *Status des Windenergieausbaus in Deutschland: Zusätzliche Auswertungen und Daten für das Jahr 2012*. URL: http://www.windguard.de/_Resources/Persistent/8b3511aa74391a517ca880a6898be0a482b4b436/Windenergieausbau-in-Deutschland-2012-12-31-Zusaetzliche-Daten.pdf.
- Wallentowitz, H., Freialdenhoven, A., 2011. *Strategien Zur Elektrifizierung Des Antriebsstranges: Technologien, Märkte und Implikationen*. Vieweg + Teubner Verlag.
- Wehrspohn, R.B., 2014. *Leitprojekt Kritikalität Seltener Erden: Interner Newsletter*.
- 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>.

- Westphal, L., Kuchta, K., 22.03.2012. Permanentmagnete in Elektrogeräten: Möglichkeiten und Grenzen bei der Erfassung und dem Recycling. URL: <http://www.dgaw.de/files/uploaded/Westphal.pdf>.
- Westphal, L., Kuchta K., 2013. Versorgungsengpässen vorbeugen: Seltene erden in permanentmagneten können nicht gleichwertig substituiert werden, in: Reiser, B. (Herausgeber), ReSource. Rhombos-Verlag, Berlin. Ausgabe 4 2013, Seiten 10–15.
- Westphal, L., Kuchta K., Hobohm J., 2014. Permanentmagnete in der feinkornaufbereitung von elektro- und elektronikgeräten, in: Teipel, U., Reller, A. (Herausgeber), Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen: 05./06. Februar 2014 Neues Museum Nürnberg. Fraunhofer-Verlag, Stuttgart, Seiten 243–250.
- Widmer, R., Du, X., Haag, O., Restrepo, E., Wäger, P.A., 2015. Scarce metals in conventional passenger vehicles and end-of-life vehicle shredder output. *Environmental Science & Technology* 49, 4591–4599.
- Wilde, A., 2008. NdFeB magnets in the context of automotive applications. URL: http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/20080702_alexandrawilde.pdf.
- Wübbecke, 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 and London.
- Ziemann, S., Schebek, L., 2010. Substitution knapper Metalle - ein Ausweg aus der Rohstoffknappheit? *Chemie Ingenieur Technik* 82, 1965–1975.