

DYNAMISCHE MATERIALFLUSS-ANALYSE DER MAGNETWERKSTOFFE NEODYM UND DYSPROSIUM IN DEUTSCHLAND¹

S. Glöser-Chahoud¹, M. Pfaff¹, L. Tercero Espinoza¹, M. Faulstich²

¹ Fraunhofer ISI, Breslauerstr. 48, D-76139 Karlsruhe, e-mail: simon.gloeser@isi.fraunhofer.de

² CUTEC Institut an der TU Clausthal, Leibnizstr. 21, D-38678 Clausthal-Zellerfeld

Keywords: *NdFeB-Magnete, Neodym, Dysprosium, Seltene Erden, Recyclingpotenziale, Stoffstromanalysen, Rohstoffabhängigkeiten*

1 Einleitung

Im Kontext der aktuellen Diskussion um kritische und wirtschaftsstrategische Rohstoffe werden die Metalle der Seltenen Erden auf Grund der nahezu monopolistischen Stellung Chinas als Produzent häufig an erster Stelle genannt (vergl. z.B. aktuelle Liste zu kritischen Rohstoffen der EU^[1]). Obwohl es sich bei Seltenen Erden um eine Gruppe von 17 verschiedenen Elementen handelt (Lanthanoide zuzüglich Scandium und Yttrium, vergl. Abb. 1), werden diese in vielen Studien zur Bewertung der Versorgungssicherheit als einheitliche Stoffgruppe betrachtet [2]. Zwar werden die Metalle der Seltenen Erden im Verbund gewonnen, dennoch bestehen erhebliche Unterschiede hinsichtlich der Häufigkeit verschiedener Elemente im Produktionsgemisch und bezüglich ihrer technischen Verwendungsstrukturen, was eine individuelle Betrachtung einzelner Seltenerd-Elemente notwendig macht.

Auch bei der Produktion der derzeit stärksten Permanentmagnete, den NdFeB-Magneten (Neodym-Eisen-Bor), die insbesondere für permanentmagnetisch erregte Synchron-Servomotoren und Generatoren in verschiedensten Zukunftstechnologien (Elektromobilität, Windenergie etc.) wichtig sind, nimmt China eine zentrale Rolle ein [3].

Für die Magnetherstellung relevante Seltene Erden

57 Lanthan La	58 Cer Ce	59 Praseodym Pr	60 Neodym Nd	61 Promethium Pm	62 Samarium Sm	63 Europium Eu	64 Gadolinium Gd	65 Terbium Tb	66 Dysprosium Dy	67 Holmium Ho	68 Erbium Er	69 Thulium Tm	70 Ytterbium Yb	71 Lutetium Lu	21 Scandium Sc	39 Yttrium Y
Leichte Seltene Erden (LREE)									Schwere Seltene Erden (HREE)							

Abb. 1: Die Stoffgruppe der Seltenerd-Metalle, Unterscheidung zwischen schweren (Heavy Rare Earth Elements, HREE) und leichten (Light Rare Earth Elements, LREE) Seltenen Erden und Kennzeichnung der für die Magnetherstellung relevanten Elemente [4].

¹ Erschienen in: 4. Symposium Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen, Tutzing, 17./18. Februar 2016, Herausgegeben von Ulrich Teipel und Armin Reller, Fraunhofer Verlag 2016

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 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.

2 Die Magnetwerkstoffe Neodym und Dysprosium

Im vorliegenden Beitrag werden die Verwendungsstrukturen der Seltenen Erden Neodym und Dysprosium, die zum größten Teil bzw. ausschließlich in NdFeB-Magneten (Neodym-Eisen-Bor-Magneten) eingesetzt werden, 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 Effizienzaspekte eine wichtige Rolle spielen. Die Entwicklung von Permanentmagnet-Materialien seit Beginn des 20. Jahrhunderts ist in Abb. 2 dargestellt.

Neodym als dritthäufigste Seltene Erde (nach Cer und Lanthan^[4]) wird neben der Verwendung als Magnetwerkstoff (ca. 90 % der Weltproduktion^[5]) auch in NiMH-Batterien (Nickel-Metall-Hydrid-Batterien^[6]) und sonstigen Metalllegierungen (z.B. spezielle Aluminium- und Magnesiumlegierungen^[7]), sowie in Leuchtstoffen verwendet [8]. Weitere Anwendungsgebiete mit geringem Verbrauchsvolumen bilden die Verarbeitung in Lasersystemen zur Metallbearbeitung und das Färben von Emaille, Porzellan und Glas [6]. Da der Fokus dieses Beitrags auf Magnetwerkstoffen liegt, werden die weiteren Anwendungsbereiche auch aufgrund

ihrer niedrigen Mengenrelevanz 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^[8]).

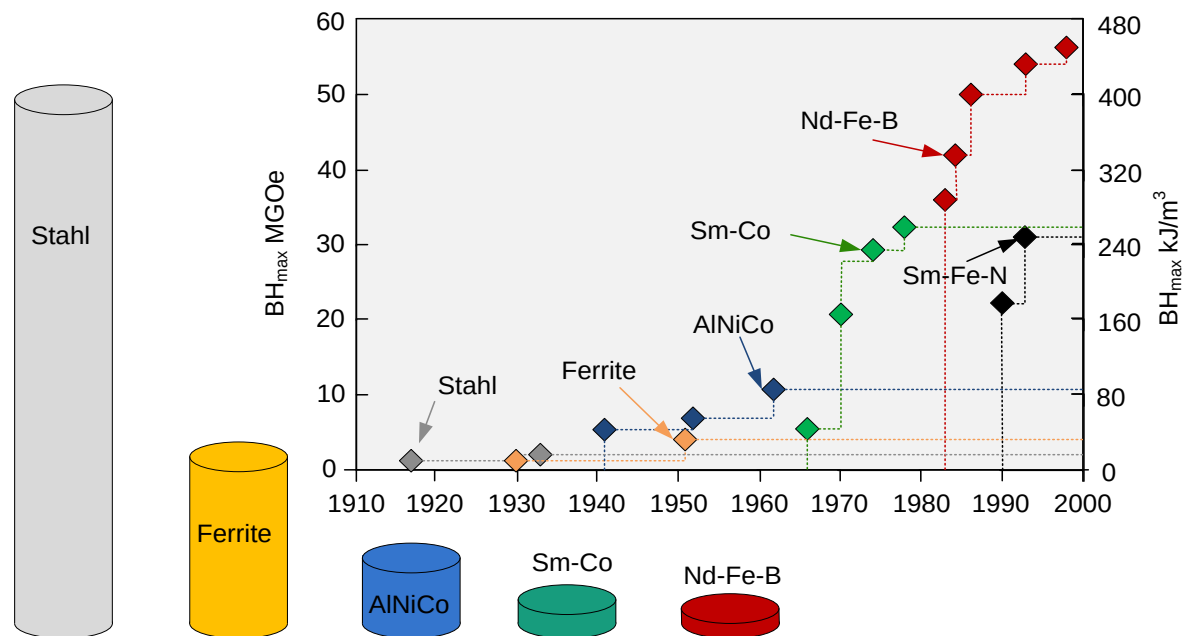


Abb. 2: Entwicklung der Magnettechnologien im vergangenen Jahrhundert sowie Vergleich der Magnetgröße unterschiedlicher Magnetmaterialien bei einheitlicher magnetischer Energie [9]. Abkürzungen: SmCo (Samarium-Kobalt), AlNiCo (Aluminium-Nickel-Kobalt).

Dysprosium wird nahezu ausschließlich in Neodym-Magneten verwendet [10] 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 Abb. 3).

Im Gegensatz zu fremderregten Elektromagneten bestehen Permanentmagnete 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 wichtigsten physikalischen Kenngrößen von Permanentmagneten, die für das Verständnis der Dysprosium-Beimischung in NdFeB-Magneten entscheidend sind, werden nachfolgend 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 [$1 \text{ MGOe} = 7.96 \text{ kJ/m}^3$].

Sie entspricht, 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: [A/m], bzw. Oersted [Oe] wobei [1 Oe = 79,58 A/m].

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

Betriebstemperatur T : Die Betriebstemperatur gibt an, bis zu welcher Temperatur des Magneten die unvermeidliche Entmagnetisierung äußerst langsam verläuft. Einheit: [°C].

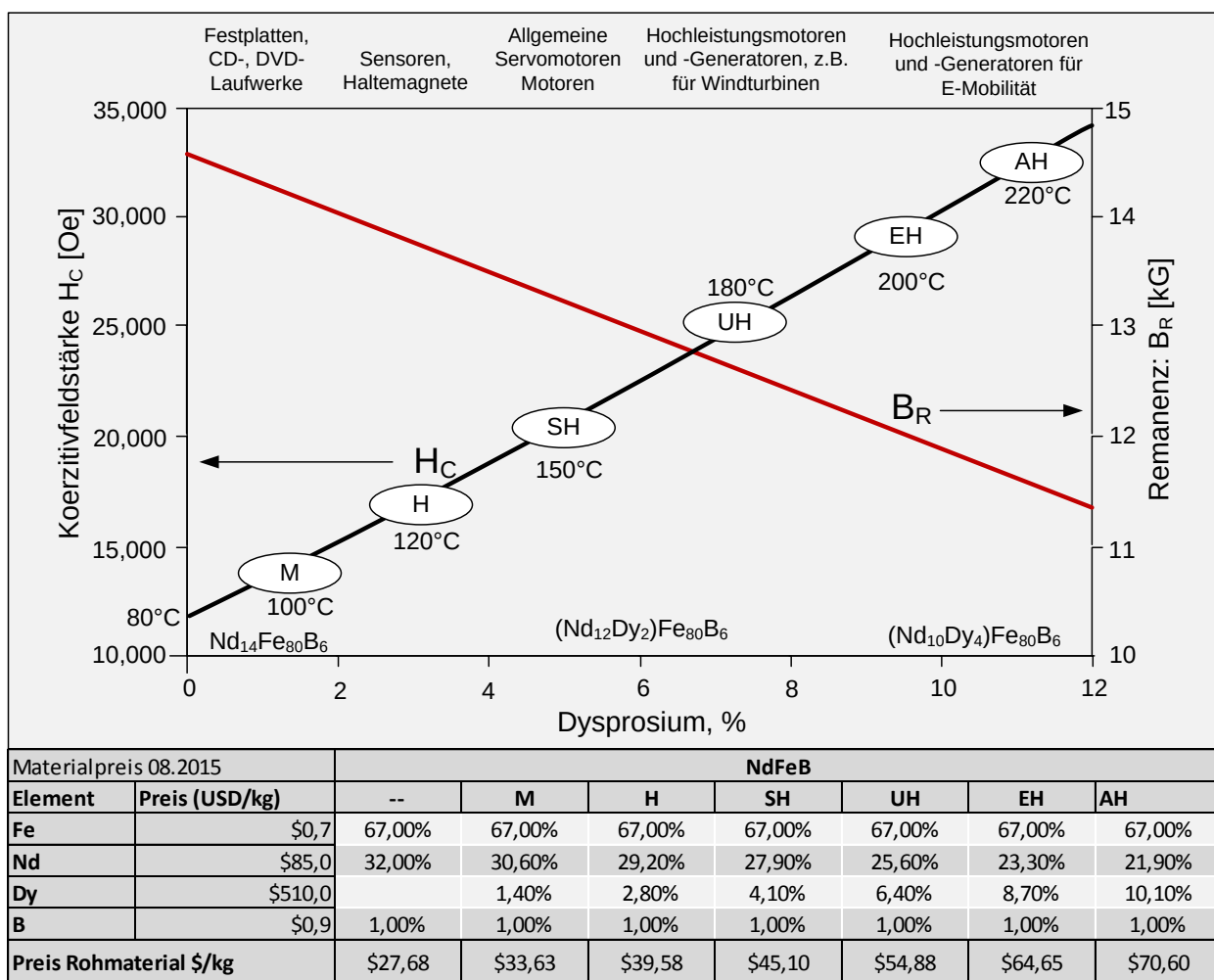


Abb. 3 Eigenschaften von NdFeB-Magneten und die Auswirkungen der Dysprosiumbeimischung auf die Remanenz und Koerzitivfeldstärke [9]. Die Bezeichnungen M, H, SH usw. stellen allgemeine Klassifikationen von NdFeB-Magneten nach Betriebstemperatur dar [11].

Wie in Abb. 3 dargestellt, wird die Remanenz, also die im Magnet verbleibende Flussdichte, 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. Abb. 3). Gleichzeitig sinkt allerdings auch die Restmagnetisierung (Remanenz). Wie die Tabelle in Abb. 3 unten zeigt, steigen mit zunehmendem Anteil 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. NdFeB-Magnete werden aus Magnetlegierungen im Sinter- oder Fügeverfahren hergestellt. Gesinterte 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 Kleinmotoren (z.B. im Automobilbereich) eine Rolle spielt. Circa 94 % der NdFeB-Magnete sind gesinterte und 6 % gebundene Magnete [12]. In Abb. 4 wird die jährliche globale Produktion von Neodym-Magneten (beider Verfahren) dargestellt.

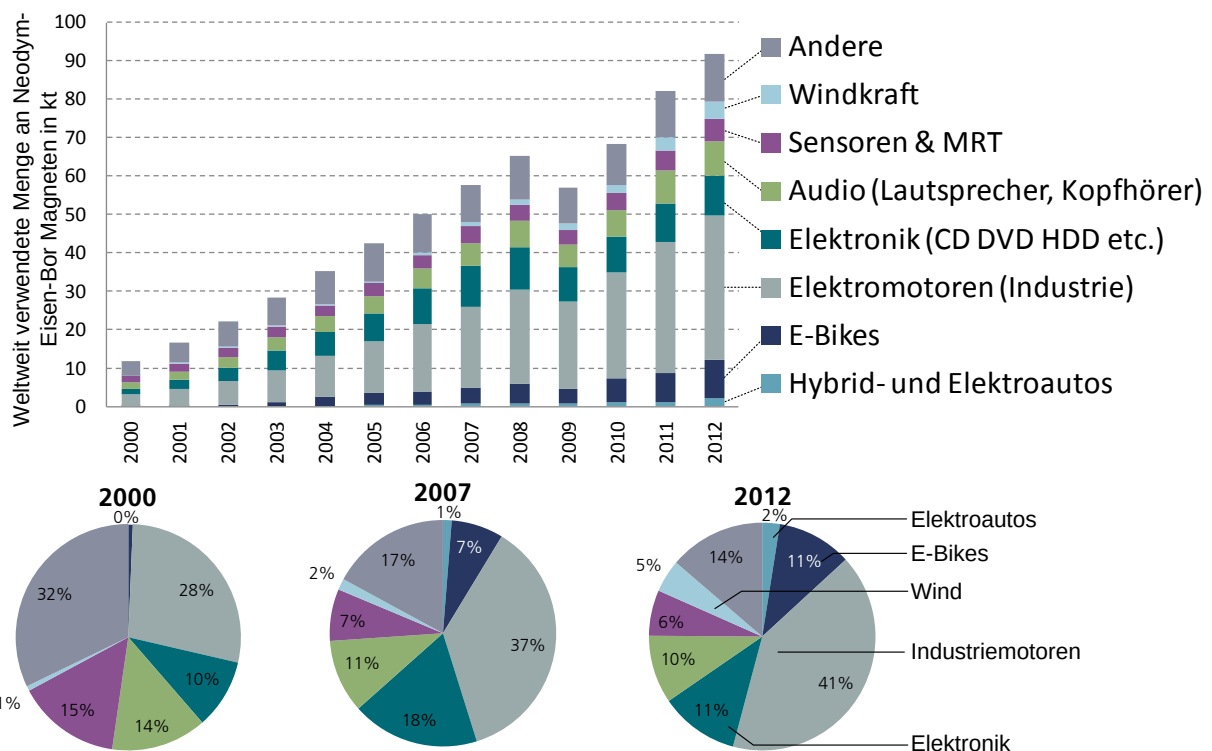


Abb. 4: Globale Produktionsmengen und Verwendungsstrukturen von NdFeB-Magneten [9; 13; 14].

Die Magnetproduktion wuchs innerhalb der ersten sechs Jahre des 21. Jahrhunderts um durchschnittlich 25 % pro Jahr und verlagerte sich zunehmend nach China, was nicht zuletzt von Exportzöllen- und Restriktionen im Export von Seltenen Erden seitens der chinesischen Regierung beeinflusst wurde. So war eine sichere Versorgung mit Neodym und Dysprosium zu verhältnismäßig niedrigen Preisen lediglich in China gegeben, was dazu geführt hat, dass amerikanisch, japanische und europäische Hersteller ihre Produktion zunehmend nach China verlagert, oder eingestellt haben. Heute stammen ca. 90 % der NdFeB-Magnete aus China [5].

Die Verwendungsstrukturen von NdFeB-Magneten in Deutschland und eine Analyse zukünftiger Recyclingpotenziale aus obsoleten Produktströmen basierend auf einer produktspezifischen Bottom-up-Modellierung werden im Folgenden vorgestellt. Hierzu erfolgt zunächst eine kurze Erläuterung der Methodik.

3 System Dynamics als Ansatz zur Modellierung von Stoffströmen

Die methodischen Grundlagen zur Entwicklung von dynamischen Stoffkreislauf-Modellen werden im folgenden Abschnitt erläutert.

3.1 Grundprinzip der systemdynamischen Modellierung

Der System Dynamics Ansatz basiert auf dem Zusammenspiel von Bestands- und Flussvariablen und deren gegenseitigen Abhängigkeiten [15]. 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. Abb. 5).

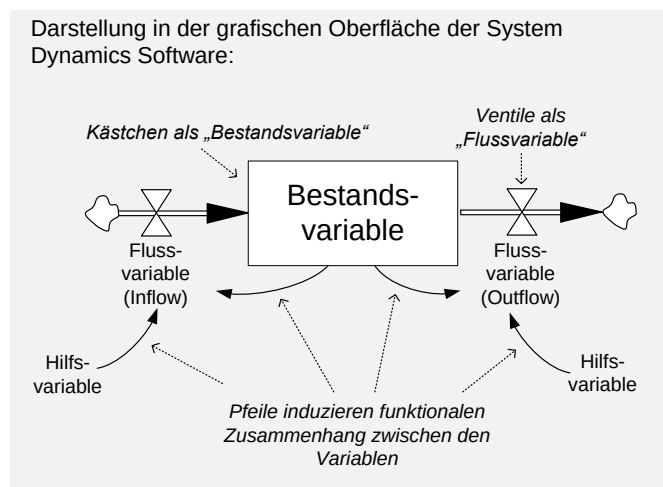
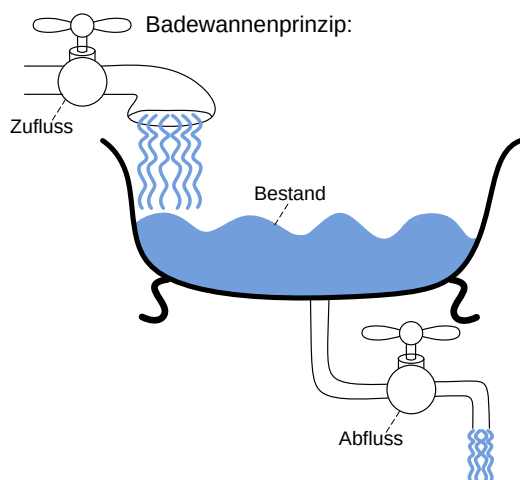


Abb. 5: Das „Badewannen-Prinzip“ zur Veranschaulichung der Bestands- und Flussvariablen in der System Dynamics Modellierung [16].

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. Abb. 5 rechts).

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. 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. Dabei spielen zunächst nur die verschiedenen Formen von Verzögerungsfunktionen eine Rolle. Rückkopplungseffekte, die für die Formulierung dynamischer Zusammenhänge nach dem Prinzip eines Regelkreises notwendig sind, sind zur reinen Simulation von physischen Stoffströmen zunächst nicht relevant und werden daher in diesem Beitrag nicht näher betrachtet.

3.2 Simulation von Produkt-Alterungsprozessen und Rohstoffkreisläufen

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.

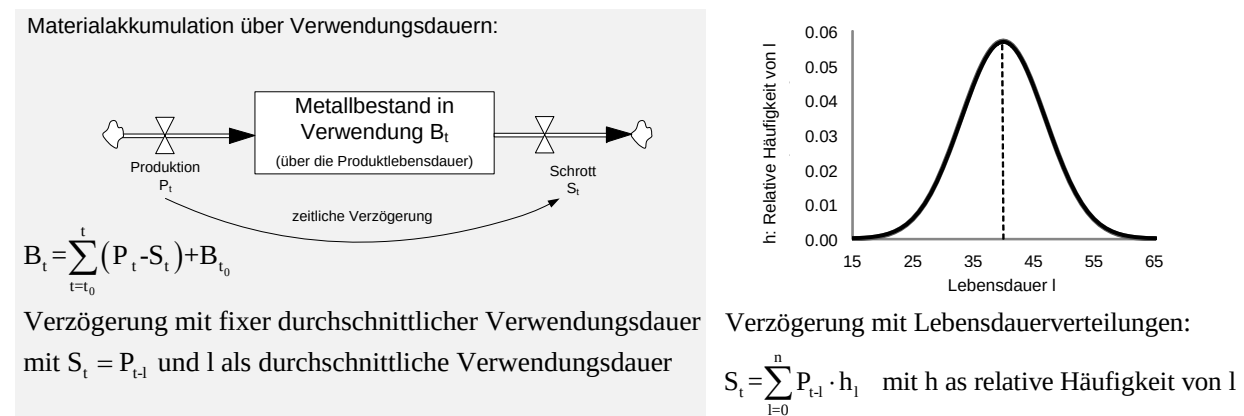


Abb. 6: Akkumulation von Produkten und Materialien über die Verwendungsdauern mit Hilfe von fixen durchschnittlichen Verwendungsdauern bzw. Verteilungsfunktionen [17].

Die Gesamtproduktionsmengen, ebenso wie die Produktion aus primären Quellen (Verarbeitung von Erzen aus den Minen) sind meist bekannt. So kann die Recyclingmenge über die Differenz aus Gesamtproduktion und Primärproduktion errechnet werden [18]. 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 Abb. 6 und Abb. 7 beschriebenen Prinzip

herangezogen werden. Die Abschätzung des Schrottaufkommens erfolgt als Verzögerungsfunktion historischer Produktions- bzw. Verbrauchszahlen (vergl. Abb. 6).

Teilweise ist es aufgrund der kurzen Innovationszyklen neuer Technologien und den damit verbundenen sich rasch ändernden Rohstoffstrukturen wichtig, eine genauere Vorstellung von der Zusammensetzung der Schrotte, deren Alter usw. zu bekommen [19]. Hierzu kann die in Abb. 7 beschriebene "Aging Chain" herangezogen werden.

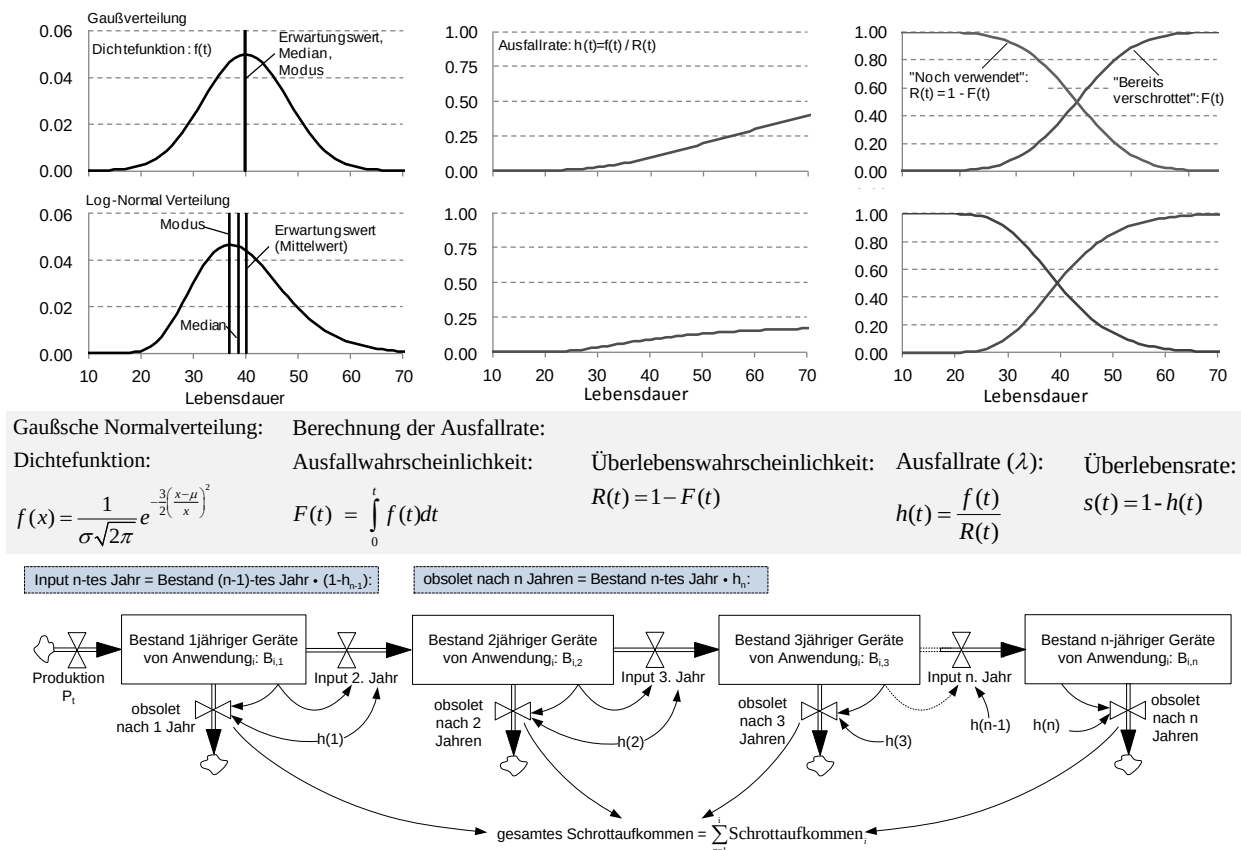


Abb. 7: Detaillierte Simulation von Produktlebenszyklen und Alterungsprozessen über sogenannte "Aging Chains" und korrespondierende Ausfallwahrscheinlichkeiten [20].

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 Verteilungsfunktionen nach dem in Abb. 7 dargestellten Prinzip berechnen. Während in Abb. 7 das Beispiel der Gaußschen Normalverteilung sowie einer rechtsschiefen Log-Normalverteilung aufgeführt ist, existieren weitere typisch Funktionstypen zur Beschreibung der Nutzungsdauerverteilung, wie z.B. Weibull Funktionen etc. [21]. Die flexible Modellgestaltung ermöglicht hier die Verwendung beliebiger Verteilungsfunktionen. Im Bereich der Bewertung der Sicherheit und Qualität technischer Anlagen ist das Prinzip der Ausfallwahrscheinlichkeiten seit langem verbreitet und in der Fachliteratur zugänglich [22]. 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 Einflussnahme 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 Abb. 8 dargestellt.

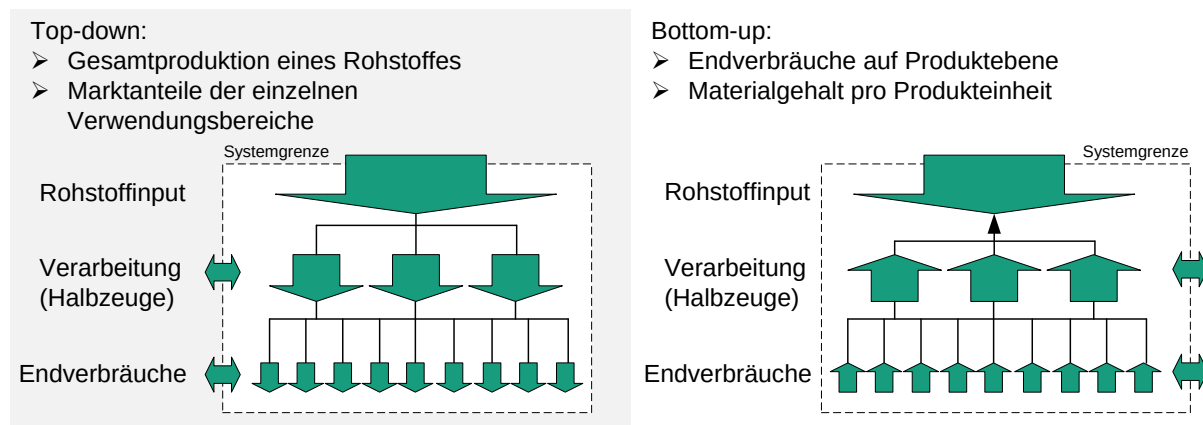


Abb. 8: Top-down und Bottom-up-Ansätze zur Quantifizierung und Modellierung von Materialflüssen [20].

Tendenziell eignen sich für globale und geographisch weitläufigere Analysen (bis hin zur Länderebene) Top-down-Ansätze [23], 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 [24]. Auch sind Bottom-up-Ansätze bei der Stoffstromanalyse von Technologiemetallen häufig notwendig (wie in diesem Beitrag), da die Datenlage zu Produktionsmengen und Verwendungsstrukturen oft unvollständig erscheint und der Stoffaustausch über die Systemgrenzen aufgrund von unzureichendem Detailgrad der Güterklassifikationen (z.B. Klassifikationen (HS, CN) zur Bestimmung von Handelsdaten) nicht eindeutig nachvollzogen werden kann. Zu beachten ist, dass durch die pauschale Abschätzung von Materialgehalten pro Produkteinheit (z.B. g Neodym 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 [21].

4 Materialfluss-Analyse von NdFeB-Magneten in Deutschland

Die Datengrundlage bezüglich der Verarbeitung von NdFeB-Permanentmagneten, bzw. Seltenen Erden insgesamt, ist eher spärlich. Über die Güterklassifikationen in den Handels- und Produktionsdaten lassen sich weder einzelne Seltenerd-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 1 gegeben.

Tabelle 1: Hersteller von NdFeB-Magneten in Deutschland basierend auf Unternehmensdatenbanken 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. 1500 t in Deutschland [25]
MS Schramberg GmbH	Hersteller von polymergebundenen NdFeB-Magneten	ca. 150 t in Deutschland [12]
ThyssenKrupp Magnet-technik Schulte GmbH	Vertrieb von gesinterten NdFeB-Magneten	Produktionsmenge in Deutschland unklar, wahrscheinlich reine Importware
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-Magneten 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.

Da die Unternehmen kaum Daten zu ihren Produktionsmengen nennen², bleibt lediglich eine grobe Abschätzung der Kapazitäten. Insgesamt ist die europäische Produktion von NdFeB-Magneten nahezu vollständig auf deutsche Hersteller zurückzuführen [12]. Diese wird auf ca. 2000 t/a geschätzt [3], wobei die Kapazitäten des größten europäischen Herstellers, der Vacuumschmelze in Hanau, bei bis zu 5000 t/a an gesinterten NdFeB-Magneten liegen [12]. Da die Vacuumschmelze, wie auch weitere Unternehmen aus Tabelle 1 neben dem Produktionsstandort Deutschland auch in China eigene Produktionsstätten betreiben, oder

² Gezielte Anfragen bei einzelnen Unternehmen wurden nicht eindeutig beantwortet.

Partnerschaften mit chinesischen Herstellern haben (also Magnete aus China in Deutschland vertreiben), ist es kaum möglich, genaue Zahlen zum Produktionsvolumen in Deutschland zu bekommen. Dies hängt auch damit zusammen, dass seitens der Industrie kein Interesse besteht, genaue Produktionsmengen offenzulegen [26], da dies durchaus die Vulnerabilität der eigenen Wertschöpfung offenlegen kann und zu Wettbewerbsnachteilen führen könnte. Allerdings gibt es in Deutschland neben der Vacuumschmelze eine Reihe mittelständischer Unternehmen (vergl. Tabelle 1), 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.

4.1 Modellstruktur

Welche Menge an fertigen NdFeB-Magneten, aber auch an entsprechenden PM-Synchron-Servomotoren nach Deutschland importiert werden, ist auf Basis herkömmlicher Produktions- und Güterklassifikationen aufgrund mangelnder Produktspezifikationen nicht nachvollziehbar [27]. Hier können lediglich allgemeine Handelsbilanzen und Produktionsstatistiken entlang der Wertschöpfung betrachtet werden, was einen gewissen Rückschluss auf Rohstoff- und Materialbedarfe ermöglicht.

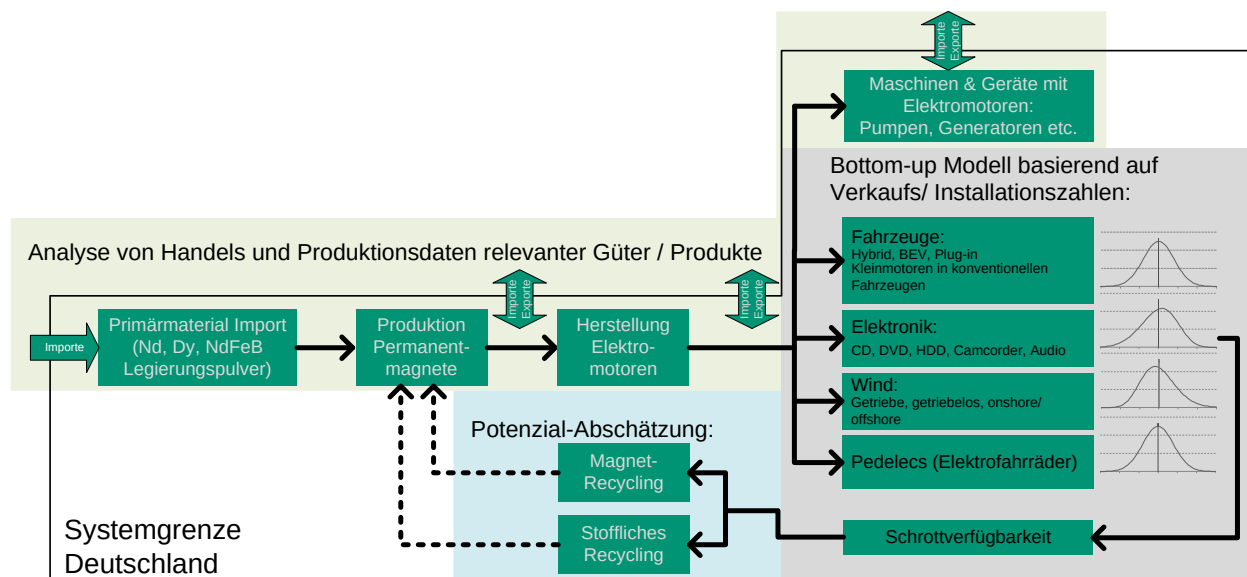


Abb. 9: Struktur des in diesem Beitrag betrachteten Bottom-up-Modells für NdFeB-Magnete.

Zur Analyse des Recyclingpotenzials von NdFeB-Magneten, bzw. Neodym und Dysprosium in Deutschland wurde in diesem Beitrag daher ein Bottom-up-Ansatz auf Basis von deutschen Verkaufszahlen, Zulassungszahlen etc. umgesetzt.

Dabei wurden, wie in Abb. 9 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 E-Bikes und 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 Abb. 16) 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 Neu- und 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 der Motoren seit der Jahrtausendwende kontinuierlich zugenommen hat, also davon auszugehen ist, dass in neueren Geräten auch häufiger PM-Synchronmotoren verbaut werden [28].

4.2 Verwendungsbereiche von NdFeB-Magneten

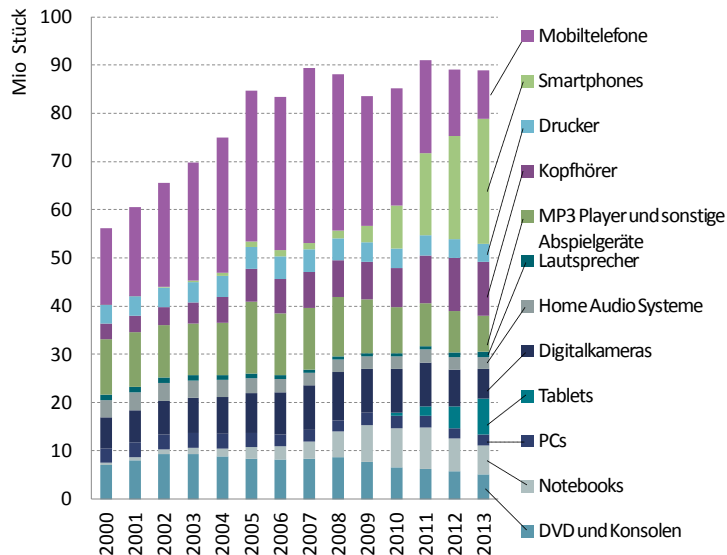
Die verschiedenen im vorliegenden Stoffstrommodell betrachteten Anwendungsbereiche von NdFeB-Magneten sowie die relevanten in Deutschland umgesetzten Produktmengen werden im Folgenden näher betrachtet.

4.2.1 Elektronikprodukte

Auf Grund der breiten Verwendung von NdFeB-Magneten in Elektronikprodukten (HDD Festplatten, CD- und DVD-Player etc.) in jüngerer Vergangenheit (vergl. Abb. 4) ist das aktuelle Schrottaufkommen von diesen Anwendungen geprägt [29]. Zu Konsumelektronik existieren fundierte Verkaufszahlen der vergangenen Jahre, wodurch sich in diesem Bereich über den Bottom-up-Ansatz relativ gute Schätzungen zu den verwendeten Magnetmengen durchführen lassen. 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 könnten³. Die Verkaufszahlen von Elektronikprodukten in Deutschland, die teilweise, oder hauptsächlich NdFeB-Magnete enthalten sind in Abb. 10a zusammengefasst.

a: Verkaufszahlen Kleinelektronik



b: Enthaltene Materialmengen

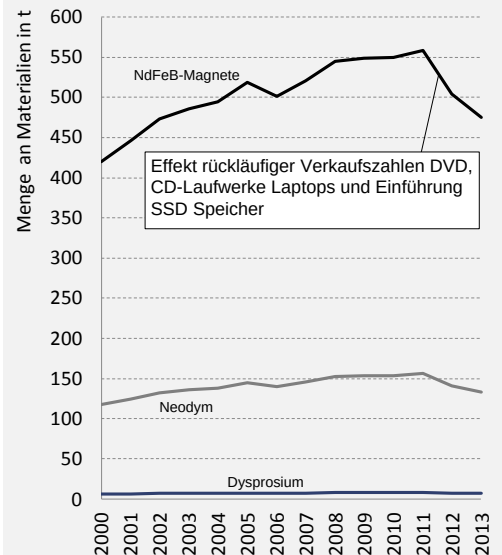


Abb. 10: Deutsche Verkaufszahlen ausgewählter Elektronikprodukte und deren aggregierte Gehalte an NdFeB-Magneten. a: Verkaufszahlen Konsumelektronik in Deutschland. Daten basieren auf Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien (Bitkom) und Consumer Electronics Market Index (Cemix). b: Enthaltene Magnet- und Seltenerd-Ströme basierend auf den Annahmen in Tabelle 2.

Tabelle 2 zeigt die für die Bottom-up Analyse zu Grunde gelegten Materialgehalte. Insgesamt ergeben sich auf Basis dieser Datengrundlage die in Abb. 10b dargestellten Materialströme innerhalb der betrachteten Elektronikprodukte, woraus sich über die Simulation der Produktlebenszyklen ein theoretisch maximales Recyclingpotenzial errechnen lässt (siehe hierzu Abschnitt 4.3).

Tabelle 2: Literaturbasierte Annahmen zu Materialgehalten (NdFeB-Magnete) in Elektronikanwendungen.

Produkt	Materialgehalt g Magnetmasse	Anteil NdFeB-haltiger Komponenten in %	Quelle
Desktop PC (HDD, CD, Lautsprecher)	15-20	100	[30; 29; 31; 8; 32]
Laptop / Notebook (HDD, CD, Lautsp.)	10-15	90	[30; 29; 31; 8; 32]
CD/DVD Player	10	100	[30; 31; 29]
Spiel-Konsolen	10	100	[30; 31; 29]
Kopfhörer	1-5	30	[32; 33]
Soundssysteme (Lautsprecher-Boxen)	50	10-20	[32; 33]
Kameras	5	100	[31]
Drucker	5-25	100	[31]
Mobiltelefone	2	100	[8; 31]
Smartphones	2	100	[8; 31]
Tablets	2	100	[8; 31]
MP3-Player	2	100	[8; 31]

³ z.B. durch die Einführung einer Wertstofftonne für Elektroschrott, eines Pfandsystems für Elektronikware etc.

Der Dysprosiumanteil in den Kleinmotoren von Elektronikanwendungen ist gering und reicht von 0-2 % [31] (vergl. auch Abb. 3). Im Modell wird pauschal mit 1 % Dy-Anteil gerechnet. Aufgrund der Variation in den Stichproben und der unterschiedlichen Bemessungsgrundlagen (Gewicht der Magnete, Menge des rückgewinnbaren Neodyms etc.) 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 [29]. Dies spielt für heutige Recyclingmengen allerdings noch keine Rolle.

4.2.2 NdFeB-Permanentmagnete in Automobilen (Pkw)

Neben den Traktionsmotoren für Hybrid- und batterieelektrische Fahrzeuge enthalten auch konventionelle Pkws nicht zu vernachlässigende Mengen an Magneten in kleinen Elektromotoren, die für die allgemeine Funktionalität, die Sicherheit und den Komfort in heutigen Pkw unumgänglich sind.

Dabei kann für Hybrid- und Elektrofahrzeuge von 1-3 kg Magnetmasse pro Traktionsmotor ausgegangen werden [31; 9; 36]. Auf Basis der Literaturangaben wurden Schätzungen für die Magnetgröße nach Motorleistung durchgeführt.

Natürlich ist die verbrauchte Magnetmenge pro Motor von weiteren Einflussfaktoren wie z.B. die Anordnung der Magnete im Rotor abhängig, dennoch kann, wie Abb. 11a klar zeigt, von der grundlegenden Annahme ausgegangen werden, dass leistungstärkere Motoren auch größere Magnetmengen benötigen wobei von einem abnehmenden Trend auszugehen ist.

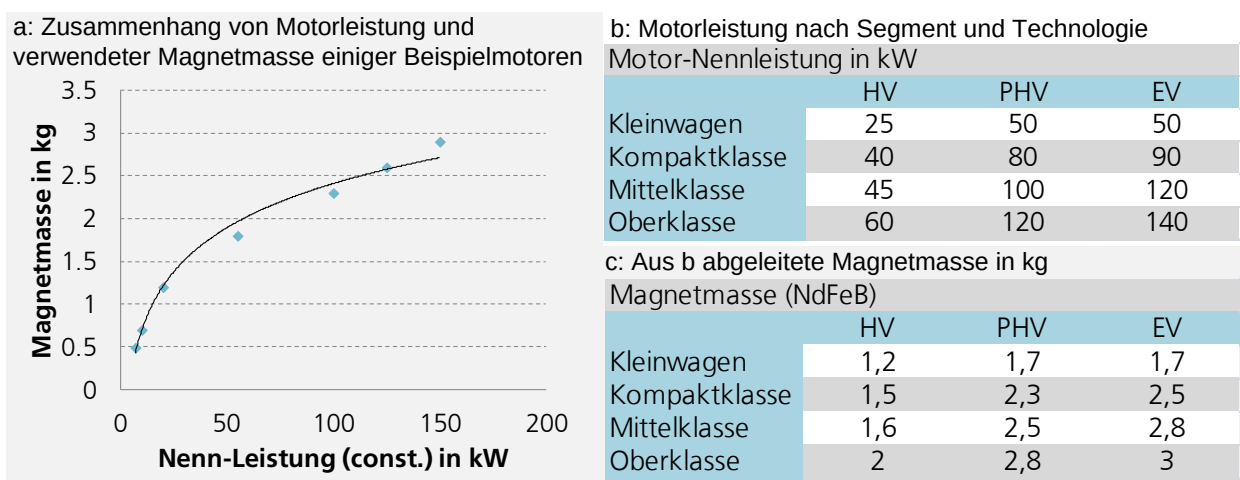


Abb. 11: Zusammenhang zwischen Motorleistung und Magnetgröße sowie Magnetgrößen nach Fahrzeugsegment und Antriebstechnologie. a: Zusammenhang Magnetmasse und Motorleistung [34]. b: Motorleistung nach Antriebstechnologie und Fahrzeugsegment [35]. c: Aus a und b abgeleitete Magnetmasse nach Fahrzeugsegment.

Zwar könnten im Bereich der Elektromobilität auch alternative Motorkonzepte wie Asynchron-Induktionsmotoren, oder Reluktanzmotoren eingesetzt werden (vergl. auch Abb. 16). Diese Motorkonzepte weisen allerdings hinsichtlich Leistungsdichte, Volumeneffizienz und Wirkungsgrad entscheidende Nachteile auf, weshalb derzeit im Bereich alternativer Antriebe nahezu ausschließlich auf PM-Synchronmotoren gesetzt wird [37]. Insgesamt hat die Verwendung von Permanentmagneten gegenüber elektromagnetischer Erregung mehrere Vorteile, die nachfolgend zusammengefasst werden [37–39]:

- 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 (z.B. weniger Verschleißteil wie Schleifringe)

Eine Quantifizierung der Mengen an NdFeB-Magneten in konventionellen Pkw ist aufgrund der zahlreichen Elektrokleinmotoren und der unterschiedlichen Technologien (Ferritmagnete, reine Induktionsmotoren etc.) nicht eindeutig möglich, dennoch ist davon auszugehen, dass nahezu jeder moderne Pkw kleinere Synchron-Elektromotoren mit NdFeB-Magneten enthält. 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 [40]. 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 polymergebunden) 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. [40].

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 zurückgreifen⁴. 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 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 [41], während in absehbarer Zukunft definitiv mit einem erheblichen Anstieg an NdFeB-Magneten in den Schredderfraktionen von Altautos (speziell in der Eisenfraktion) zu rechnen ist [42; 43].

Tabelle 3: Annahmen zu Gehalten von NdFeB-Magneten in konventionellen Pkw aus der Literatur.

Methode der Datenerhebung	Masse NdFeB-Magnete pro Pkw	Quelle
Expertenschätzung	150-300g	[12]
Zerlegung eines Mittelklassewagens	150g	[42; 43]
Analyse von Altauto-Schredderfraktionen	10g	[41]
Analyse der Kleinmotoren bei Automobilzulieferern	1 kg	[44]
Analyse einzelner Bauteile (Kleinmotoren)	150g	[45]

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 in konventionellen Pkw kaum zu bestimmen sind, scheint dies ein realitätsnaher Ansatz für die Simulation des Schrottaufkommens zu sein. Dabei zeigt sich die Problematik der niedrigen Transparenz hinsichtlich 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 wird⁵. Angesichts der Tatsache, dass ein Großteil der Kunden der in Tabelle 1 gelisteten Hersteller aus der Automobilindustrie kommen, muss von einem vermehrten Einsatz von PM-Synchronmotoren in konventionellen Pkw ausgegangen werden [25]. Dies wird durch Analysen aktueller Pkw-Modelle und Zulieferer-Angaben bestätigt (siehe Tabelle 3).

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

⁵ Diese Aussage basiert ebenfalls auf persönlicher Korrespondenz mit Vertretern der Automobilindustrie.

Die deutschen Zulassungszahlen der Pkw mit alternativem Antrieb sowie der Pkw insgesamt, auf deren Basis die Bottom-up Modellierung der Materialströme erfolgt, sind in Abb. 12 zusammengefasst.

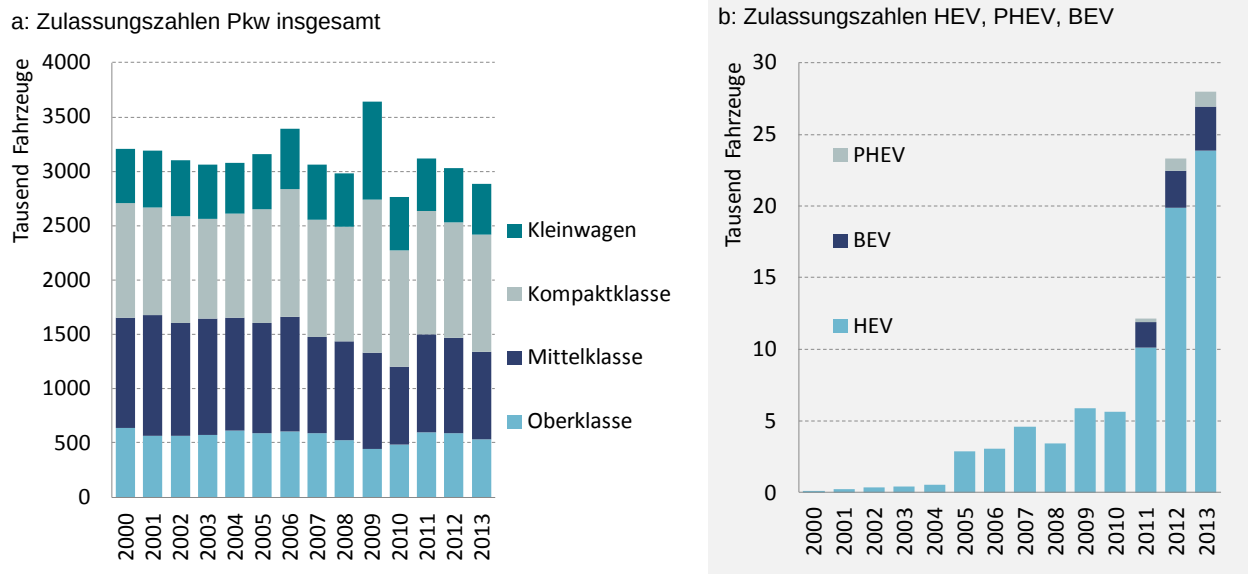


Abb. 12: Pkw Zulassungszahlen in Deutschland (Daten basieren auf dem Verband der deutschen Automobilindustrie [46] sowie auf dem Kraftfahrt-Bundesamt). Abkürzungen: HEV Hybrid Electric Vehicle, PHEV Plug-in Hybrid Electric Vehicle, BEV Battery Electric Vehicle.

4.2.3 NdFeB-Permanentmagnete in Windkraftanlagen in Deutschland

Während sich Windkraftanlagen (WKA) standardmäßig aus drei Teilen zusammensetzen (Rotor, Getriebe und Generator), werden seit einigen Jahren auch getriebelose Direktantriebe verwendet [47]. Bei diesen wesentlich leistungsstärkeren Anlagen laufen Rotor und Generator direkt auf einer Welle – das Getriebe entfällt. Die drei grundlegenden Konzepte heutiger Windkraftanlagen sind in Abb. 13 dargestellt.

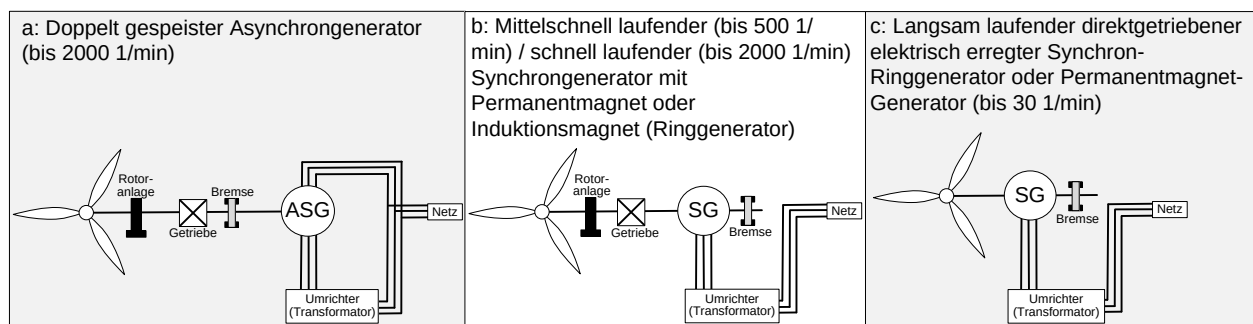


Abb. 13: Die drei grundlegenden Konzepte für Windkraftanlagen [48]. ASG: Asynchrongenerator, SG: Synchron-generator.

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"). 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 [47].

Chinesische Hersteller dagegen verbauen weit mehr PM-Anlagen auch im Onshore-Bereich, was auf die bessere Verfügbarkeit der NdFeB-Magnete zurückzuführen ist. Jüngste Analysen des globalen Marktes für Permanentmagnete im Windenergiesektor bestätigen die Tendenz einer verstärkten Verwendung von PM-Generatoren durch führende chinesische WKA-Hersteller [14]. Bei Synchronmaschinen mit PM-Direktantrieb (Abb. 13c) werden ca. 650 kg Magnetmasse pro MW Leistung verwendet [48]. Da diese Anlagen (insbesondere die Offshore-Analgen) häufig mehr als 5 MW Leistungskapazität besitzen, werden hier regelmäßig über 3 t Magnetmasse pro Anlage verbaut [10]. Ein weiteres Antriebskonzept mit Permanentmagnet und Getriebe, was eine kleinere Gestaltung des Generators zulässt, ist in Abb. 13b dargestellt. Dieses Konzept benötigt wegen des kleineren Generators nur ca. 100 kg/MW an Magnetmasse [48].

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 Abb. 14).

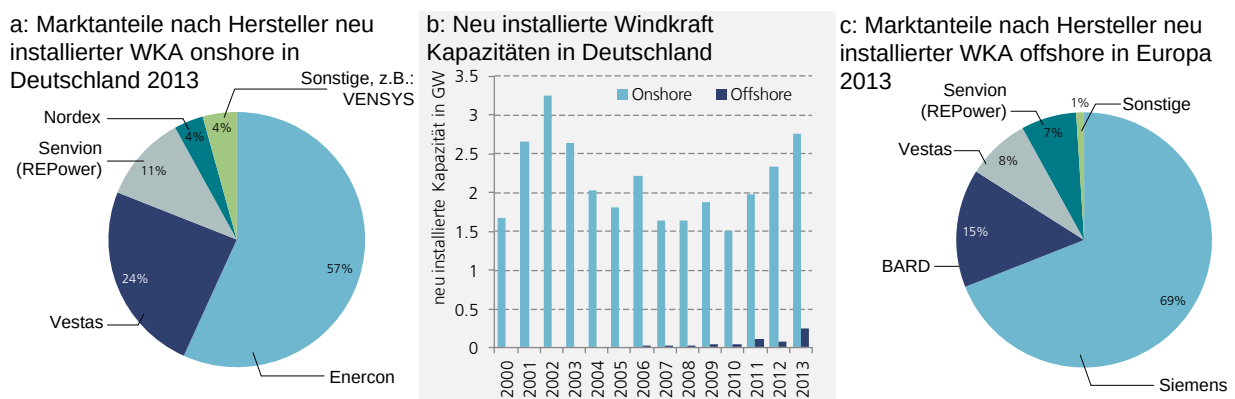


Abb. 14: Hersteller von Windkraftanlagen nach deutschen Marktanteilen sowie installierte jährliche Neuleistungen. a: Marktanteile der Hersteller im Onshore-Bereich [49] b: Jährliche neu installierte Leistung in Deutschland nach dem Bundesverband Windenergie (BWE) c: Marktanteile der Hersteller im Offshore-Bereich [49].

Zur Abschätzung des Anteils von WKA mit Permanentmagneten (langsam laufender Direktantrieb, oder Schnellläufer mit Getriebe) wurde eine Herstelleranalyse durchgeführt (vergl. hierzu Tabelle 4). Im Jahr 2012 setzte sich der Markt der neu installierten Leistung in Deutschland entsprechend Abb. 14a zusammen. Der Offshore-Anteil aller WKA betrug in Deutschland Ende 2012 nur 1 % (vergl. Abb. 14b). Generell ist der Direktantrieb mit NdFeB-Magneten aufgrund der geringen Wartungsintensität vor allem für Offshore-WKA relevant [47].

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.

Tabelle 4: Windkraftanlagen, die in Deutschland in den vergangenen Jahren installiert wurden. Die Angaben wurden den Produktblättern der jeweiligen Hersteller entnommen. PM steht für Permanentmagnet und G gibt an, ob ein Getriebe vorhanden ist, oder ob es sich um einen Direktantrieb handelt.

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	onshore
N117 (3,0 MW)	-	G	onshore	SWT-2.3-93	-	G	onshore
N100 (3,3 MW)	-	G	onshore	SWT-2.3-101	-	G	onshore
N117 (2,4 MW)	-	G	onshore	SWT-2.3-108	-	G	onshore
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	onshore-/offshore
E-101 (3 MW)	-	-	onshore	SWT-3.6-120	-	G	onshore-/offshore
E-115 (3 MW)	-	-	onshore	SWT-4.0-120	-	G	onshore-/offshore
E126-EP4 (4 MW)	-	-	onshore	SWT-4.0-130	-	G	onshore-/offshore
E-126 (7.5 MW)	-	-	onshore	SWT-6.0-154 (6 MW)	PM	-	offshore

Der zweitgrößte Anbieter in Deutschland, Vestas (Weltmarktführer), verwendet Permanentmagnete in drei seiner über zehn angebotenen Turbinen, wovon eine ausschließlich im Offshore-Bereich eingesetzt wird (vergl. Tabelle 4). 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 in Deutschland einen Marktanteil von ca. 1,5 % hat, setzt auf getriebelose PM-Direktantriebe im Onshore-Bereich [49]. In erster Linie werden diese Anlagen allerdings vom größten chinesischen Hersteller "Glodwind Ltd." in China produziert, der 2008 die

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

Mehrheitsanteile der VENSYS Energy AG übernommen hat, und hauptsächlich innerhalb Chinas installiert [14].

Der Marktführer im Offshore-Bereich, Siemens Windpower, setzt vor allem bei größeren Turbinen auf Direktantriebe mit Permanentmagneten⁷. Auch hat der Weltmarktführer für WKA (onshore und offshore), Vestas, die derzeit größte Offshore-Turbine mit 8MW Leistung und PM-Generator auf den Markt gebracht⁸. Zwar wird der offshore Windenergie starkes Wachstum in absehbarer Zukunft zugesprochen [50], insgesamt spielt der Offshore-Bereich derzeit aber nach wie vor eine untergeordnete Rolle (vergl. Abb. 14). Der genaue Anteil der Anlagen, die mit Neodym-Magneten arbeitet, lässt sich auf Basis der verfügbaren Daten nicht bestimmen. Weltweit kann von einem Anteil der WKA mit PM-Direktantrieb von 10-15 % ausgegangen werden (hauptsächlich geprägt durch den chinesischen Markt), zusätzlich kommen einige Schnellläufer mit Getriebe und kleineren PM-Synchrongeneratoren hinzu [14]. 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 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 dimensionierten Offshore-Anlagen basieren hauptsächlich auf der DD-Technologie (Direct Drive) mit NdFeB-Magneten von bis zu 3-4 t.

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 Offshore-Anlagen mit PM-Generator wird auf Basis der Marktanteile der einzelnen Hersteller und ihres Anteils an PM-Direktantrieben im Produktportfolio (vergl. Tabelle 4) auf aktuell ca. 50 % geschätzt. Dabei basieren die sehr großen Turbinen ab 5 MW Leistung fast immer auf einem PM-Synchrongenerator⁹, während bei kleineren Offshore-Anlagen durchaus auch schnelllaufende doppeltgespeiste Asynchron-Generatoren oder Synchron-Ringgeneratoren mit Elektromagnet im Rotor eingesetzt werden¹⁰. Daher ist davon auszugehen, dass aufgrund der Tendenz zu immer größeren Turbinen in Zukunft verstärkt auf die PM-Direktantriebe gesetzt

⁷ Hierzu wird derzeit in Cuxhaven ein neues Produktionswerk für die Endmontage aufgebaut (vergl. <http://www.siemens.com/press/de>).

⁸ vergl. Herstellerangaben zu Vestas V164-8.0MW

⁹ vergl. Siemens SWT-6.0-154, Nordex N150/6000, oder Vestas V164-8.0MW

¹⁰ So basiert z.B. der 2015 in Betrieb genommene Windpark "Baltic 2" der EnBW auf 80 Anlagen des Typs SWT-3,6-120 mit doppeltgespeistem Asynchron-Generator (vergl. www.enbw.com/media).

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 in der Vergangenheit berücksichtigt.

4.2.4 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 haben¹¹, spielen Motorroller, bzw. Motorräder mit Elektro-Antrieb in Europa bisher kaum eine Rolle.

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. Abb. 15 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.

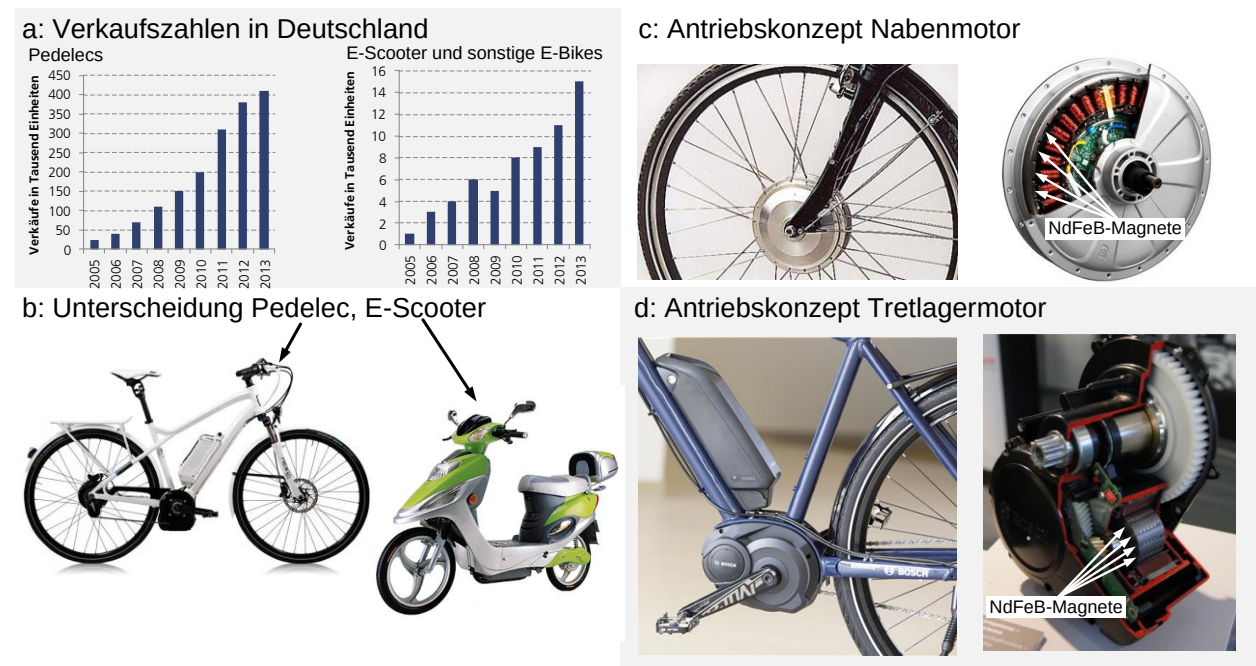


Abb. 15: Pedelec Verkäufe in Deutschland und die Abgrenzung von Pedelecs und E-Scootern. a: Pedelec Verkäufe in Deutschland (Daten basieren auf dem Zweirad Industrie-Verband e.v. ZIV). b: Unterscheidung Pedelec und E-Scooter (Bilder entnommen von Bosch E-Bike). c+d: Antriebskonzepte (vergl. z.B. Bosch E-Bike).

Technisch gesehen unterscheiden sich Pedelecs von E-Scootern auch durch die geringere Motorleistung und entsprechend niedrigere Magnetmengen in den Elektromotoren. Häufig

¹¹ Dabei wird derzeit von Verkaufszahlen im Bereich von 35 Mio. Stück pro Jahr ausgegangen [51].

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 100-300 g ausgegangen werden [34]. Im Modell wird mit einem Durchschnittswert von 200 g NdFeB-Magnet pro Pedelec gerechnet, während die größeren E-Scooter bis zu 500 g Magnetmasse enthalten können [34]. In diesen Motoren ist auch aufgrund der höheren Leistung und Betriebstemperaturen von Gehalten an Dysprosium um 5 % auszugehen (siehe Abb. 3).

4.2.5 Weitere Anwendungsbereiche von NdFeB Permanentmagneten

Wie bereits erwähnt, werden Synchron-Servomotoren mit NdFeB-Magneten in der unteren Leistungsklasse bis 10 kW in verschiedensten Bereichen, unter anderem für Haushaltselektronik, (Spül- und Waschmaschinen, Küchengeräte, Staubsauger, Werkzeuge), verschiedenste Formen elektrischer Pumpen, sowie Servomotoren im allgemeinen Maschinenbau [27; 47] eingesetzt. Da in diesen Bereichen auch Synchron- und Asynchron-Induktionsmotoren (vergl. Abb. 16) 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.

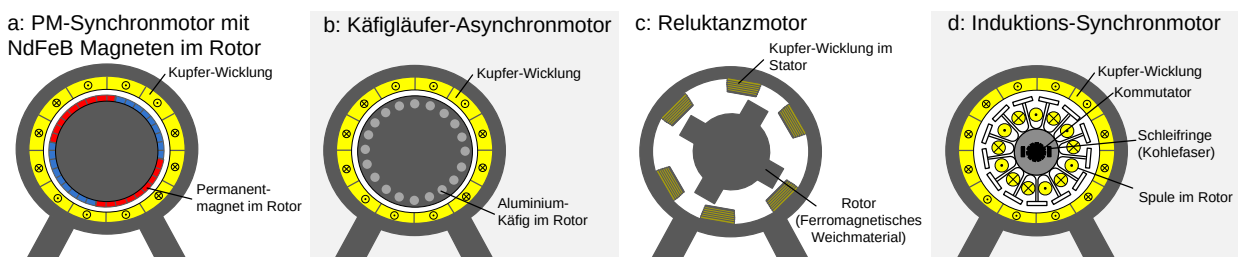


Abb. 16 Gängige Konzepte für Elektromotoren [39]. Das am weitesten verbreitete Konzept und eine ständige Alternative zu Synchron-Servomotoren mit Permanentmagnet sind die Käfigläufer-Asynchronmotoren mit einem kurzgeschlossenen Aluminium- oder Kupferkäfig im Rotor.

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

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

Elektromotoren verbaut werden. Die neue, 2015 in Kraft tretende Richtlinie der EU zur Energieeffizienz von Elektromotoren¹³ könnten den Trend hin zu PM-Synchron-Motoren im unteren Leistungsbereich 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 [27] und kommen außer für einige Schiffsmotoren [47] 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 1). Sicher ist, dass die Versorgungskrise 2010-2011, ausgelöst durch die verstärkten Exportrestriktionen seitens der chinesischen Regierung¹⁴ viele Unternehmen des Maschinenbaus getroffen hat und dadurch eine gewisse Vorsicht bei der Verwendung von Seltenerd-Magneten entstanden ist.

Während die Magnetresonanztomographie (MRT) nahezu vollständig auf elektrisch induzierten Magnetfeldern in stark gekühlten Supraleitern mit sehr geringem elektrischen Widerstand basieren, hier also erwartungsgemäß kaum NdFeB-Magnete verbaut werden [53], 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.

¹³ In Deutschland umgesetzt durch die Ökodesign-Richtlinie Elektromotoren, siehe Umweltbundesamt.

¹⁴ Vor allem der Territorialkonflikt mit Japan und die vorübergehende komplette Einstellung der Exporte nach Japan führten in westlichen Industrieländern Ende 2010 zu einer erheblichen Versorgungskrise [52].

4.3 Recyclingpotenziale

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

Tabelle 5: Annahmen zu durchschnittlichen Verwendungsdauern der verschiedenen Produktbereiche aus der Literatur [3; 31; 29; 54].

Anwendungsbereich	Verwendungsdauer in Jahren	Anwendungsbereich	Verwendungsdauer in Jahren
Elektronik (Handy, Laptop etc.)	8	Pedelecs (E-Bike)	10
Pkw (alternativ & konventionell)	12	Windkraftanlagen	20

Über das Prinzip der "Aging Chain" (vergl. Abb. 7) und den in Tabelle 5 gelisteten durchschnittlichen Verwendungsdauern, wobei aufgrund mangelnder Daten von Gaußschen Normalverteilungen ausgegangen wird, wurden die jeweiligen Produktlebenszyklen simuliert. Dabei ist insbesondere im Elektronikbereich zwischen der tatsächlichen Nutzungsdauer des Gerätes und der Zeitspanne bis zur Abgabe bzw. Verschrottung zu unterscheiden, da alte Geräte häufig über längere Zeiträume gelagert werden [54; 55]. Auf diese Weise lassen sich die Recyclingpotenziale aus den betrachteten Bereichen simulieren und relativ verlässliche Aussagen über zukünftige Materialmengen im Schrottaufkommen treffen, da das zukünftige Schrottaufkommen in erster Linie von heutigen Verbräuchen abhängt. Die Ergebnisse der gegenwärtigen und zukünftigen Materialströme von NdFeB-Magneten, bzw. Neodym und Dysprosium in obsoleten Produkten aus der Bottom-up Simulation sind in Abb. 18 zusammengefasst. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass in verschiedenen Anwendungsbereichen ein erheblicher Teil an gebrauchten Produkten exportiert wird.

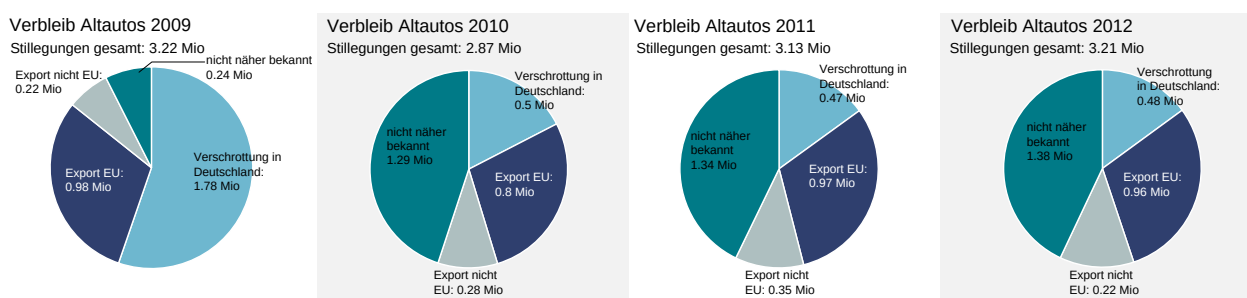


Abb. 17: Verbleib von Altautos in Deutschland [56]. Die Abweichungen 2009 entsprechen einem Einmaleffekt durch die Abwrackprämie. Ansonsten wird ein Großteil der in Deutschland stillgelegten Altautos exportiert. Da einzeln exportierte Pkw häufig nicht erfasst werden, ist auch der Verbleib der Altautos nicht immer nachvollziehbar.

Bei Altautos 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 [57]. Inwiefern sich die Exportquoten von Pkw mit alternativem Antrieb von denen konventioneller Pkw unterscheiden bleibt abzuwarten.

Insgesamt wirkt sich, wie in Abb. 17 dargestellt, der Export alter Fahrzeuge aber massiv auf das Recyclingpotenzial in Deutschland aus.

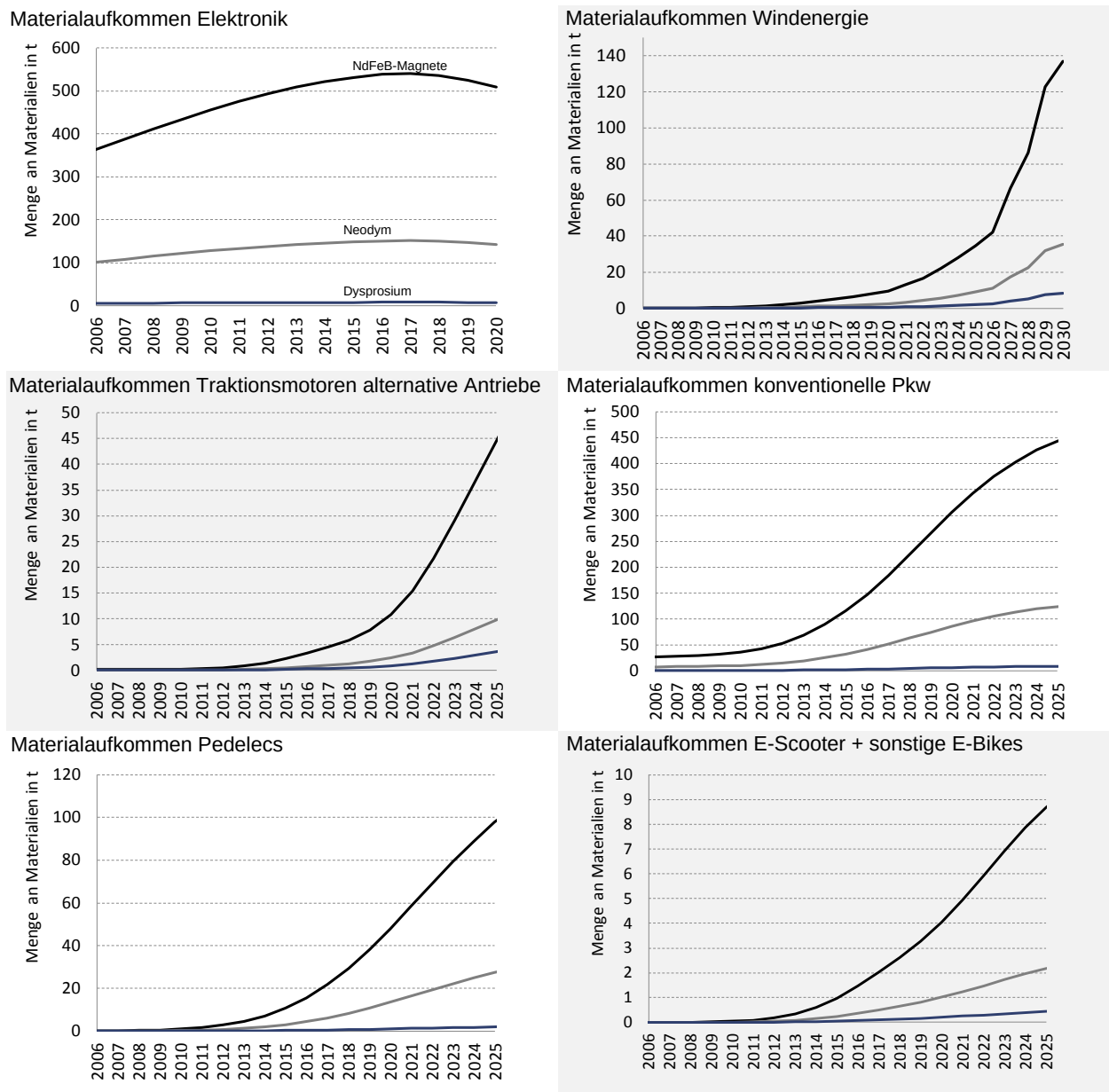


Abb. 18: Recyclingpotenzial von NdFeB-Magneten aus der Bottom-up Simulation. Beimischungen an Praseodym werden hier ebenfalls zum Neodymanteil gezählt.

Die Wirtschaftlichkeit des Recyclings der Magnete aus Traktionsmotoren von Hybrid- und Elektrofahrzeugen wird neben der Größe der Magnete (1-3 kg) durch den hohen Anteil an hochpreisigem Dysprosium zusätzlich gestärkt [58]. Wie in Abb. 3 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, in absehbarer Zukunft rezykliert

werden [26; 58]. Bereits heute werden größere NdFeB-Magnete aus Elektromotoren von einigen Schrotthändlern zwischengelagert, in der Voraussicht, diese in Zukunft gewinnbringend veräußern zu können [26].

Das Problem der erheblichen Mengen an exportiertem oder falsch entsorgtem Elektronikschrott wird in der Literatur regelmäßig diskutiert [59]. 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 Elektronikschrotten ohnehin sehr aufwendig gestaltet [33] 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.) 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.

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 Abb. 18 dargestellt, erst nach 2025 größere Mengen an potenziellem Recyclingmaterial erwarten 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) weit verbreiteten E-Scooter in Europa nach wie vor eine sehr untergeordnete Rolle spielen und daher in absehbarer Zukunft auch keine große

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

Quelle für Recyclingmaterial darstellen werden (vergl. Abb. 18), ist die Zahl der Pedelecs in Deutschland in den vergangenen Jahren stark angestiegen. Da die Motoren einfach zugänglich sind (vergl. Abb. 15c+d) erscheint das Recycling hier recht vielversprechend.

5 Diskussion

Wie in diesem Beitrag anhand der Magnetwerkstoffe Neodym und Dysprosium gezeigt werden konnte, ist der System Dynamics Ansatz sehr gut zur Modellierung von Rohstoffsystemen geeignet. Dies liegt insbesondere daran, dass durch die Beziehungen zwischen Bestands- und Flussvariablen detaillierte Modelle physischer Stoffströme und Produktlebenszyklen modelliert werden können.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass angesichts der Produktionszahlen von NdFeB-Magneten in Deutschland in Höhe von ca. 2000 t/a (vergl. Tabelle 1), 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. 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 [46], 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. Ähnliches gilt für alte Windkraftanlagen und verschiedene Altanlagen im industriellen Bereich.

6 Literaturverzeichnis

- [1] European Commission: Report on Critical raw materials for the EU. Brüssel: Europäische Kommission 2014.
- [2] Glöser, S. und Faulstich, M.: Analyse kritischer Rohstoffe durch Methoden der Multivariaten Statistik. In: Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen (2014). S. 53–79. Stuttgart: Fraunhofer Verl 2014.
- [3] Du, X. und Graedel, T. E.: Global Rare Earth In-Use Stocks in NdFeB Permanent Magnets, Journal of Industrial Ecology 15 (2011) H. 6. S. 836–843.
- [4] U.S. Geological Survey: Rare Earth Elements—End Use and Recyclability: Scientific Investigations Report 2011–5094 2011.
- [5] Du, X. und Graedel, T. E.: Uncovering the global life cycles of the rare earth elements, Scientific reports 1 (2011). S. 145.
- [6] Schüler, D.; Buchert, M.; Liu, R. und Dittrich, S.: Merz, C.: Study on Rare Earths and Their Recycling: Final Report for The Greens/EFA Group in the European Parliament: Öko-Institut e.V. Freiburg 2011.
- [7] Rochlin, L. L.: Magnesium alloys containing rare earth metals: Structure and properties. London: Taylor & Francis 2003.
- [8] Zepf, V.: Rare earth elements: A new approach to the nexus of supply, demand and use - as exemplified by the use of neodymium in permanent magnets. Berlin, London: Springer 2013.
- [9] Gutfleisch, O.: Permanent Magnets: Magnetic Materials for Energy 2013.
- [10] Hoenderdaal, A.: Can dysprosium hamper the global growth of electric cars and direct-drive wind turbines until 2050? (2011).
- [11] Constantinides, S.: Magnet FAQs. Rochester, USA: Arnold Magnetic Technologies Inc. 2013.
- [12] Roskill: Rare Earths & Yttrium: Market Outlook to 2015: A quick introductory guide to rare earths. London, UK: Roskill Information Services Ltd. 2011.
- [13] Constantinides, S.: The Demand for Rare Earth Materials in Permanent Magnets 2012.
- [14] Glöser-Chahoud, S. und Tercero-Espinoza, L.: Globale Verwendungsstrukturen der Magnetwerkstoffe Neodym und Dysprosium unter besonderer Berücksichtigung der Auswirkung der Diffusion alternativer Antriebe auf den Magnetbedarf. Karlsruhe 2016.

- [15] Bossel, H.: Simulation dynamischer Systeme: Grundwissen, Methoden Programme. Braunschweig: Vieweg 1989.
- [16] Sterman, J.: Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world. Boston: Irwin/McGraw-Hill 2000.
- [17] Glöser, S.; Soulier, M.; Tercero Espinoza, L. A. und Faulstich, M.: Using Dynamic Stock and Flow Models for Global and Regional Material and Substance Flow Analysis. In: Proceedings of the 31st International Conference of the System Dynamics Society.
- [18] Glöser, S.; Soulier, M. und Tercero Espinoza, L. A.: Dynamic analysis of global copper flows. Global stocks, postconsumer material flows, recycling indicators & uncertainty evaluation, Environmental Science & Technology 47 (2013) H. 12. S. 6564–6572.
- [19] Reuter, M. und van Schaik, A.: Opportunities and limits of recycling: A dynamic-model-based analysis, MRS Bulletin 37 (2012) H. 04. S. 339–347.
- [20] Glöser, S.; Soulier, M.; Tercero Espinoza, L.; Faulstich, M. und Goldmann, D.: Dynamische Stoffstrommodellierung von Industriemetallen am Beispiel eines globalen und Europäischen Kupfermodells. In: Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen (2014). S. 252–263. Stuttgart: Fraunhofer Verl 2014.
- [21] Müller, E.; Hilty, L. M.; Widmer, R.; Schluep, M. und Faulstich, M.: Modeling Metal Stocks and Flows: A Review of Dynamic Material Flow Analysis Methods, Environmental Science & Technology (2014). S. 140204134136005.
- [22] Kahle, W. und Liebscher, E.: Zuverlässigkeitsanalyse und Qualitätssicherung. München: Oldenbourg 2013.
- [23] Pauliuk, S.; Wang, T. und Müller, D. B.: Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries, Resources, Conservation and Recycling 71 (2013). S. 22–30.
- [24] Bergbäck, B.; Johansson, K. und Mohlander, U.: Urban Metal Flows – A Case Study of Stockholm. Review and Conclusions, Water, Air, and Soil Pollution: Focus 1 (2001) 3-4. S. 3–24.
- [25] Erdmann, L.; Behrendt, S. und Feil, M.: Kritische Rohstoffe für Deutschland: Identifikation aus Sicht deutscher Unternehmen wirtschaftlich bedeutsamer mineralischer Rohstoffe, deren Versorgungslage sich mittel- bis langfristig als kritisch erweisen könnte. Berlin 2011.
- [26] Bast, U.; Treffer, F.; Thürigen, C.; Elwert, T. und Marscheider-Weidemann, F.: Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtrieben 2015.
- [27] Buchert, Matthias, Manhart, Andreas, Sutter, Jürgen: Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg 2013.

- [28] Seo, Y. und Morimoto, S.: Comparison of dysprosium security strategies in Japan for 2010–2030, *Resources Policy* 39 (2014). S. 15–20.
- [29] Sprecher, B.; Kleijn, R. und Kramer, G. J.: Recycling potential of neodymium: the case of computer hard disk drives, *Environmental Science & Technology* 48 (2014) H. 16. S. 9506–9513.
- [30] Böni, H.; Wäger, P. und Figi, R.: Rückgewinnung von kritischen Metallen wie Indium und Neodym aus Elektronikschrott auf der Stufe der manuellen und mechanischen Vorbehandlung. In: *Recycling und Rohstoffe*, Band 8 (2015). S. 443–462. Neuruppin: TK 2015.
- [31] Habib, K.; Schibye, P. K.; Vestbø, A. P.; Dall, O. und Wenzel, H.: Material Flow Analysis of NdFeB Magnets for Denmark: A Comprehensive Waste Flow Sampling and Analysis Approach, *Environmental Science & Technology* 48 (2014) H. 20. S. 12229–12237.
- [32] Westphal, L. und Kuchta, K.: Permanentmagnete in Elektrogeräten: Möglichkeiten und Grenzen bei der Erfassung und dem Recycling. Hamburg 2012.
- [33] Westphal, L.; Kuchta K. und Hobohm J.: Permanentmagnete in der Feinkornaufbereitung von Elektro- und Elektronikgeräten. In: *Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen* (2014). S. 243–250. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag 2014.
- [34] Hofmann, H.; Kaufmann, R.; Tschop, O.; Widmer, R.; Gauch, M. und Haefeli, Ueli, Schwegler, Urs: E-Scooter: Sozial- und naturwissenschaftliche Beiträge zur Förderung leichter Elektrofahrzeuge in der Schweiz : Schlussbericht 2013. Bern: Universität Bern, IKAÖ 2013.
- [35] ADAC Fahrzeugtechnik: Elektroautos: Marktübersicht/Kenndaten. München 2013.
- [36] Angerer, G.; Erdmann, L.; Marscheider-Weideman, F.; Scharp, M.; Lüllmann, A.; Handke, V. und Marwede, M.: Rohstoffe für Zukunftstechnologien: Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verl 2009.
- [37] Gutfleisch, O.; Willard, M. A.; Brück, E.; Chen, C. H.; Sankar, S. G. und Liu, J. P.: Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient, *Advanced Materials* 23 (2011) H. 7. S. 821–842.
- [38] Gieras, J.: Permanent magnet motor technology: Design and applications. 3. Auflage. Boca Raton: CRC Press 2010.
- [39] Bradshaw, A. M.; Reuter, B. und Hamacher, T.: The Potential Scarcity of Rare Elements for the Energiewende, *Green* 3 (2013) H. 2.

- [40] Wilde, A.: NdFeB Magnets in the Context of Automotive Applications. Stuttgart 2008.
- [41] Widmer, R.; Du, X.; Haag, O.; Restrepo, E. und Wäger, P. A.: Scarce metals in conventional passenger vehicles and end-of-life vehicle shredder output, *Environmental Science & Technology* 49 (2015) H. 7. S. 4591–4599.
- [42] Kohlmeyer, R.; Groke, M.; Sander, K. und Bergamos, M.: Perspektiven der Zunehmenden Fahrzeugelektronik für das Altfahrzeugrecycling. In: *Recycling und Rohstoffe*, Band 8 (2015). S. 183–205. Neuruppin: TK 2015.
- [43] Kohlmeyer, R.; Groke, M.; Sander, K. und Bergamos, M.: Rückgewinnung kritischer Metalle: Die Demontage von Elektro- und Elektronikkomponenten aus Altfahrzeugen für die stoffliche Verwertung kann einen wichtigen Beitrag zur Ressourceneffizienz leisten. *ReSource* (2015) H. 2. S. 27–37.
- [44] Alonso, E.; Sherman, A. M.; Wallington, T. J.; Everson, M. P.; Field, F. R.; Roth, R. und Kirchain, R. E.: Evaluating rare earth element availability: a case with revolutionary demand from clean technologies, *Environmental Science & Technology* 46 (2012) H. 6. S. 3406–3414.
- [45] Cullbrand, K. und Olof, M.: The Use of Potentially Critical Materials in Passenger Cars. Chalmers University of Technology, Schweden.
- [46] VDA: Tatsachen und Zahlen. Frankfurt am Main 2000-2013.
- [47] Kaufhold, M. und Jöckel, A.: Permanenterregte Großmaschinen: Potenziale in der Oberklasse, *ETZ Antriebstechnik* (2002) H. 20. S. 2–7.
- [48] Buchert, M.: Rare Earths - a Bottleneck for future Wind Turbine Technologies? Berlin 2011.
- [49] Wallasch, A.-K.; Ekkert, M. und Rehfeldt, K.: Status des Windenergieausbaus in Deutschland: Zusätzliche Auswertungen und Daten für das Jahr 2012. Deutsch Wind Guard GmbH, Varel.
- [50] IEA: Technology Roadmap: Wind Energy. International Energy Agency, Paris 2013.
- [51] INSG: The Global E-bike Market: breifing paper. International Nickel Study Group, Lissabon 2014.
- [52] Campbell, G. A.: Rare earth metals: a strategic concern, *Mineral Economics* 27 (2014) H. 1. S. 21–31.
- [53] Kramme, R.: Medizintechnik: Verfahren - Systeme - Informationsverarbeitung. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.

- [54] Gantner, O.; Grimm, J. und Hutner, Petra, Lubberger, Ariane: Wissenschaftliche Begleitung der Althandy-Sammelaktion "Handy clever entsorgen". Universität Augsburg 2013.
- [55] Hagelüken, C.: Lagerstätten auf Rädern: Intelligente Recyclingkonzepte könnten wesentlich zur Versorgungssicherheit bei Technologiemetallen beitragen, ReSource (2010) H. 3. S. 30–33.
- [56] UBA: Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2012. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Dessau 2012.
- [57] Sander, K. und Schilling, S.: Transboundary shipment of waste electrical and electronic equipment / electronic scrap –Optimization of material flows and control. Umwelt Bundesamt, Berlin 2010.
- [58] Elwert, T. und Goldmann, D.: Entwicklung eines hydrometallurgischen Recyclingverfahrens für NdFeB-Magnete. In: Recycling und Rohstoffe, Band 7 (2014). S. 147–159. Nietwerder: TK-Vlg 2014.
- [59] Hagelüken, C.: Aufbereitung und Verarbeitung von Seltenerdmetallen. In: Strategische Rohstoffe - Risikovorsorge (2014). S. 161–172. Berlin: Springer Spektrum 2014.

Dynamische Materialfluss-Analyse der Magnetwerkstoffe Neodym und Dysprosium in Deutschland

Simon Glöser-Chahoud

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)
Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Mail: simon.gloeser@isi.fraunhofer.de

Martin Faulstich

CUTEC Institut an der TU Clausthal
Leibnizstraße 21+23, 38678 Clausthal-Zellerfeld
Lehrstuhl für Umwelt- und Energietechnik TU Clausthal

Luis Tercero-Espinoza

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)
Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Mail: luis.tercero@isi.fraunhofer.de

Einleitung

- Trotz der seit einigen Jahren geführten Debatte um die Versorgungssicherheit mit Seltenen Erden (SE) besteht nach wie vor wenig Transparenz in den Verwendungsstrukturen einzelner Seltenerdelemente, da meist nur von der Stoffgruppe der Seltenen Erden als Ganzes (17 verschiedene Elemente) die Rede ist.
- Im folgenden Beitrag werden die Magnetrohstoffe Neodym und Dysprosium für die Herstellung der derzeit stärksten Permanentmagnete, den NdFeB-Magneten, näher betrachtet (siehe Abbildung 1).
- Eine wichtige Rolle bei der Reduzierung von Rohstoffabhängigkeiten spielt die Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen aus obsoleten Produkten durch Recycling.
- Zur Erhöhung der Transparenz der Verwendungsstrukturen von NdFeB-Magneten und den enthaltenen Seltenerdelementen (vergl. Abbildung 2) sowie zur Abschätzung des potenziellen Beitrags von Sekundärrohstoffen zum Gesamtrohstoffbedarf werden in diesem Beitrag die Verwendungszyklen der zentralen Anwendungsbereiche von NdFeB-Magneten mit Hilfe von dynamischen Materialflussmodellen (siehe Abbildung 3 und 4) simuliert.

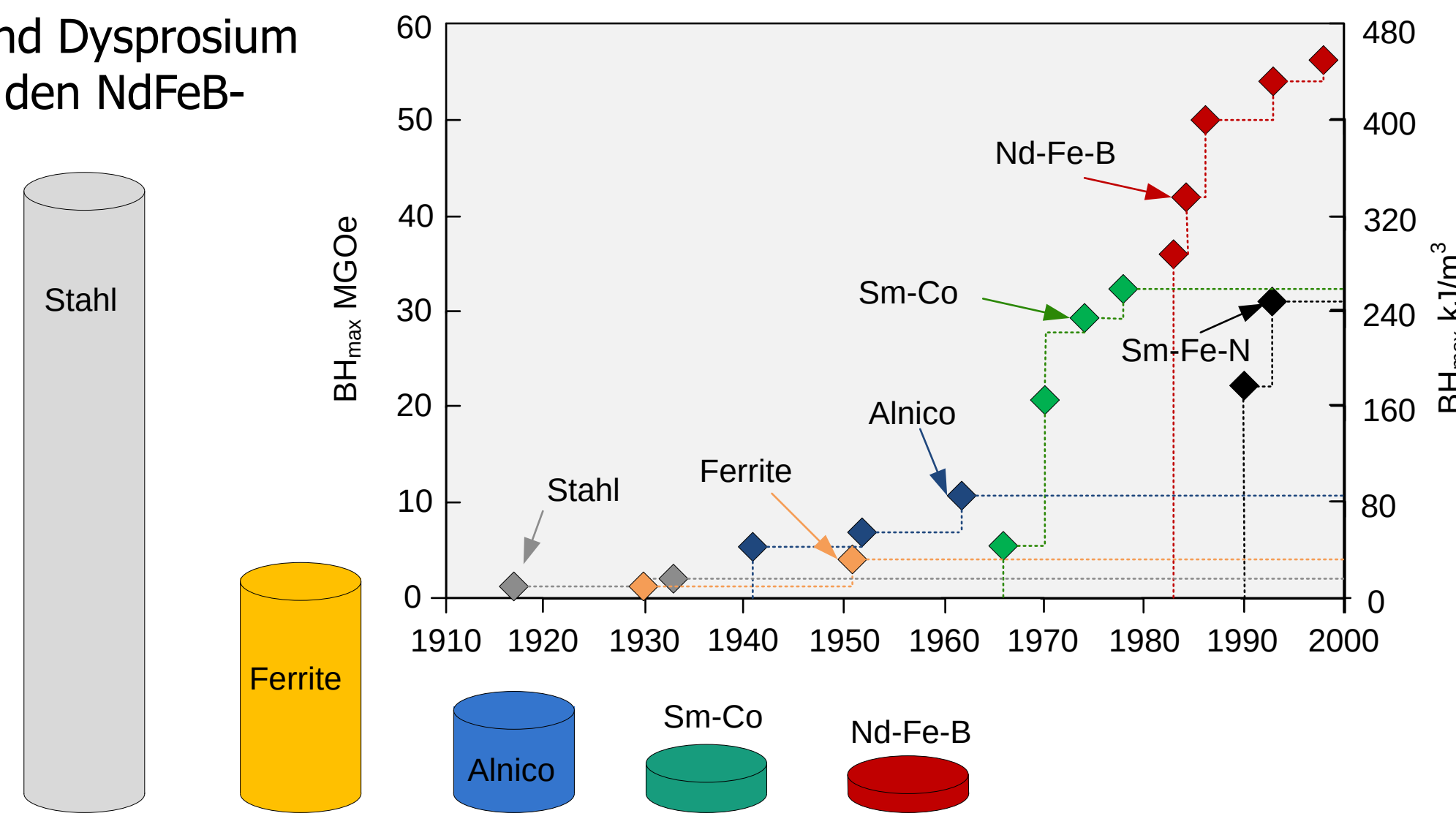
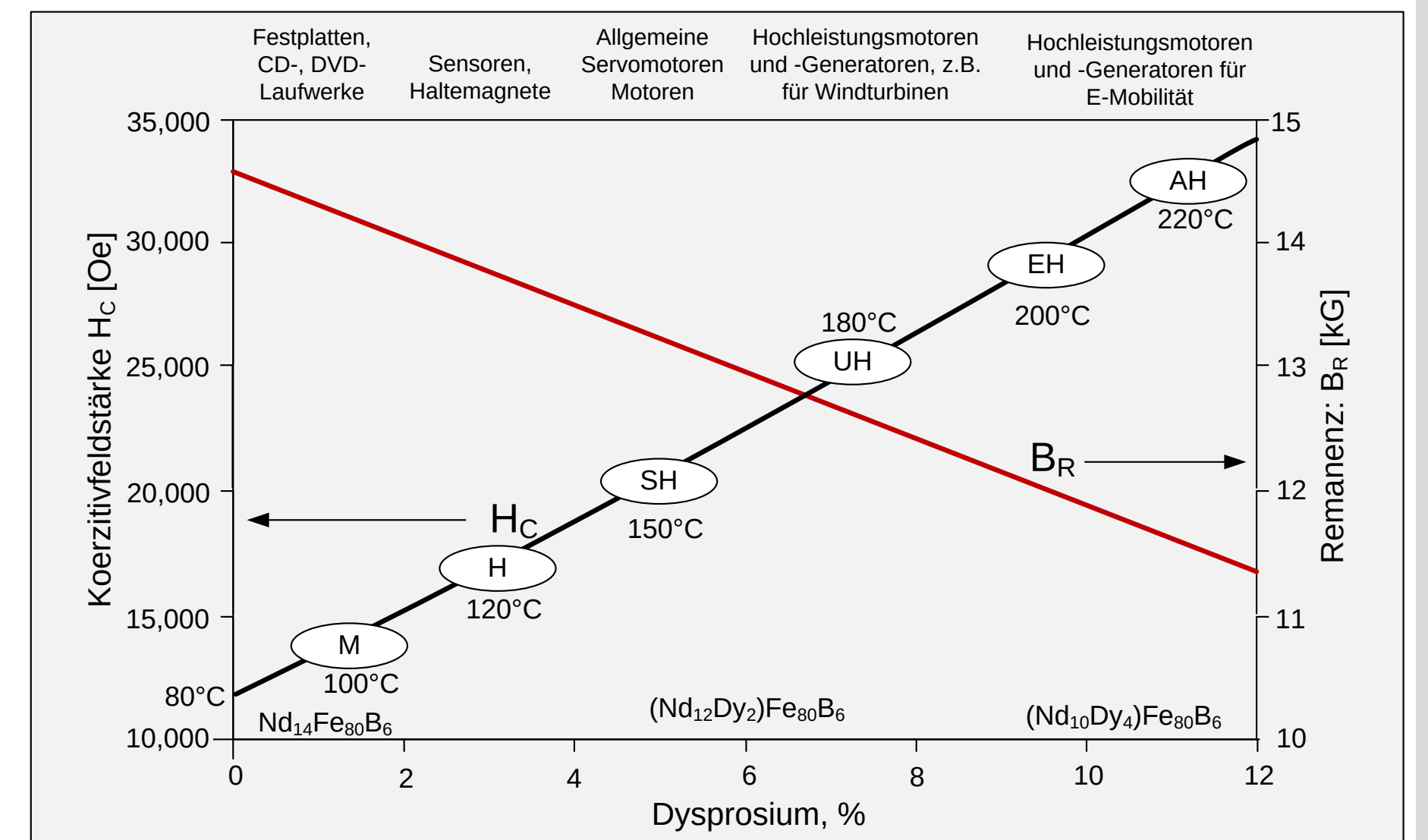


Abb. 1: Entwicklung der Magnettechnologien im vergangenen Jahrhundert sowie Vergleich der Magnetgröße unterschiedlicher Magnetmaterialien bei einheitlicher magnetischer Energie (siehe Gutfleisch et al. 2011). Abkürzungen: SmCo (Samarium-Kobalt), AlNiCo (Aluminium-Nickel-Kobalt).



Materialpreis 08.2015		NdFeB						
Element	Preis (USD/kg)	--	M	H	SH	UH	EH	AH
Fe	\$0,7	67,00%	67,00%	67,00%	67,00%	67,00%	67,00%	67,00%
Nd	\$85,0	32,00%	30,60%	29,20%	27,90%	25,60%	23,30%	21,90%
Dy	\$510,0	1,40%	1,40%	2,80%	4,10%	6,40%	8,70%	10,10%
B	\$0,9	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%	1,00%
Preis Rohmaterial \$/kg		\$27,68	\$33,63	\$39,58	\$45,10	\$54,88	\$64,65	\$70,60

Abb. 2: Eigenschaften von NdFeB-Magneten und die Auswirkungen der Dysprosiumbeimischung auf die Remanenz und Koerzitivfeldstärke. Die Bezeichnungen M, H, SH usw. stellen allgemeine Klassifikationen von NdFeB-Magneten nach Betriebstemperatur dar (vergl. Constantinides 2012).

Methodik

- Zur Simulation detaillierter Verwendungszyklen (Lebenszyklen) verschiedener Produkte oder Materialien mit beliebigen Verwendungsdauer-Verteilfunktionen hat sich der „System Dynamics“ Ansatz durch die Kombination von Bestands- und Flussvariablen sehr gut bewährt (Abbildung 4).
- Die Struktur der hier durchgeführten Materialfluss-Analyse und insbesondere das Prinzip der Bottom-up Modellierung der Materialflüsse in den einzelnen Anwendungsbereichen sind in Abbildung 3 dargestellt.

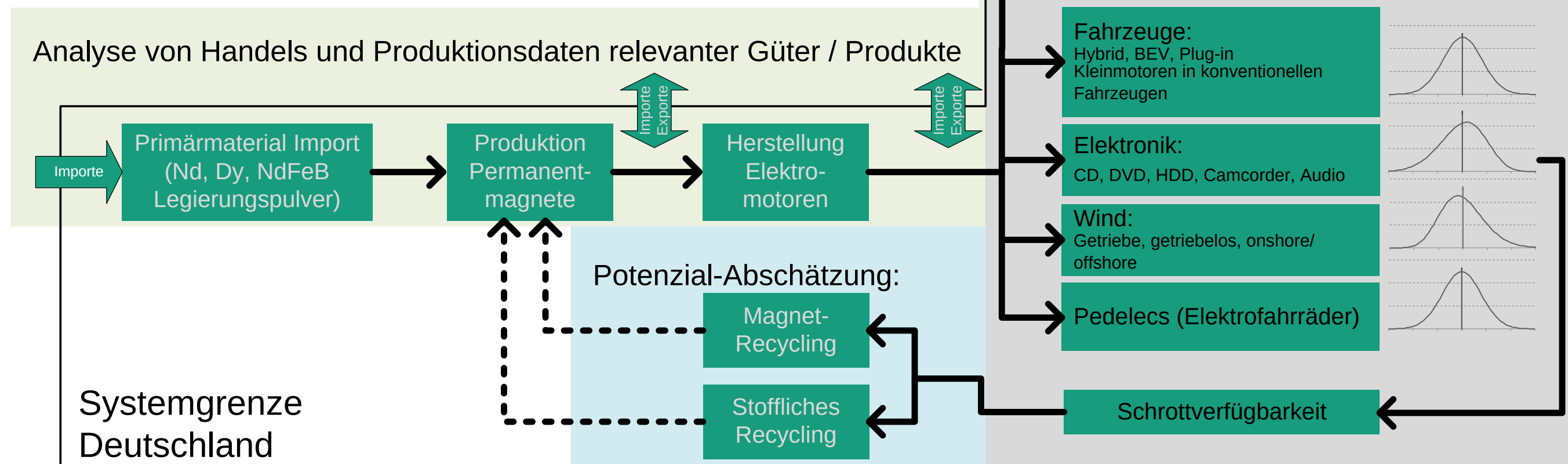


Abb. 3: Struktur des in diesem Beitrag betrachteten Bottom-up-Modells für NdFeB-Magnete.

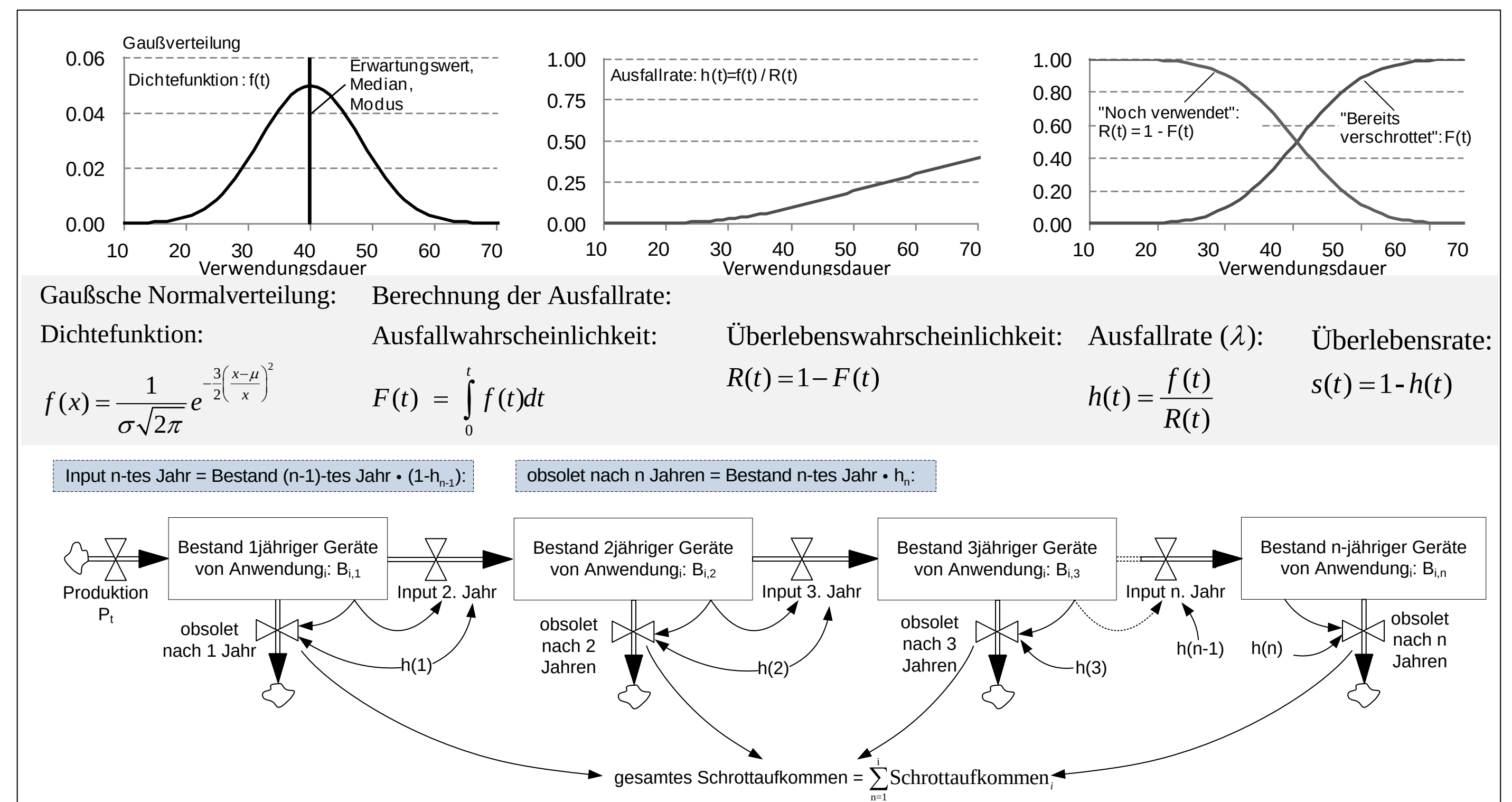


Abb. 4: Simulation von Produktlebenszyklen und Alterungsprozessen über sogenannte „Aging Chains“ und korrespondierende Ausfallwahrscheinlichkeiten.

Betrachtete Anwendungsbereiche

- Elektronikanwendungen:** Insbesondere Festplatten (HDD), CD- und DVD Laufwerke. Hier besteht eine große Streuung, da z.B. pro PC nur von 15-20 g NdFeB-Magneten ausgegangen werden kann (siehe z.B. Habib et al. 2012).
- Pkw:** Moderne Pkw mit konventionellem Antrieb enthalten durchschnittlich ca. 150 g NdFeB-Magnete in einigen der zahlreichen kleineren Elektromotoren, Traktionsmotoren von Hybrid- und Batterie-elektrischen Fahrzeugen enthalten 1-3 kg Magnetmasse.
- Windkraftanlagen:** Hier ist die Verwendung von NdFeB-Magneten stark Technologieabhängig. Direktantriebe (Direct Drive) mit NdFeB-Magneten werden in Europa fast ausschließlich in großen Offshore-Turbinen verwendet. Mit ca. 600 kg/MW Magnetmasse werden in diesen Turbinen teilweise mehr als 3t NdFeB-Magnetmaterial verbaut.
- Pedelecs und E-Bikes:** Während sich der Verkauf von E-Bikes (Elektrofahrräder) hauptsächlich auf Asien, insbesondere auf China konzentriert, werden in Deutschland in den vergangenen Jahren immer mehr Pedelecs (Pedal Electric Cycles) verkauft. Hier werden pro Fahrrad ca. 200g Magnetmasse eingesetzt.

Materialströme aus der Simulation der Verwendungszyklen

Tabelle 1 zeigt die Annahmen zur durchschnittlichen Verweildauer in Verwendung. Da keine detaillierten Verteilfunktionen zur Verwendungsdauer vorhanden waren wurde von Gaußschen Normalverteilungen mit entsprechendem Erwartungswert ausgegangen (siehe auch Abbildung 4).

Tab. 1: Annahmen (literaturbasiert) zu den Verwendungsdauern der einzelnen Bereiche

Anwendungsbereich	Ø Verwendungsdauer
Elektronik (Handy, Laptop etc.)	8-10 Jahre
Pkw (alternativ & konventionell)	12 Jahre
Pedelecs (E-Bikes)	10 Jahre
Windkraftanlagen	>20 Jahre

Die kumulierten Materialmengen aus den in Abbildung 6 gezeigten Einzelbereichen sind in Abbildung 5 dargestellt.

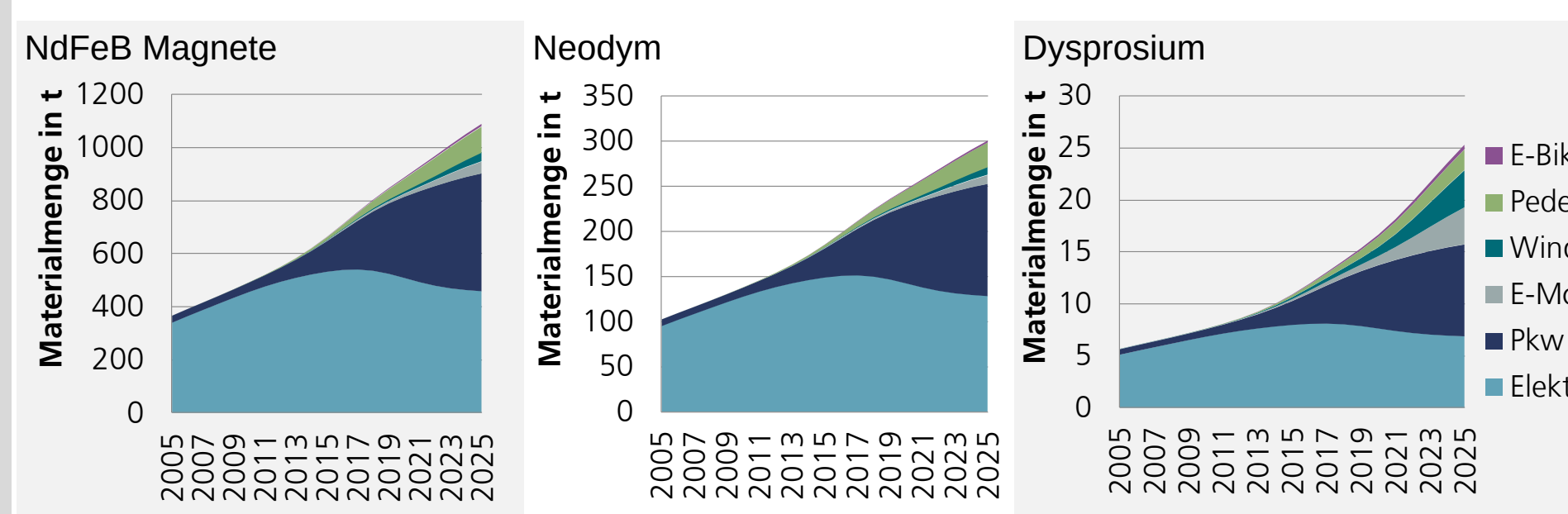


Abb. 5: Kumulierte Materialströme in obsoleten Produkten.

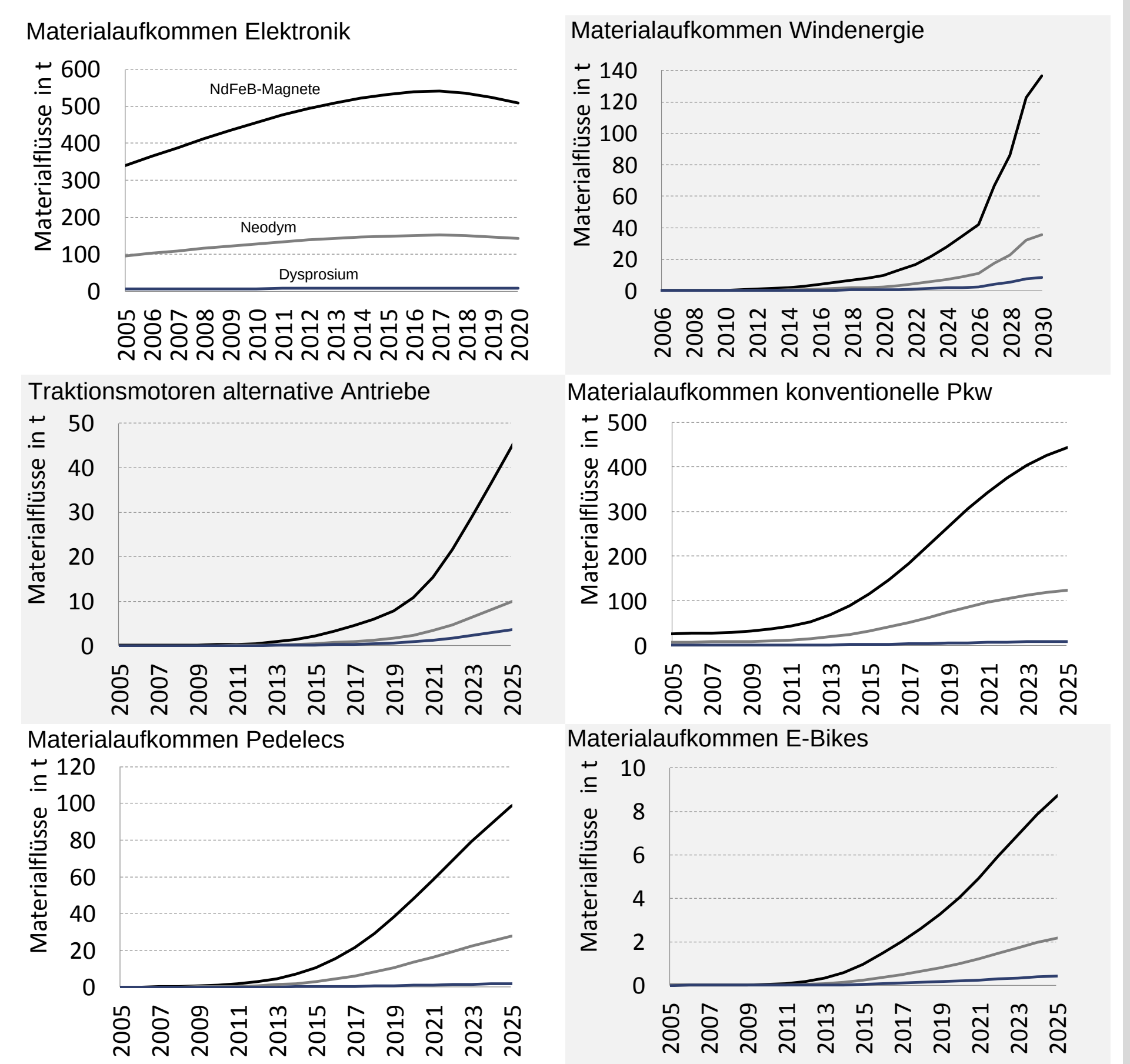


Abb. 6: Ergebnisse der Bottom-up Simulation zur Vorausschau auf zukünftige Materialströme in Altprodukten.

Zusammenfassung und Diskussion

- Angesichts der Produktionszahlen von NdFeB-Magneten in Deutschland in Höhe von ca. 2000 t/a, könnte das Recycling von NdFeB-Magneten in Zukunft nicht unerheblich zur Deckung des Rohstoffbedarfs der deutschen Magnetindustrie beitragen, 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.
- Allerdings ist zu berücksichtigen, dass Exporte gebrauchter Geräte (gebrauchte Pkw, alte Produktionsanlagen, leistungsschwächere Windanlagen in guter Lage, die durch größere Anlagen ersetzt werden) sehr hoch sind. So werden in Deutschland beispielsweise knapp 6 Mio. Pkw jährlich produziert, ca. 3 Mio. Pkw jährlich stillgelegt, aber nur 0,5 Mio. Pkw verschrottet (vergl. Abbildung 7). Die restlichen ca. 2,5 Mio. Pkw werden als Gebrauchtwagen exportiert, was das Potenzial der Rückgewinnung enthaltener Magnete stark einschränkt. Ähnliches gilt für alte Windkraftanlagen und verschiedene Altanlagen im industriellen Bereich.



Abb. 6: Verbleib von Altautos in Deutschland (siehe UBA 2012).

Literatur

Gutfleisch, O.; Willard, M. A.; Brück, E.; Chen, C. H.; Sankar, S. G. und Liu, J. P.: Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient, Advanced Materials 23 (2011) H. 7. S. 821–842
Constantinides, S.: The Demand for Rare Earth Materials in Permanent Magnets (2012): Arnold Magnetic Technologies Inc., Rochester, USA
Habib, K.; Schibye, P. K.; Vestbo, A. P.; Dall, O. und Wenzel, H.: Material Flow Analysis of NdFeB Magnets for Denmark: A Comprehensive Waste Flow Sampling and Analysis Approach, Environmental Science & Technology 48 (2014) H. 20. S. 12229–12237.
UBA: Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2012. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Dessau 2012.

Diese Forschungsarbeit wurde im Zuge des Fraunhofer Leitprojekts „Kritikalität Seltener Erden“ erstellt