

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).



# **DIPLOMARBEIT**

Master Thesis

## **Stoffflussanalyse von Neodym in Hochtechnologieanwendungen für Österreich**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Helmut Rechberger  
und  
Dipl.-Ing. Dr. techn. David Laner

E 226

Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen und Fakultät für Technische Chemie

Von

Claudia Anna Gattringer, BSc.

0602504

Kreuzweg 3, 4111 Walding

Wien, am 14.8.2012

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Menschen danken, die mir bei der Erstellung meiner Arbeit und der Beendigung meines Studiums eine große Stütze waren:

Meinem Betreuer Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. **Helmut Rechberger** und Dipl.-Ing. Dr. techn. **David Laner** für die exzellente Betreuung und dafür, dass ich jederzeit die Fragen stellen konnte, die bei der Durchführung meiner Arbeit aufgekommen sind.

DI **Gunilla Schlosser** und DI **Oliver Cencic** für die gute Zusammenarbeit, die Unterstützung in der Arbeit mit STAN und für die Aufnahme und die vielen netten Gespräche in eurem Büro.

Meiner **Familie** und besonders meinen **Eltern Hans und Eva Gattringer**.

Danke, dass ihr mich immer unterstützt habt, sowohl finanziell als auch emotional.

Danke, dass ihr mir das alles ermöglicht habt.

Danke, dass ich immer das machen konnte, was mir Freude bereitet hat und dass ich mich, ohne finanzielle Sorgen oder Druck zu haben, auf mein Studium konzentrieren konnte.

Meinem Freund **Markus Langthaler**, der mich in den schwierigsten Stunden meines Studiums aufgebaut hat und mir wieder Mut zugesprochen hat.

Danke, dass du immer für mich da warst und immer interessiert zugehört hast, wenn ich von irgendwelchen Sachen, die ich in einer Chemie-Vorlesung gelernt habe, erzählen oder mich über irgendetwas beschweren wollte.

Meinen **Freunden**, die immer für mich da waren und mich mein Studium und die oft damit verbundenen Sorgen vergessen haben lassen.

## Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	- 1 -
Kurzfassung .....	- 4 -
Abstract .....	- 5 -
1. Einleitung.....	- 6 -
1.1 Hintergrund .....	- 6 -
1.2 Zielsetzung.....	- 7 -
1.3 Fragestellungen .....	- 7 -
2. Theoretischer Überblick .....	- 8 -
2.1 Kritische Rohstoffe und Rohstoffpolitik .....	- 8 -
2.2 Seltene Erden .....	- 12 -
2.2.1 Überblick Seltene Erden .....	- 12 -
2.2.2 Neodym .....	- 19 -
3. Material und Methoden .....	- 22 -
3.1 Abschätzung kritischer Rohstoffe für Österreich .....	- 22 -
3.1.1 Abschätzung von kritischen Rohstoffen nach einer Methode der Ad-hoc Arbeitsgruppe der Europäischen Kommission (Europäische Kommission, 2010).....	- 22 -
3.1.2 Abschätzung von kritischen Rohstoffen nach einer Methode von T.E. Graedel und Kollegen (Yale University).....	- 27 -
3.2 Stoffflussanalyse.....	- 30 -
3.2.1 Einleitung (Brunner; Rechberger, 2004).....	- 30 -
3.2.2 STAN .....	- 32 -
3.2.3 Unsicherheiten .....	- 33 -
3.2.4 Stoffflussanalyse für Neodym.....	- 34 -
3.2.4.1 Prozess 1 – Windkraft.....	- 39 -
3.2.4.2 Prozess 2 – Medizin und Forschung .....	- 45 -
3.2.4.3 Prozess 3 – Private Haushalte .....	- 49 -
3.2.4.4 Prozess 4 – Verarbeitende Industrie .....	- 57 -
3.2.4.5 Prozess 5 – Abfallwirtschaft .....	- 60 -
3.2.4.5 Abschätzung des Recyclingpotentials unter Verwendung von Weibull-Funktionen	- 64 -

4.	Ergebnisse und Interpretation .....	- 65 -
4.1	Ergebnisse Kritikalitätsbewertung.....	- 65 -
4.2	Ergebnisse Stoffflussanalyse Neodym .....	- 67 -
4.2.1	Ergebnisse Prozess Windkraft .....	- 69 -
4.2.2	Ergebnisse Prozess Medizin und Forschung.....	- 73 -
4.2.3	Ergebnisse Prozess Verarbeitende Industrie.....	- 73 -
4.2.4	Ergebnisse Prozess Private Haushalte .....	- 75 -
4.2.4.1	Elektroautos .....	- 76 -
4.2.4.2	Hybridautos .....	- 80 -
4.2.4.3	Elektrofahrräder .....	- 83 -
4.2.4.4	Festplatten – HDDs.....	- 85 -
4.2.4.5	Mobiltelefone .....	- 87 -
4.2.4.6	DVD-Player.....	- 90 -
4.2.4.7	Lautsprecher (für HiFi-Anlagen) .....	- 91 -
4.2.5	Ergebnisse Prozess Abfallwirtschaft.....	- 92 -
5.	Diskussion und Ausblick .....	- 96 -
5.1	Kritikalität und Stoffflussanalyse.....	- 96 -
5.2	Datenlage .....	- 101 -
6.	Quellen und Verzeichnisse .....	- 104 -
	Literaturverzeichnis.....	- 104 -
	Abbildungsverzeichnis.....	- 109 -
	Tabellenverzeichnis.....	- 111 -
	Formelverzeichnis .....	- 112 -
Anhang	.....	- 113 -
	Anhang A – Daten Kritikalitätsbestimmung .....	- 113 -
	Anhang B – Daten Stoffflussanalyse.....	- 115 -
	Fragebogen an Hersteller von Windkraftanlagen .....	- 116 -

## Kurzfassung

Neodym ist ein Element der Seltenen Erden und zählt somit zu den kritischen Rohstoffen für die Europäische Union und folglich auch für Österreich. Die Hauptanwendung dieses Elements ist eine Legierung mit Eisen und Bor unter Bildung eines starken Permanentmagneten. Diese Magneten finden u.a. in Festplatten, Motoren und akustischen Geräten Verwendung. Um zukünftige Recyclingpotentiale abschätzen zu können, wurden mit Hilfe einer Stoffflussanalyse (Brunner; Rechberger, 2004) die Flüsse und Lager von Neodym in Österreich im Jahr 2011 qualifiziert und quantifiziert. Die erforderlichen Daten wurden durch direkte Kontaktaufnahme mit Firmen bzw. Institutionen und Literaturrecherche in wissenschaftlichen Berichten und Statistiken ermittelt und mit Unsicherheiten versehen. Diese Unsicherheiten wurden mit Hilfe der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung berücksichtigt und die erhaltenen Werte in der Software STAN© einer Ausgleichsrechnung unterzogen. Im nächsten Schritt wurde unter Anwendung von Weibull-Funktionen versucht, das Recyclingpotential von Neodym für die Zukunft abzuschätzen. Die durchgeführte Stoffflussanalyse ergibt ein Gesamtlager von Neodym in Österreich im Jahr 2011 von 170 +/- 18% Tonnen, einen Import-Fluss von 23 +/- 12% Tonnen und eine Lagerzunahme von 23 +/- 12% Tonnen. Im Prozess Private Haushalte ergibt sich ein Lager von 130 +/- 21% Tonnen, ein Import-Fluss von 21 +/- 13% Tonnen, ein Export-Fluss von 13 +/- 14% Tonnen und eine Lagerzunahme von 7,5 +/- 44% Tonnen Neodym. Für den Prozess Windkraft ergibt sich ein Lager von 42 +/- 33% Tonnen, ein Import-Fluss von 2,1 +/- 22% Tonnen und eine Lagerzunahme von 2,1 +/- 22% Tonnen Neodym. Im Jahr 2033 werden, auf Basis der in dieser Arbeit entwickelten Szenarien, 36 Tonnen Neodym anfallen, die durch ein geeignetes Recycling wiederverwendet werden könnten. In der Republik Österreich verbergen sich folglich Neodym-Lager, die die Gefahr drohender Versorgungsengpässe mit diesem Element mindern könnten. Um ein Recycling dieser Schätze zu ermöglichen, ist es essentiell die Datenlage über den Verbleib von Neodym in Österreich zu verbessern, als auch effiziente Sammel- und Recyclingsysteme zu schaffen, die es ermöglichen dieses enorme Potential auch zu nutzen.

## Abstract

The Rare Earth Elements are gaining more and more interest because they are essential for many high-technology applications and are among the critical raw materials for the European Union. One of these Elements, Neodymium, is regarded as highly important to the European Union because of its main application as Neodymium-Iron-Boron alloy. This special alloy is used as a strong permanent magnet in a wide range of applications, for example in hard disk drives, engines, cars, optical devices and MRTs.

This thesis aims to identify the applications and quantities of Neodymium in Austria concerning recycling possibilities to avoid future bottlenecks in supply.

# 1. Einleitung

## 1.1 Hintergrund

Die von der Europäischen Kommission initiierte Rohstoffinitiative arbeitet an der Erstellung eines Konzepts, das die nachhaltige Versorgung der Europäischen Union mit kritischen Rohstoffen sichern soll. Die Europäische Kommission (2010) bezeichnet Rohstoffe dann als kritisch, wenn sie mit einem hohen Versorgungsrisiko behaftet und von großer wirtschaftlicher Bedeutung sind. Das Eintreten von Versorgungsengpässen ist folglich für diese Rohstoffe sehr wahrscheinlich, weshalb mit Nachdruck an Gegenmaßnahmen geforscht wird. Zu den kritischen Rohstoffen zählen u.a. die Seltenen Erden und mit ihnen auch das Element Neodym. Besonders die künstliche Verknappung durch Handelsbeschränkungen dieser für viele Hochtechnologieanwendungen essentiellen Elemente durch die Volksrepublik China ließ Entscheidungsträger europaweit aktiv werden.

Die Hauptanwendung des Seltenerdelements Neodym ist in einer Legierung mit Eisen und Bor als starke Permanentmagneten. 76 % des weltweit produzierten Neodyms werden für die Herstellung der Magneten herangezogen (Buchert et al., 2011). Diese Magneten, die sehr hohe Energiedichten aufweisen, finden in Festplatten, Motoren, Akustischen und Optischen Geräten und in der Magnetresonanztomographie Verwendung (Moss et al., 2011). Bis 2030 erwarten sich Experten eine Versechsfachung der Nachfrage nach den starken Permanentmagneten (Angerer et al., 2009).

Die steigende Nachfrage nach diesem Rohstoff wird die Etablierung eines Recycling-Konzepts für Neodym erzwingen. Aus jetziger Sicht ist ein Recycling jedoch noch nicht möglich, da die Ausbeuten aus den Techniken zu gering und der finanzielle Aufwand zu groß sind als dass sich sekundäre Rohstoffquellen wirtschaftlich rentieren würden (Öko Institut, 2011).

Dies bedeutet, dass es, um zukünftigen Versorgungsengpässen entgegensteuern zu können, essentiell ist, die anthropogenen Neodym-Lager zu kennen und zu quantifizieren, um sie gegebenenfalls nutzen zu können. Des Weiteren müssen Technologien erarbeitet werden, die das vorhandene Potential mit geringem wirtschaftlichem und energetischem Aufwand verfügbar machen.

## 1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Flüsse und Lager von Neodym in Österreich zu identifizieren und zu quantifizieren. Dazu wird mithilfe der Software STAN der österreichische Stoffhaushalt für dieses Seltenerdmetall abgebildet. Die Flüsse und Lager von Neodym werden ermittelt, indem die Hauptanwendungen dieses Elements herangezogen werden und deren Vorkommen bzw. Häufigkeit im System Österreich bestimmt oder auch geschätzt werden. Aufgrund zu erwartender Datenlücken, unscharfer Angaben und unbekannter Repräsentativität von Literaturdaten bei der Durchführung der Neodym-Stoffflussanalyse, kommt der Berücksichtigung von Unsicherheiten eine wesentliche Rolle zu. Dadurch kann die Robustheit der Ergebnisse beurteilt werden und es können Empfehlungen zur Verbesserung der Datenlage gegeben werden. Basierend auf der Stoffflussanalyse können Aussagen zu möglichen Recyclingpotentialen abgeleitet werden, um die Importabhängigkeit und das Versorgungsrisiko dieses Rohstoffs in Zukunft zu verringern.

## 1.3 Fragestellungen

Im Rahmen dieser Arbeit sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie kann die Kritikalität von Rohstoffen ermittelt werden?
- Warum sind Seltenerdmetalle für Hochtechnologieanwendungen von so großer Relevanz?
- In welchen Anwendungen wird Neodym eingesetzt?
- Welches sind die wesentlichen Prozesse und Güterflüsse des österreichischen Neodym-Stoffhaushalts? Wie ist die Datenlage, um die relevanten Flüsse zu beschreiben?
- Wie können die Unsicherheiten der Daten bzw. des Stoffflussmodells bewertet werden?
- Können, ausgehend von der erstellten Stoffflussanalyse, Empfehlungen abgegeben werden? Wie robust sind entsprechende Aussagen?
- Welche Informationen würden das Erstellen der Stoffflussanalyse erleichtern?
- Welche Technologien stehen für das Recycling von Neodym aus unterschiedlichen Produkt- bzw. Abfallströmen zur Verfügung? Werden solche Technologien in Österreich eingesetzt?
- Gibt es Flüsse/Lager, die sich für ein Recycling eignen?

## 2. Theoretischer Überblick

### 2.1 Kritische Rohstoffe und Rohstoffpolitik

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird der Begriff „kritische Rohstoffe“ oft dafür eingesetzt einer geologischen Seltenheit von Rohstoffen, wie z.B Metallen, Ausdruck zu verleihen. Schlägt man das Wort *kritisch* im Wörterbuch der Deutschen Rechtschreibung nach, erhält man folgende Bedeutungen: streng prüfend und beurteilend, negativ beurteilend, eine Wende ankündigend, entscheidend für eine (gefährliche) Entwicklung oder eine starke Gefährdung bedeutend. Besonders die beiden letzten Definitionen scheinen sehr zutreffend zu sein: ein kritischer Rohstoff könnte somit ein Rohstoff sein, der einerseits mit der Gefahr behaftet ist für eine Volkswirtschaft knapp zu werden und andererseits entscheidend für eine (technologische) Entwicklung ist.

Die Europäische Kommission versucht seit Einführung der sogenannten „Rohstoffinitiative“ im November 2008 sowohl den Begriff „Kritische Rohstoffe“ zu definieren, als auch Möglichkeiten zu finden, die Europäische Union nachhaltig mit den notwendigen Ressourcen zu versorgen. Der Bericht „Critical raw materials for the EU“ einer ad-hoc Arbeitsgruppe der Europäischen Kommission definiert den Begriff „kritisch“ und listet 14 Rohstoffe als für die Europäische Union kritisch auf. Die genauen Details zur Bestimmung der Kritikalität sind unter 3.1.1 zu finden.

Als Ergebnis dieses Berichts werden Rohstoffe dann als kritisch qualifiziert, wenn ein hohes Versorgungsrisiko oder umweltpolitisches Risiko besteht, und wenn diese für den beobachteten Staat bzw. Staatenverband von großer wirtschaftlicher Bedeutung sind. Unter diesen Umständen ist die Wahrscheinlichkeit, dass Versorgungsengpässe eintreten, erhöht (Europäische Kommission, 2010). Im Bericht wird des Weiteren betont, dass es sich bei dieser Methode um eine relative Bestimmung der Kritikalität und nicht um absolute Werte handle. Ein Rohstoff ist folglich immer nur kritischer oder weniger kritisch als andere.

Wie bereits zu Beginn erwähnt, wird oft angenommen, dass kritische Rohstoffe bzw. Metalle auch selten sein müssen. Wirft man allerdings einen Blick auf die Anteile der Metalle in der Erdkruste, zeigt sich ein etwas anderes Bild (siehe Tabelle 1).

**Tabelle 1: Kritische Rohstoffe EU (Europäische Kommission, 2010) und deren Häufigkeit in der Erdkruste (Rutherford, 2006)**

<b>Metall</b>	<b>Häufigkeit ppm</b>	<b>Metall</b>	<b>Häufigkeit ppm</b>
<b>Antimon</b>	<b>0,2</b>	<b>Indium</b>	<b>0,049</b>
<b>Beryllium</b>	<b>2,6</b>	<b>Magnesium</b>	<b>23000</b>
<b>Kobalt</b>	<b>20</b>	<b>Niob</b>	<b>20</b>
<b>Fluorit</b>	<b>-</b>	<b>Platingruppenmetalle</b>	<b>~0,001</b>
<b>Gallium</b>	<b>18</b>	<b>Seltenerdmetalle</b>	<b>68-0,5</b>
<b>Germanium</b>	<b>1,8</b>	<b>Tantal</b>	<b>2</b>
<b>Graphit</b>	<b>-</b>	<b>Wolfram</b>	<b>1</b>

Alle in Tabelle 1 gelisteten Rohstoffe werden in der Europäischen Union als kritisch erachtet, jedoch ist bei genauerem Hinsehen zu erkennen, dass die Häufigkeiten der Elemente von ungefähr 1 ppb (parts per billion) für die Platingruppenmetalle bis 23000 ppm (parts per million) – entspricht 2,3 % – für Magnesium reichen. Das weltweite geologische Vorkommen dürfte daher keinen Einfluss auf die Kritikalität eines Rohstoffs nehmen. Diese Annahme wird u.a. durch den Umstand bestärkt, dass Edelmetalle - wie z.B. Silber und Gold mit sehr kleiner Häufigkeit von 0,07 und 0,011 ppm - nicht zu den kritischen Rohstoffen für die Europäische Union zählen.

An dieser Stelle kommt allerdings die Frage auf, warum die Rohstoffpreise dennoch so starken Schwankungen unterliegen konnten (finanzen.net, 2012), wie es zu Beginn dieses Jahrzehnts der Fall war, wenn die geologischen Vorkommen in den meisten Fällen ausreichend sind?

Angerer et al. (2009) stellen in ihrem Bericht über „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“ einen Zusammenhang zwischen technischem Wandel bzw. Innovation und Rohstoffbedarf dar. Auch in diesem Bericht wird betont, dass die Preisschwankungen in keinem Zusammenhang mit einer geologischen Seltenheit stehen, sondern dass vielmehr Ungleichgewichte in Angebot und Nachfrage bestehen. Hier wird vor allem das starke Wirtschaftswachstum der Schwellenländer genannt, die einen großen Bedarf an Ressourcen zu decken haben. Ein weiterer Einflussfaktor für die Rohstoffpreise ist die künstliche Verknappung mancher Rohstoffe durch die Volksrepublik China (NZZ Online, 2011).

China wollte im Jahr 2011 durch eine Senkung der Exportmengen um 27 % den fallenden Preisen der Seltenerdmetalle, die in vielen technischen Geräten verbaut sind und nicht substituiert werden können, gegensteuern. Dieses Beispiel zeigt, dass es sich bei der Rohstoffversorgung und somit auch den Rohstoffpreisen um ein höchst vulnerables System handelt, das global vernetzt und vielen komplexen Einflussfaktoren ausgesetzt ist (Angerer et al., 2009). Um die Kritikalität zu definieren und auch darstellen zu können, existieren verschiedene wissenschaftliche Ansätze, die unter Punkt 3.1 näher behandelt werden.

Die bereits erwähnte „Rohstoffinitiative“ der Europäischen Union ist als der erste Schritt einer gemeinsamen Rohstoffpolitik der EU zu definieren. Die EU ist durch ihre wirtschaftliche Struktur stark von der Versorgung mit mineralischen Rohstoffen abhängig, denn die nachgelagerten Wirtschaftszweige tragen 1300 Milliarden € zur Wertschöpfung der EU bei und beschäftigen insgesamt 30 Millionen Menschen. Ein weiterer Grund für die Brisanz dieses Themas ist, dass die Europäische Union zwar technologisch hochwertige Produkte herstellt, jedoch von den Rohstoffimporten anderer Länder abhängig ist. Der Anteil der EU-weiten Produktion an mineralischen Rohstoffen an der Weltproduktion liegt lediglich bei 3% (European Commission, 2008).

Wie in Punkt 3.1.1 näher erörtert, hängt die Rohstoffversorgung sehr von der politischen Stabilität der produzierenden Länder ab. Kriege und Volksaufstände können somit die globale Rohstoffpolitik beeinflussen und liefern einen weiteren Grund für eine einheitliche Vorgehensweise der Europäischen Union. Denn einige wichtige Rohstoffe werden in großen Mengen in instabilen Ländern der Erde abgebaut, wie in Teilen Zentralafrikas, ehemaligen Staaten der Sowjetunion, den Philippinen und Teilen von Südamerika (Tiess, 2010). Der Bundesverband der deutschen Industrie schätzt, dass 60% der metallischen Rohstoffe aus instabilen oder sehr instabilen Ländern stammen (BDI, 2007). Obwohl die kritische Versorgungslage und die Importabhängigkeit der EU bekannt sind, ist es auffällig, dass die Europäische Union in Sachen Rohstoffstrategien weltweit zu den Schlusslichtern gehört. Die USA, die sogenannten BRIC Staaten (Brasilien, Indien, Russland und China), Japan, Korea, Indonesien und einige Staaten Südamerikas und Afrikas haben bereits eigene Rohstoffstrategien und -politiken erarbeitet. In manchen Fällen ging es sich bei diesen Strategien auch darum, Europa den Zugang zu Ressourcen zu erschweren und die eigene Industrie dadurch zu fördern (Tiess, 2010). Obwohl in Europa momentan ein Großteil der mineralischen Rohstoffe importiert wird, gibt es geologische Vorkommen, die Potential haben, um für den Bergbau genutzt zu werden.

In den vergangenen Jahren wurden Investments im Bereich der Ressourcengewinnung dadurch gehemmt, dass rechtliche Zulassungsverfahren in der Europäischen Union zeitlich aufwendig und aufgrund strenger Umweltauflagen auch äußerst schwierig sind (Department of Mining and Tunnelling, 2004; Hamor, 2004).

Die EU Raw Materials Initiative of 2008 entwickelt die Rohstoffstrategie aufbauend auf folgenden Eckpfeilern (Tiess, 2010):

- Gewährleistung der Rohstoffversorgung der Europäischen Union unter denselben Bedingungen wie andere industrielle Mitbewerber
- Bildung der Rahmenbedingungen zur Förderung einer nachhaltigen Versorgung mit Rohstoffen aus europäischen Quellen
- Steigerung der Ressourcen-Effizienz, intensiveres Recycling, Reduktion des Verbrauchs an Primärrohstoffen und Verringerung der Importabhängigkeit

Zusammenfassend ist hier noch festzuhalten, dass die Nachfrage nach Rohstoffen weltweit zunehmen wird und dass die Europäische Union auf Versorgungsengpässe zusteuert, da sie u.a aufgrund von rechtlichen und ökologischen Aspekten in hohem Maße auf Rohstoffimporte angewiesen ist. Diese Risiken der EU wurden von den Entscheidungsträgern zwar bereits erkannt, die strategischen Maßnahmen aber sehr spät gesetzt (Tiess, 2010).

## 2.2 Seltene Erden

### 2.2.1 Überblick Seltene Erden

Der Begriff „Seltene Erden“ umfasst eine Gruppierung von Elementen im Periodensystem, die sich chemisch ähnlich verhalten und deren Existenz im Jahr 1794 entdeckt wurde (Oakdene Hollins, 2010). Zu dieser Gruppe werden die 15 Lanthanoiden (Elemente mit den Ordnungszahlen 57 bis 71), Yttrium (Ordnungszahl  $Z=39$ ) und in manchen Fällen auch Scandium gezählt. Die Bezeichnung der genannten Elemente als Seltene Erden ist auf den ersten Blick mehr als verwirrend, denn sie sind weder selten noch haben sie etwas mit dem, im allgemeinen Sprachgebrauch verwendeten, Wort Erde zu tun. Im 18. und 19. Jahrhundert, der Zeit der Entdeckung dieser Elementgruppe, wurde der Begriff „Erde“ dazu verwendet oxidische Verbindungen zu benennen (z.B. Tonerde für  $Al_2O_3$ ). Da die Seltenen Erden, die aus Mineralien extrahiert werden konnten, jedoch nicht metallisch, sondern oxidisch vorlagen, wurden sie folglich auch als Erden bezeichnet (Castor, 2006). Die Seltenerdmetalle liegen in der Erdkruste in einer Häufigkeit von 0,5 bis 68 ppm vor (Rutherford, 2006) und sind damit weniger selten als Gold, Silber, die Platingruppenmetalle und einige mehr. Wie kommen diese Elemente zu ihrem Attribut, der Seltenheit? Wie bereits erwähnt, war es zur Zeit der Entdeckung der Seltenen Erden nur möglich, diese als Oxide aus dem Mineral zu gewinnen. Diese Prozesse waren einerseits aufwendig und andererseits waren die Konzentrationen der Elemente in den Mineralien sehr gering, weshalb ihnen auch die Seltenheit zugeschrieben wurde (Oakdene Hollins, 2010). Die außerordentlichen Eigenschaften der Seltenen Erden waren für die Wissenschaftler des 18. und 19. Jahrhunderts eine Herausforderung und oft frustrierte sie der Umstand, dass es schier unmöglich schien diese Elemente voneinander zu trennen und metallisch darzustellen. Der britische Wissenschaftler Sir William Crookes tätigte dazu folgenden Ausspruch (Emsley, 2001):

*„Die Seltenen Erden verwirren uns [...], stellen uns in unseren Theorien vor ein Rätsel [...]. Sie breiten sich wie ein unbekanntes Meer vor uns aus, [...] verspotten uns und murmeln seltsame Offenbarungen und Möglichkeiten.“ Sir William Crookes, 1902.*

Das in dieser Diplomarbeit näher betrachtete Element Neodym blieb lange Zeit unerkannt. Carl Gustav Mosander (1797-1858), Professor für Chemie und Pharmazie in Stockholm, entdeckte im Jahr 1840 die neue Erde *Didymia*, benannt nach dem griechischen Wort für Zwilling. Das Wort Zwilling wurde deshalb von Mosander auserwählt, weil sich dieses Element chemisch so verhielt wie ein Zwilling des Elements Lanthan. Erst 1885 vermochte der berühmte österreichische Chemiker Carl Auer von Welsbach (1858-1929) mit der Trennmethode der fraktionierten Kristallisation dieses

„Element“ in seine Bestandteile aufzutrennen. Durch die Fraktionierung erhielt er grüne Kristalle (das Element dieser Verbindung nannte er den „grünen Zwilling“ *Praseodym*) und amethystfarbene Kristalle (das Element dieser Verbindung nannte er den „neuen Zwilling“ *Neodym*) (Meyer, 2001).

Die Seltenerdmetalle können in leichte und schwere Seltene Erden eingeteilt werden, wobei keine einheitliche Gliederung existiert. Eine beispielhafte Einteilung wäre die Elemente von Lanthan bis Samarium den leichten Seltenen Erden und die Elemente von Europium bis Lutetium den schweren Seltenen Erden zuzuordnen (Oakdene Hollins, 2010).

Das besondere an den Seltenen Erden ist, wie bereits erwähnt, ihre chemische Ähnlichkeit. Ihre Ionenradien sind ähnlich groß und ihre Ionenladung ist bis auf die Ausnahmen  $Ce^{4+}$  und  $Eu^{2+}$  (in manchen Umgebungsbedingungen) einheitlich 3-fach positiv. Diese beiden Aspekte sind die Ursache dafür, dass Seltene Erden innerhalb eines Kristallgitters leicht substituiert werden können und daher auch oft verschiedene Seltene Erden innerhalb eines Minerals vorkommen können (Castor, 2006).

Die U.S Geological Survey (USGS, 2012) schätzt die weltweiten Reserven an Seltenerd-Oxiden auf 110 Millionen Tonnen und gibt den weltweiten Abbau dieser Oxide im Jahr 2011 mit 130.000 Tonnen an. Öko-Institut (2011) erwartet, dass die Seltenerd-Oxid Reserven steigen werden, da die hohen Preise und die möglichen Versorgungsengpässe die Erschließung neuer Minen interessant machen wird bzw. macht. Abbildung 1 zeigt die aktuelle Verteilung der weltweiten, wirtschaftlich nutzbaren Reserven nach Ländern.

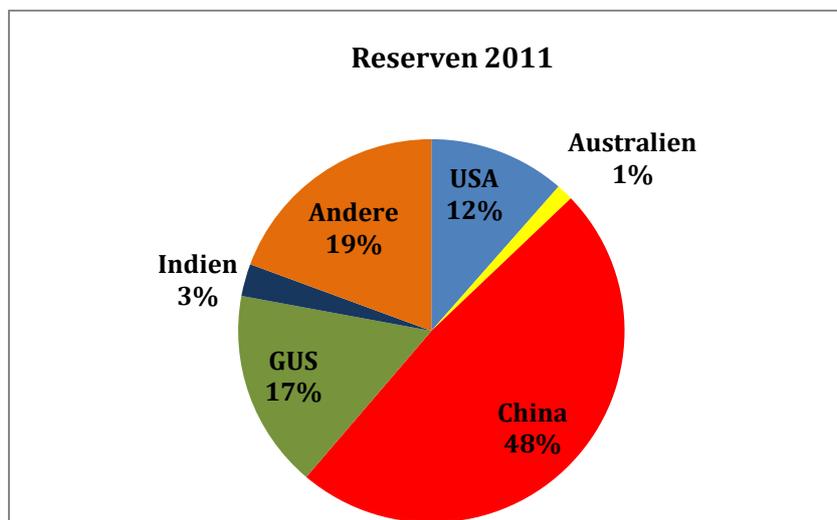


Abbildung 1: Reserven der Seltenen Erden Oxide, SEO nach Ländern (USGS, 2012)

Laut dieser Quelle besitzt die Volksrepublik China geschätzte 48 % der globalen Seltenerd-Oxid Reserven. Stellt man diese Zahl der Produktion an Seltenen Erden im Jahr 2011 gegenüber (World Mining Data, 2012), zeigt sich ein vollkommen anderes Bild: China produzierte 2011 knapp 98 % der weltweit gehandelten Seltenen Erden und ist sich seiner Macht durchaus bewusst. Im Jahr 1992 tätigte der damalige Staatschef Deng Xiaoping folgenden Ausspruch (Ruhkamp, 2011):

*„Der Mittlere Osten hat sein Öl, China hat seine Seltenen Erden“ Deng Xiaoping, 1992, damaliger Staatschef Chinas*

Die größte Seltenen Erden Mine befindet sich in der Inneren Mongolei in Bayan Obo und besitzt wirtschaftlich nutzbare Reserven von 43,5 Millionen Tonnen (Öko-Institut, 2011). Von wirtschaftlichem Interesse sind vor allem die Seltene Erden (rare earth elements, REE) enthaltenden Mineralien Bastnäsit  $[\text{REE}(\text{CO}_3)\text{F}]$  und Monazit  $[(\text{REE}, \text{Th}) \text{PO}_4]$  (Stosch, 2000).

Die Lager in Bayan Obo bestehen sowohl aus Bastnäsit und Monazit, wobei ersterem Mineral die größeren Vorkommen zugeschrieben werden. Die in Bayan Obo aus Bastnäsit gewonnene Mischung aus Seltenen Erden besteht aus 50% Cer, 27% Lanthan, 15% Neodym, 5% Praseodym und 3% anderen Seltenen Erden (Öko-Institut, 2011). Hier ist wieder gut die chemische Ähnlichkeit der Seltenen Erden zu erkennen, die bereits erwähnt wurde, wodurch die Mineralien immer aus Seltenen Erden Mischungen bestehen und schwieriger aufzutrennen sind als andere Metalle.

Da der Anteil der „Anderen Länder“ an den Reserven mit 19 % relativ hoch ist, sind hier noch einige dieser Länder exemplarisch zu erwähnen: in Kanada, Grönland, Südafrika, Finnland, Schweden und einigen mehr sind größere Seltene Erden Vorkommen bekannt (BGS, 2011).

Bis zum Jahr 2002 wurden Seltene Erden auch in anderen Ländern abgebaut, wie zum Beispiel in der Mountain Pass Mine in Kalifornien, USA.

Abbildung 2 zeigt sehr deutlich, dass die Produktion Seltener Erden stetig zugenommen hat und dass vor allem der Marktanteil Chinas stark gestiegen ist.

Ab 2002 konnte China seine Dominanz am Seltenen Erden Markt zu einem Quasi-Monopol ausbauen, da die Mountain Pass Mine in Kalifornien aufgrund von Umweltproblemen und mangelnder Wettbewerbsfähigkeit geschlossen werden musste (Öko-Institut, 2011).

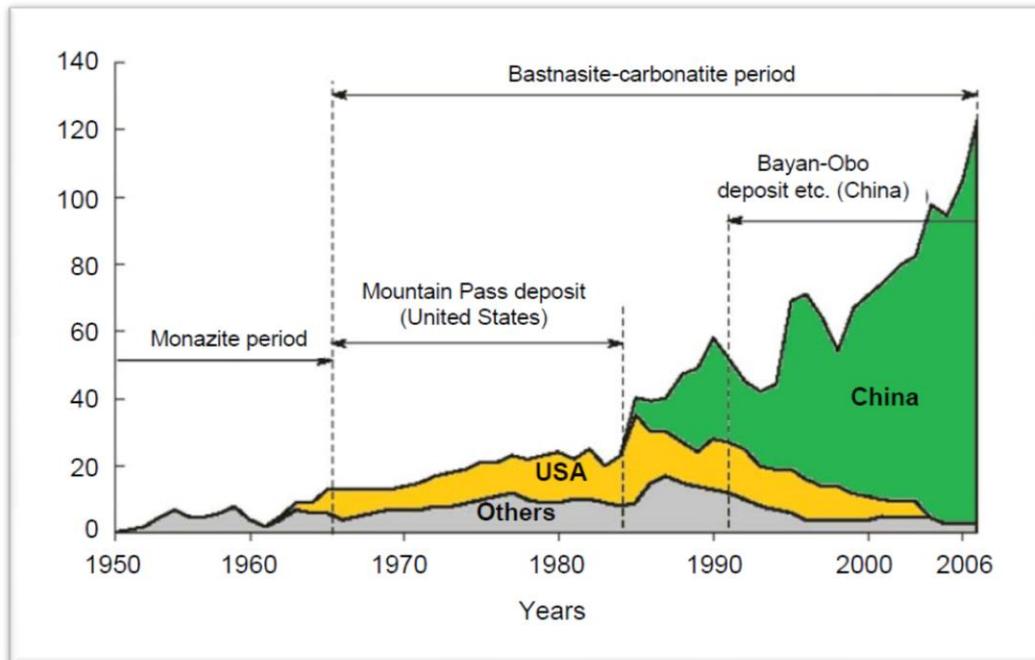


Abbildung 2: Weltweite Produktion an Seltenerdoxid von 1950-2006 [in 1000 Tonnen]

Bedingt durch die Exportrestriktionen der Volksrepublik China und der steigenden Rohstoffpreise wurde die Seltenen Erden Mine in Kalifornien im Dezember 2010 wieder eröffnet. Die endgültige, maximale Leistung der Mine wird Ende 2013 erwartet (Molycorp, 2012).

China mit seinem weltweiten Produktionsanteil an Seltenen Erden von 98 % exportiert diese Rohstoffe jedoch nicht nur, es nutzt sie auch, um die eigene Wirtschaft damit zu versorgen. Momentan existieren in China 24 Bergbauunternehmen für Seltene Erden und 100 nachgelagerte Unternehmen, die die gewonnenen Seltenen Erden weiterverarbeiten. China produziert sowohl Zwischenprodukte wie Metalle und Legierungen, stellt aber ebenso Endprodukte her, wie z.B. Katalysatoren, Permanentmagnete und Leuchtstäbe (Öko-Institut, 2011).

Beispiele für Betriebe, die außerhalb Chinas Seltene Erden weiterverarbeiten, sind die Treibacher Industrie AG in Österreich und Rhodia aus Frankreich (Öko-Institut, 2011).

Die Europäische Union ist stark von Importen aus der Volksrepublik China abhängig, Eurostat (2010) schätzt den Anteil der Seltenen Erden Importe aus China auf 90 %. Ein weiterer interessanter Aspekt ist die Betrachtung der Verteilung der Importe an Seltenen Erden auf die EU – Länder, siehe Abbildung 3.

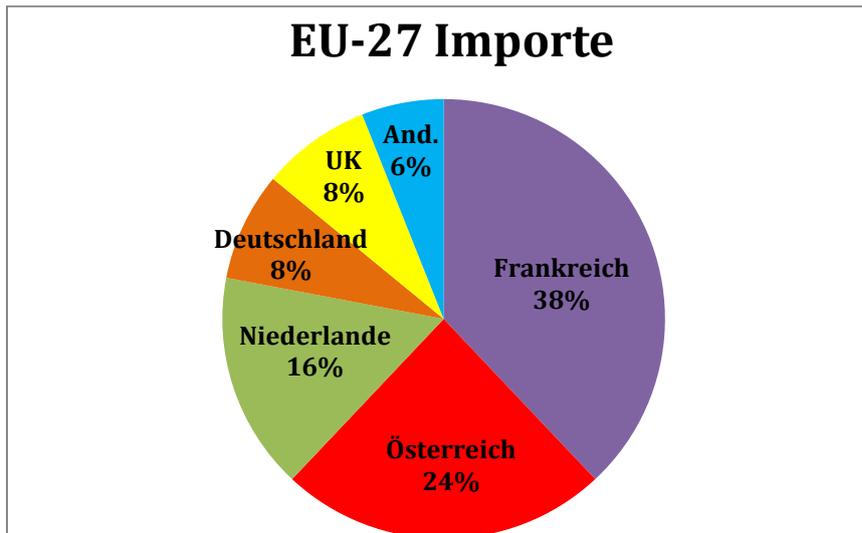


Abbildung 3: Anteil EU-27 Länder an Seltenen Erden Importen (Eurostat, 2010)

In Abbildung 3 sind die Anteile einiger EU-Länder an den Seltene-Erden-Importen dargestellt. An erster Stelle liegt Frankreich mit 38%, an zweiter Stelle liegt bereits Österreich mit 24%, gefolgt von den Niederlanden mit 16%. Die übrigen Anteile verteilen sich mit jeweils 8% auf Deutschland und Großbritannien und 6% auf andere Länder.

Ein weiterer Aspekt, der im Zusammenhang mit dem Abbau der Seltenen Erden auch einbezogen werden sollte, ist der Umweltschutz. Da die Seltenen Erden im Vergleich zu anderen Metallen in ihren Mineralien gemischt auftreten, braucht es sowohl viel Energie als auch einen großen Einsatz von Chemikalien, um diese Elemente voneinander trennen zu können (Öko-Institut, 2011).

Um die Umweltrisiken, die im Rahmen der Gewinnung der Seltenen Erden ein Problem darstellen, beurteilen zu können, ist es wichtig die Schritte der Erzaufarbeitung zu kennen. Eine Technik, die unter anderem auch in Bayan Obo - der weltweit größten Seltenen Erden Mine - verwendet wird, ist die Anreicherung der Erze durch Zerkleinerung des Gesteins und anschließender Flotation (Öko-Institut, 2011). Nach dem Abbau des Seltene Erden enthaltenden Gesteins, wird das Erz zerkleinert

und zu feinem Pulver vermahlen, um die Oberfläche für die weitere Verarbeitung möglichst zu vergrößern. Schlussendlich wird das vermahlene Erz durch physikalische Trennmethoden, wie die Flotation, aufgetrennt. In diesem Schritt werden sowohl große Wasser- und Chemikalien-, als auch Energiemengen verbraucht. Das nach der Flotation erhaltene Seltene-Erden-Konzentrat enthält 30-70 % Seltene Erden (Öko-Institut, 2011). Die entstehenden Abfallströme, auch Abgänge genannt, werden in durch Dämme geschützten Seen gelagert. Von eben diesen Seen gehen die größten Umweltrisiken aus, denn sie enthalten kleine Partikel mit großer Oberfläche, Abwässer und Chemikalien. Wird Monazit abgebaut, enthalten sie auch radioaktive Elemente wie Thorium. Kommt es zum Bruch der Dämme durch Stürme oder Erdbeben, könnten die enthaltenen Chemikalien die Umwelt verseuchen und zu großen Belastungen für Flora und Fauna führen. Auch ohne Dambruch kann es zu Einträgen von Chemikalien ins Grundwasser kommen, sowie zu Luftemissionen von Schadstoffen während der Erzbehandlung. Da es sich bei der Mine in Bayan Obo um die weltweit größte Seltene-Erden-Lagerstätte handelt, werden hier kurz die von ihr ausgehenden wesentlichen Umweltbelastungen erwähnt. Nach der bereits beschriebenen Bearbeitung der Erze, werden die Abfälle in einem Stausee in der Nähe der Mine gelagert. Dieser See ist hundertmal so groß wie der Abfallsee einer Aluminiumfabrik in Ungarn, deren Damm am 4. August 2010 brach und 600.000 bis 700.000 Kubikmeter toxischen Rotschlamm freisetzte (Bradsher, 2010; WISE-Uranium, 2010).

Abbildung 4 zeigt eine Satellitenaufnahme des künstlich geschaffenen Sees nahe der Mine Bayan Obo.



Abbildung 4: Abfallsee bei Bayan Obo Mine in Baotou, China; Satellitenaufnahme (Bradsher, 2010)

Die Stadt, in der die Mine gelegen ist, heißt Baotou, hat 1,8 Millionen Einwohner und nennt sich selbst „Hauptstadt der Seltenen Erden“. Buckley (2010) berichtet, dass die Umgebung des Sees kontaminiert sei und dass dies Einfluss auf die Gesundheit der Anwohner habe. Des Weiteren wird von inakzeptablen Arbeitsbedingungen berichtet, die von den westlichen Maßnahmen zum Schutz der Arbeitnehmer weit entfernt sind.

Seltene Erden haben einen sehr weiten Anwendungsbereich, wie Tabelle 2 für die USA im Jahr 2011 zeigt.

**Tabelle 2: Verwendung von SE in den USA 2011 (USGS, 2012)**

<b>Verwendung von Seltenen Erden in den USA 2011</b>	
<b>Verwendungssegment</b>	<b>Anteil [%]</b>
Katalysatoren	47
Metallurgische Additive und Legierungen	24
Glaspoliermittel und Keramiken	15
Permanentmagneten	9
Leuchtmittel	5

Einige Beispiele für die, in Tabelle 2 angeführten Verwendungssegmente, sind (Naumov, 2008; Heinritzi, 2008):

- Ceroxid wird in Autoabgaskatalysatoren als Sauerstoffspeicherkomponente verwendet.
- Optische Spezialgläser (einschließlich Spiegel und Präzisionslinsen) werden mit Ceroxid bearbeitet.
- Mischmetall (50 % Cer, 30 % La, 15 % Nd, 5 % Pr) wird als Additiv in der Metallurgie oder auch als Legierungsbestandteil eingesetzt, z.B zur Entfernung von Sauerstoff und Schwefel in der Stahlindustrie.
- Seltene Erden (vor allem Yttrium, Europium, Gadolinium, Terbium und Cer) werden als Leuchtstoffe eingesetzt.
- Seltene Erden werden auch in Magneten und in Lasern eingesetzt.
- Lanthan und Neodym kommen in den Elektroden von Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren vor, die u.a. in Elektro- und Hybridautos verbaut sind (Angerer et al., 2009).

Da die Seltenen Erden innerhalb ihrer Anwendungen oft in geringen Konzentrationen und gestreut vorkommen, ist es schwierig, sie aus Sekundärrohstoffen zu gewinnen. Am weitesten verbreitet ist das Recycling von Permanentmagneten (USGS, 2012).

### 2.2.2 Neodym

Neodym ist ein chemisches Element der Seltenen Erden, steht in der Gruppe der Lanthanoide und hat die Ordnungszahl 60. Das Element, das im Fokus dieser Arbeit steht, wurde 1885 vom österreichischen Chemiker Carl Auer von Welsbach entdeckt und nach dem griechischen Wort für „neuer Zwilling“ benannt (Meyer, 2001). Neodym zählt zu den sogenannten leichten Seltenen Erden und besitzt die Elektronenkonfiguration  $[\text{Xe}] 4f^4 6s^2$ . Der Schmelzpunkt von Neodym liegt bei 1021 °C (Angerer et al., 2009).

Während das dreiwertige Ion des benachbarten Elements Praseodym grün ist, ist das des Neodyms amethystfarben. Diese optische Eigenschaften sind auf die unterschiedlichen Elektronenkonfigurationen in den f-Schalen zurückzuführen ( $4f^3$  und  $4f^4$ ) und werden, wie im Fall von Neodym, für die Verwendung als Lasermaterial wie Nd:YAG eingesetzt (Meyer, 2001).

Der Neodym-Anteil an der Gesamtheit an Seltenen Erden im, unter anderem in der chinesischen Seltene Erden Mine Baotou abgebauten, Mineral Bastnäsit liegt bei 15 % (Stosch, 2000). Allgemein betrachtet gehört Neodym zu den weniger seltenen Seltenen Erden, da es mit 38 ppm nach Cer am häufigsten in der Erdkruste vorkommt (Moss et al., 2011). 2010 wurden weltweit geschätzte 21.307 Tonnen Neodym-Oxid (ergibt 18.260 Tonnen metallisches Neodym) produziert, was 17 % des weltweiten Seltenen Erden Oxid Angebots entspricht (Moss et al., 2011).

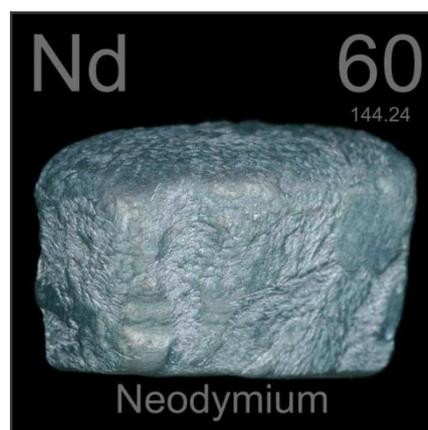


Abbildung 5: Metallisches Neodym mit Oxidschicht (Swiss Metal Assets, 2012).

Der Hauptanwendungsbereich von Neodym ist als starker Permanentmagnet NdFeB in einer Legierung mit Eisen und Bor. Neodym findet jedoch auch in anderen Einsatzgebieten Verwendung, wie z.B. in Batterien, als Katalysator oder in speziellen optischen Gläsern. Abbildung 6 zeigt die prozentuale Aufteilung der Verwendung von Neodym nach den jeweiligen Anwendungsbereichen.

Bereits im Jahr 2010 dominierte die Verarbeitung zu starken NdFeB Permanentmagneten mit 76%, gefolgt von 12% für NiMH-Batterien, in denen Neodym im so genannten Mischmetall vorkommt.

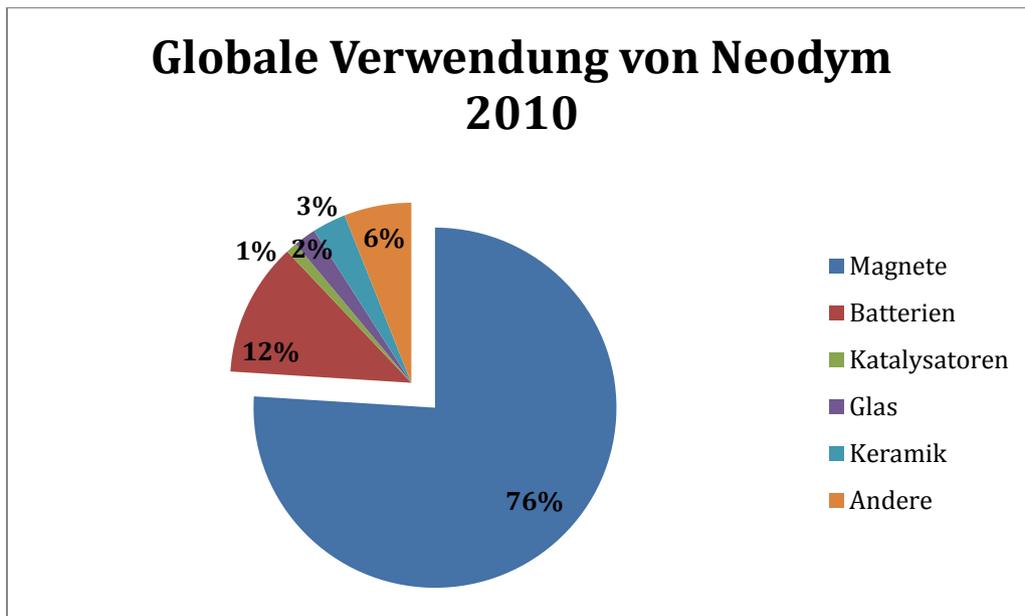


Abbildung 6: Weltweite Verwendung von Neodym im Jahr 2010 (Buchert et al., 2011).

Die Wachstumsraten der Nachfrage nach NdFeB Permanentmagneten sind höher als für andere Anwendungsbereiche der Seltenen Erden. Lag die Nachfrage nach diesen starken Magneten 2003 noch bei 5.500 Tonnen, stieg sie bis 2008 auf 10.400 Tonnen an. Dies entspricht einem jährlichen Wachstum von 13,6 % (Moss et al., 2011). 2015 sollen bereits 90 % des produzierten Neodyms für magnetische Anwendungen herangezogen werden (Moss et al., 2011). Die Preise für Neodym klettern tendenziell nach oben. Vor 10 Jahren kostete 1 kg Neodym-Metall 15 USD, im Jahr 2003 nur noch 6,4 USD. Der Preis schwankte 2010 noch zwischen 17 und 15 USD /kg und stieg dann rasant an: im Spätsommer 2011 wurde der Zenit erreicht und das mit 500 USD/kg Metall (Buchert et al., 2011). Grund für diesen, beinahe absurden, Preisanstieg war die bereits erwähnte, restriktive Rohstoffpolitik Chinas.

Nach dem Preismaximum von 500 USD konnte ein leichter Preisrückgang verzeichnet werden, Buchert et al. (2011) vermuten jedoch, dass das Preisniveau von Neodym hoch bleiben wird.

Abbildung 6 zeigte, dass die Produktion von starken Permanentmagneten der Hauptanwendungsbereich für das Element Neodym ist. Abbildung 7 zeigt nun die Anwendungen der Permanentmagneten: 31 % werden in Festplattenmotoren (hard disk drive, HDD) verbaut, 26 % in Elektromotoren, 24 % in Fahrzeugen, 6 % in akustischen Geräten (Beispiel: in-ear Kopfhörer), 5 % in optischen Geräten, 5 % in der Magnetresonanztomographie und 3% in anderen Anwendungen.

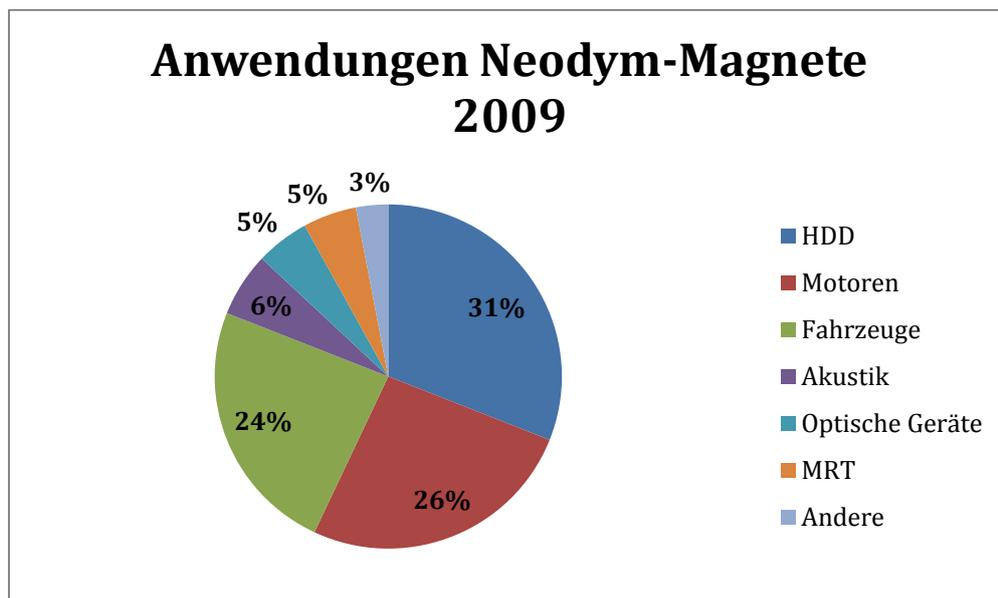


Abbildung 7: Anwendungen der NdFeB Magnete 2009 (Moss et al., 2011).

Lange Zeit wurde das Seltenerdelement Samarium zur Herstellung von Permanentmagneten verwendet, bis es 1984 von Neodym in der stärker magnetischen Verbindung NdFeB abgelöst wurde (Angerer et al., 2009). Bis 2030 erwarten Experten eine Versechsfachung der Nachfrage nach NdFeB Permanentmagneten (Angerer et al., 2009; Moss et al., 2011).

## 3. Material und Methoden

### 3.1 Abschätzung kritischer Rohstoffe für Österreich

#### 3.1.1 Abschätzung von kritischen Rohstoffen nach einer Methode der Ad-hoc Arbeitsgruppe der Europäischen Kommission (Europäische Kommission, 2010)

Die erste Methode, die zur Abschätzung von kritischen Rohstoffen in Österreich herangezogen wurde, basiert auf einem Report der Ad-hoc Arbeitsgruppe der Europäischen Kommission, der sich mit der Definition von kritischen Rohstoffen für die Europäische Union beschäftigt. Diese Studie setzt voraus, dass geologisch betrachtet eine ausreichende Menge an Rohstoffen vorhanden ist und dass geopolitisch – wirtschaftliche Faktoren den größeren Einfluss darauf nehmen, ob ein Rohstoff als kritisch angesehen werden kann oder nicht. Ein Rohstoff wird dann als kritisch bezeichnet, wenn das Risiko von Versorgungsengpässen und deren Einfluss auf die Wirtschaft größer sind als bei anderen Rohstoffen. Diese Methode wird im Rahmen dieser Arbeit herangezogen, um einen Vergleich der kritischen Rohstoffe für die Europäische Union und Österreich zu schaffen und betrachtet zwei Arten von Risiko-Parametern:

- **Das Versorgungs-Risiko** (supply risk): dieses beinhaltet die Stabilität der produzierenden Länder, die Anteile der produzierenden Länder am weltweit geförderten Rohstoff und die Möglichkeit das Material in seiner Anwendung auszutauschen oder zu recyceln.
- **Das Umweltpolitik-Risiko** (environmental country risk): dieses beinhaltet das Risiko, dass ein produzierendes Land Maßnahmen zum Umweltschutz tätigt und somit die weltweite Versorgung mit einem Rohstoff gefährdet.

Während das Versorgungs-Risiko oder das Umweltpolitik-Risiko auf die y-Achse aufgetragen werden, enthält die x-Achse die wirtschaftliche Bedeutung des Rohstoffs für das betrachtete System.

Abbildung 8 zeigt das von der Arbeitsgruppe erstellte Diagramm, in dem die Rohstoffe nach ihrer wirtschaftlichen Bedeutung für die Europäische Union und ihrem Versorgungsrisiko aufgetragen werden. Ab einer Wirtschaftlichen Bedeutung von 5 und einem Versorgungsrisiko von 1 werden die Rohstoffe hier als kritisch bezeichnet.

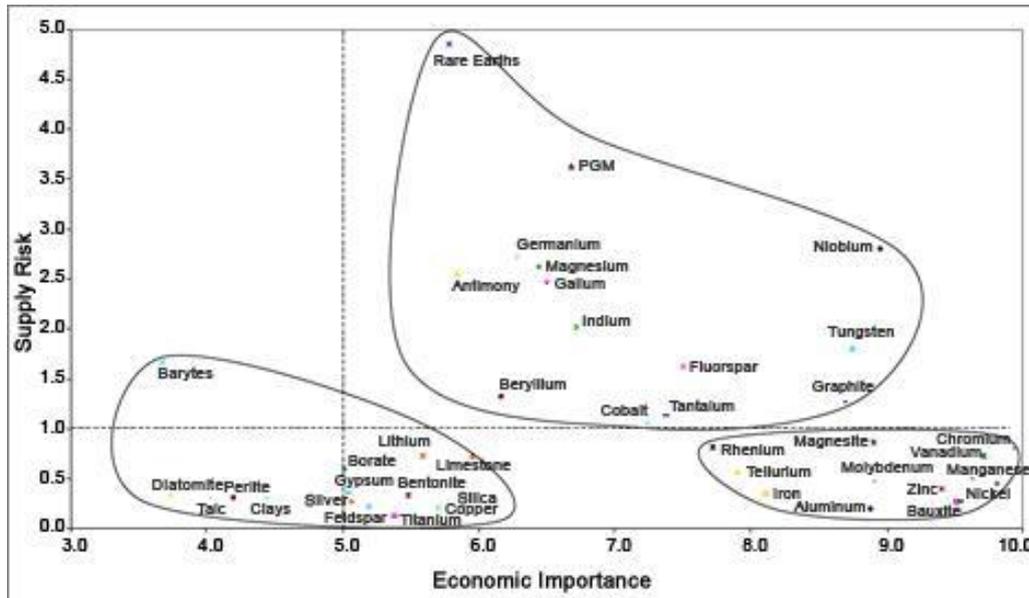


Abbildung 8: Darstellung des Versorgungs-Risikos ausgewählter Rohstoffe gegen die wirtschaftliche Bedeutung für die Europäische Union

Somit definiert die Europäische Union folgende Rohstoffe als kritisch (siehe Tabelle 3):

Tabelle 3: Auflistung kritischer Rohstoffe für die Europäische Union

Liste der kritischen Rohstoffe auf EU – Ebene (in alphabetischer Reihenfolge)	
Antimon	Indium
Beryllium	Magnesium
Kobalt	Niob
Fluorit	Platingruppenmetalle <sup>1</sup>
Gallium	Seltene Erden <sup>2</sup>
Germanium	Tantal
Graphit	Wolfram

<sup>1</sup> Platingruppenmetalle: Platin, Palladium, Iridium, Rhodium, Ruthenium und Osmium.

<sup>2</sup> Seltene Erden: Yttrium, Scandium und die sogenannten Lanthanoiden (Lanthan, Cer, Praseodym, Neodym, Promethium, Samarium, Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium und Lutetium)

Dieses nun kurz dargestellte Modell soll im Rahmen dieser Arbeit auf das System Österreich angewendet werden, weshalb die Methodik zur Bestimmung der Kritikalität von Rohstoffen nun etwas näher erläutert wird.

### *3.1.1.1 Ermittlung der Wirtschaftlichen Bedeutung*

Die wirtschaftliche Bedeutung eines Rohstoffs wird dadurch bestimmt, dass die Hauptanwendungsbereiche ermittelt, der Wertschöpfung der Wirtschaftssektoren, die dieses Material produzieren, zugeordnet, und deren Anteil am Bruttoinlandsprodukt berechnet werden. Bei dieser Methode werden Wertschöpfungsketten verwendet, die beschreiben sollen, wie sich Versorgungsengpässe auf die Wirtschaft auswirken. Die Wertschöpfungsketten werden „Mega-Sektoren“ genannt und bestehen aus wirtschaftlichen Bereichen, die voneinander abhängig sind. Ein Beispiel für einen „Mega-Sektor“ ist der Sektor „Metalle“, der aus den Bereichen „Elementare Metalle“, „Gefertigte Metalle“ und „Recycelte Metalle“ besteht und in der EU 11% der Produktions-Wertschöpfung darstellt. (Daten: Jahr 2006)

Formel 1 zeigt die Berechnung der wirtschaftlichen Bedeutung (Economic Importance EI) für einen Rohstoff S.  $A_{is}$  entspricht dem Anteil am Verbrauch des untersuchten Rohstoffs in einem „Mega-Sektor“ gewichtet nach der Wertschöpfung  $Q_s$  der von Rohstoff S abhängigen Sektoren. Die Summen aller nach der Wertschöpfung gewichteten Industriesektoren dividiert durch das Brutto-Inlandsprodukt BIP, ergibt die Wirtschaftliche Bedeutung eines Rohstoffs.

**Formel 1: Berechnung der wirtschaftlichen Bedeutung eines Rohstoffs**

$$EIs = \frac{1}{BIP} \sum_s Ais * Qs$$

### 3.1.1.2 Ermittlung des Versorgungs-Risikos

Die Ermittlung des Versorgungs-Risikos gliedert sich in mehrere Teile, die dann in einem Term zusammen geführt werden. Beeinflusst wird dieser Term von der politischen Stabilität der produzierenden Länder, der Konzentration an produzierenden Ländern und der Möglichkeit den Rohstoff in seiner Anwendung auszutauschen oder zu recyceln.

Die ersten beiden Faktoren, die politische Stabilität und die Konzentration der produzierenden Länder, finden sich im sogenannten Herfindahl-Hirschmann-Index HHI wieder.

#### Formel 2: Berechnung des Herfindahl-Hirschmann-Index HHI

$$HHI_{wgi} = \sum_c (S_{ic})^2 * WGI_c$$

Formel 2 zeigt wie der Herfindahl-Hirschmann-Index HHI bestimmt werden kann. HHI entspricht der Summe der Anteile  $S_{ic}$  der produzierenden Länder an der Gesamtproduktion multipliziert mit dem World Governance Indicator  $WGI_c$ , der von der Weltbank zur Verfügung gestellt wird und einem Indikator für die politische Stabilität eines Landes entspricht. ([http://info.worldbank.org/governance/wgi/sc\\_country.asp](http://info.worldbank.org/governance/wgi/sc_country.asp))

Die Werte für den WGI variieren von -2.5 bis + 2.5, wobei hohe Werte für ein stabiles politisches System stehen. In der Berechnung der Arbeitsgruppe der Europäischen Kommission werden die Werte für WGI von 0 bis 10 neu skaliert und in deren Bedeutung invertiert, sodass ein hoher Wert des WGI für eine geringe Stabilität in diesem Land spricht. Die Werte des HHI werden nach deren Berechnung ebenfalls auf 0 bis 10 skaliert.

Ein weiterer Faktor, der das Versorgungs-Risiko beeinflusst, ist die Möglichkeit einen Rohstoff durch einen anderen Rohstoff zu ersetzen, der eventuell nicht oder weniger kritisch ist. Die Ersetzbarkeit  $\sigma_i$  eines Rohstoffs setzt sich aus der Summe der Ersetzbarkeiten des Materials in den „Mega-Sektoren“ gewichtet nach  $A_{is}$ , dem Anteil am Verbrauch des Rohstoffes in einem Sektor zusammen. (Siehe Gleichung xy).

$\sigma_i$  kann folgende Werte annehmen: 0.0 leicht zu ersetzen ohne zusätzliche Kosten, 0.3 ersetzbar mit niedrigen Kosten, 0.7 ersetzbar mit hohen Kosten oder Leistungsminderung und 1.0 nicht ersetzbar.

#### Formel 3: Berechnung die Ersetzbarkeit eines Rohstoffs in einer Anwendung

$$\sigma_i = \sum_s A_{is} * \sigma_{is}$$

Der Faktor Recycling fließt als Recycling Rate  $\rho_i$  ein und entspricht dem Verhältnis von recyceltem Schrott zum Verbrauch an Rohstoff.

Diese drei Parameter werden nun zusammen geführt und bilden das Versorgungs-Risiko (supply risk)  $SR_i$  (siehe Formel 4)

**Formel 4: Berechnung des Versorgungs-Risikos**

$$SR_i = \sigma_i * (1 - \rho) * HHI_{wgi}$$

Formel 4 verdeutlicht, dass das Versorgungs-Risiko groß ist, wenn die produzierenden Länder politisch instabil sind und einen hohen Anteil an der weltweiten Produktion eines Rohstoffes liefern und sowohl Ersetzbarkeit als auch Recycling Rate gering sind.

### 3.1.1.3 Ermittlung des Umweltpolitik-Risikos

Um das umweltpolitische Risiko abzuschätzen, wird ein Environmental Country Index (EM<sub>i</sub>) berechnet, der die Risiken darstellen soll, die aus umweltpolitischen Gründen entstehen können. Dieser Index wird ähnlich wie das Versorgungs-Risiko berechnet, nur dass anstatt des HHI der sogenannte Environmental Performance Index  $HHI_{EPI}$  eingesetzt wird.

**Formel 5: Berechnung des Environmental Country Index Emi**

$$EM_i = \sigma_i * (1 - \rho) * HHI_{epi}$$

Formel 5 zeigt wie sich der Environmental Country Index  $EM_i$  berechnen lässt.  $HHI_{epi}$  wird analog zu  $HHI_{WBI}$  berechnet (siehe Formel 6). Die Werte für EPI des jeweiligen Landes sind unter <http://epi.yale.edu> zu finden.

**Formel 6: Berechnung von  $HHI_{epi}$**

$$HHI_{epi} = \sum_c (Sic)^2 * EPI_c$$

Die Abschätzung von kritischen Rohstoffen wurde für die Seltenerdmetalle, Palladium, Platin, Rhodium, Wolfram, Antimon, Kobalt, Fluorit, Gallium, Germanium, Graphit, Indium, Magnesium, Tantal und Niob durchgeführt.

### 3.1.2 Abschätzung von kritischen Rohstoffen nach einer Methode von T.E. Graedel und Kollegen (Yale University)

Das von T.E. Graedel und Kollegen (Graedel et al., 2011) erarbeitete Konzept zur Bestimmung von kritischen Rohstoffen in einem System (Unternehmen, Staat, Welt) ist eine Erweiterung einer Methode des National Research Council (NRC), in welcher die Rohstoffe nach Wichtigkeit (importance of uses) und Verfügbarkeit (availability) gegliedert werden (NRC, 2008).

Die in diesem Kapitel vorgestellte Methode stellt eine Erweiterung dar und enthält drei Dimensionen bzw. Parameter, die zur Bestimmung der kritischen Rohstoffe dienen: Das Versorgungs-Risiko (supply risk, SR), die Auswirkungen auf die Umwelt (environmental implications, EI) und die Verwundbarkeit in Bezug auf Versorgungs-Beschränkungen (vulnerability to supply restrictions, VSR). In dieser Methode werden SR und EI allgemein für den jeweiligen Rohstoff bestimmt, VSR wird dann je nach System berechnet, entweder auf globaler bzw. nationaler Ebene oder auf Unternehmensebene. In der weiteren Berechnung wird VSR im Falle dieser Arbeit für die nationale Ebene bestimmt.

#### 3.1.2.1 Ermittlung des Versorgungs-Risikos „SR“

Das Versorgungs-Risiko SR besteht aus drei verschiedenen Komponenten: einer geologischen, technologischen und wirtschaftlichen Komponente, einer sozialen und regulativen Komponente und einer geopolitischen Komponente.

Die geologische, technologische und wirtschaftliche Komponente spiegelt sich in der sogenannten „depletion time DT“ wider, die der Zeit entspricht bis die weltweiten Rohstoffreserven des betrachteten Rohstoffes verbraucht sind. Die erhaltenen Werte werden transformiert, um Werte zwischen 0 und 100 zu erhalten, wobei eine kurze „Depletion Time“ für ein hohes Versorgungs-Risiko steht.

Die soziale und regulative Komponente besteht ihrerseits wieder aus zwei Unterkomponenten: dem Policy Potential Index (PPI) und dem Human Development Index (HDI). PPI bewertet eine große Anzahl an Faktoren, u.a Administration und Regulationen, Umweltauflagen, Besteuerung, Infrastruktur, politische Stabilität, Sicherheit und viele mehr.

HDI ist ein Indikator für die Leistungen eines Landes in den Bereichen Gesundheit, Bildung und Lebensstandard unter der Annahme, dass Länder, die hochentwickelt sind, die Lebensqualität der Bewohner über die Entwicklung der Industrie stellen.

Die geopolitische Komponente enthält einerseits den World Governance Indicator – Political Stability & Absence of Violence/Terrorism (WGI-PV), der die Stabilität eines produzierenden Landes wiedergibt und andererseits die Global Supply Concentration (GSC), die die Anzahl an produzierenden Ländern gewichtet nach ihrem Anteil an der Metallproduktion widerspiegelt.

Die berechneten Komponenten werden entsprechend gewichtet und ergeben somit das Versorgungs-Risiko SR eines Rohstoffes i.

### 3.1.2.2 Ermittlung der Auswirkungen auf die Umwelt „EI“

Die Auswirkungen auf die Umwelt werden nach der „ReCiPe Endpoint method“ (Goedkoop et al., 2009) berechnet. Die notwendigen Daten können aus der *ecoinvent* Datenbank bezogen werden.

### 3.1.2.3 Ermittlung der Verwundbarkeit „VSR“

Im Rahmen dieser Arbeit wird VSR auf nationaler Ebene bestimmt. (siehe Formel 7)

#### Formel 7: Ermittlung der nationalen Verwundbarkeit

$$VSR\ national = \sum_i \varphi_i * \frac{NE + PPU}{2} \frac{SPi + SAi + IRRi + ERi}{4} \frac{GII + IRi}{2}$$

$\Phi_i$  ist der Anteil der Endanwendung am gesamten Rohstoffverbrauch, NE ist die nationale, wirtschaftliche Bedeutung der Anwendung, PPU der Prozentsatz der Bevölkerung, die diese Anwendung verwendet, SPi die Austausch-Möglichkeit des Rohstoffes, SAi die Verfügbarkeit des Substituts, IRRi der Anteil an der Netto-Import-Abhängigkeit, ERi die Umweltbelastung, GII der Global Innovation Index und IRi die Netto-Import-Abhängigkeit für einen Rohstoff i. Die jeweiligen Faktoren werden je nach Anzahl zu gleichen Teilen gewichtet und ergeben schlussendlich die nationale Verwundbarkeit in Bezug auf Versorgungs-Beschränkungen.

Die drei Parameter SR, EI und VSR können nun für jeden gewünschten Rohstoff berechnet und grafisch dargestellt werden. Da es für manche Institutionen sinnvoll sein kann einen Wert festzulegen, der angibt, ob ein Rohstoff kritisch ist oder nicht, wird von Graedel et al. auch die „Overall Criticality C“ eingeführt (siehe Formel 8).

**Formel 8: Ermittlung der „Overall Criticality C“**

$$C = \frac{\sqrt{SR^2 + EI^2 + VSR^2}}{\sqrt{3}}$$

## 3.2 Stoffflussanalyse

### 3.2.1 Einleitung (Brunner; Rechberger, 2004)

*„panta rhei – Alles fließt „ - nach dem Philosophen Heraklit*

Die Stoffflussanalyse, kurz SFA, ist der Versuch in einem System, das zeitlich und räumlich begrenzt ist, alle Flüsse und Lager eines Stoffes darzustellen. Die SFA gehorcht dem Gesetz der Massenerhaltung und wird auf ihre Richtigkeit hin überprüft indem alle Einträge, Austräge und Lager des Systems gegenüber gestellt werden. Stoffflussanalysen haben, bedingt durch ihr einfaches Prinzip, einen weiten Anwendungsbereich vom Ressourcenmanagement bis zur Abfallwirtschaft.

Die Geschichte des Ursprungs der SFA, dem Gesetz der Massenerhaltung, reicht bis in die griechische Antike zurück, wo griechische Philosophen dieses bereits postulierten. Der bekannte französische Chemiker Antoine Lavoisier (1743-1794) erbrachte viele Jahrhunderte später den Beweis, dass die Massen in einem chemischen Versuch nicht verändert werden können, sie sind konstant. Dazu tätigte er folgenden Ausspruch:

*„Nichts wird bei den Operationen künstlicher oder natürlicher Art geschaffen, und es kann als Axiom angesehen werden, dass bei jeder Operation eine gleiche Quantität Materie vor und nach der Operation existiert.“ (Vidal, 1998)*

Bei der Erstellung von chemischen Reaktionsgleichungen ist die Massenbilanz bis heute eine übliche Kontrollmöglichkeit für die korrekte Verfassung der Gleichung.

Im 17. Jahrhundert versuchte Santorio Santorio (1561-1636) die Stoffflüsse im menschlichen Körper zu analysieren (Major, 1938). Santorio war einerseits Arzt in Padua und lehrte andererseits an der Universität in Venedig. Sein Forschungsinteresse bestand darin den Metabolismus des menschlichen Körpers zu verstehen. Für diesen Zweck entwickelte er eine Methode, die es ihm ermöglichen sollte Inputs und Outputs eines Menschen zu bestimmen. Das Ergebnis seiner aufwendigen Experimente war ernüchternd: er konnte keine Massenbilanz herstellen. Die Ursache für die unausgeglichene Massenbilanz war, dass Santorio zwar die Inputs (Wasser, Nahrung) gegen die Outputs (Exkrememente, Schweiß) stellte, jedoch nicht in Erwägung zog, dass auch die Atemluft des Menschen eine Masse hat und hier berücksichtigt werden müsste. Hier ist zu erwähnen, dass erst Lavoisier (1743-1794) die

Existenz von Sauerstoff beweisen konnte, der zu Lebzeiten von Santorio im 16. Jahrhundert noch völlig unbekannt war.

Obwohl Santorios Studien schon lange Zeit zurückliegen, so haben sie dennoch aktuelle Bedeutung: auch heute ist es schwierig eine ausgeglichene Massenbilanz eines Systems zu erhalten, wenn die genauen Flüsse der Inputs und Outputs nicht bekannt sind.

Wie bereits weiter oben erwähnt, wird die SFA in vielen Bereichen eingesetzt. Da diese Methode im Fall dieser Diplomarbeit zur Erstellung eines Stoffhaushalts für Neodym herangezogen wird, ist hier noch etwas näher darauf einzugehen, wozu Stoffflussanalysen im Ressourcenmanagement verwendet werden können. Zu Beginn ist es wichtig abzugrenzen, was der Begriff bedeutet und mit welchen Aufgaben sich dieser Forschungsbereich beschäftigt.

Hierzu findet sich folgende Erklärung: Das Ressourcenmanagement versucht anthropogene Systeme zur Erhaltung und Förderung der Lebensqualität zu analysieren, zu bewerten und zu gestalten (Rechberger, 2005). Ressourcen lassen sich in zwei Gruppen unterteilen: natürliche Ressourcen wie Mineralien und Wasser und anthropogene Ressourcen wie sie sich u.a in privaten Haushalten befinden. Viele der natürlichen Ressourcen werden in anthropogene Ressourcen verwandelt, weshalb es für das zukünftige Ressourcenmanagement von Bedeutung sein wird über diese anthropogenen Lager, wie sie z.B in den Haushalten existieren, Bescheid zu wissen. Die SFA hilft die Ansammlung eines Stoffes zu erkennen und zu quantifizieren, den Mangel eines Stoffes vorherzusagen und Recyclingmöglichkeiten für anthropogene Ressourcen aufzuzeigen (Stichwort: urban mining). Dies unterstreicht auch, dass das Ressourcenmanagement immer auch mit der Abfallwirtschaft verknüpft ist, die mögliche Recyclingstrategien entwickeln kann, um potentielle Lager anthropogener Ressourcen auch wirtschaftlich nützen zu können.

Wie in jeder Methodik, werden auch in der Stoffflussanalyse Begriffe verwendet, deren Bedeutungen festgelegt werden müssen. Aus diesem Grund folgen hier einige Definitionen, die im Laufe der Arbeit weiter verwendet werden.

In der Stoffflussanalyse wird der Begriff **Material** sowohl für einen Stoff als auch für ein Gut verwendet.

Als **Stoffe** werden alle (chemischen) Elemente oder Komponenten bezeichnet, die von einheitlicher Zusammensetzung und homogen sind.

Der Begriff **Gut** steht für Handelsartikel und Waren, kommt meist im Plural als „Güter“ vor und besteht aus einem oder mehreren Stoffe. Ein in der Literatur gefundenes Beispiel, das den Unterschied zwischen diesen beiden Begriffen gut erläutert, ist folgendes: Was ist Holz? Ein Stoff

oder ein Gut? Holz besteht aus vielen verschiedenen chemischen Verbindungen wie Cellulose, Wasserstoff, Sauerstoff, usw. Somit ist Holz ein Gut und kein Stoff.

Ein **Prozess** beschreibt die Verwandlung, den Transport oder die Lagerung eines Materials. Was innerhalb eines Prozesses genau passiert, wird üblicherweise nicht beachtet, nur die Inputs und Outputs sind von Relevanz. Ist dies nicht der Fall, werden sogenannte **Subprozesse** definiert. Ein Beispiel für einen Lager-Prozess sind Elektrogeräte in privaten Haushalten.

Ein **Fluss** wird definiert als Massenflussrate und entspricht der Masse, die pro Zeiteinheit fließt, z.B. Tonnen/Jahr.

Das **System**, dessen Flüsse und Lager in der SFA dargestellt werden, gibt dem Modell eine räumliche und zeitliche Grenze. Ein System wird definiert über das Vorhandensein von verschiedenen Elementen (z.B. Prozessen), die miteinander wechselwirken (z.B. durch Flüsse zwischen den Prozessen innerhalb des Systems, aus dem System hinaus und in das System hinein). Ein Beispiel für ein System ist die Betrachtung des Neodym-Stoffhaushalts in Österreich im Jahr 2011. Hier ist die räumliche Grenze die Staatsgrenze von Österreich und der zeitliche Rahmen das Kalenderjahr 2011.

### 3.2.2 STAN

Die kostenlose Software STAN© (kurz für **ST**offfluss**AN**alyse) ermöglicht die Durchführung von Güter- und Stoffflussanalysen gemäß ÖNORM S 2096. Mit Hilfe dieses Programms sollen die, im ersten Schritt abgeschätzten, Flüsse präzisiert und entsprechend der angegebenen Unsicherheiten angepasst werden. Doch STAN ermöglicht nicht nur die Modellierung der eingegebenen Daten, es stellt die Ergebnisse der Stoffflussanalyse auch grafisch in Form eines Sankey-Diagramms dar.

STAN geht von der Annahme aus, dass die gelieferten, unsicheren Daten normalverteilt sind und durch Mittelwert und Standardabweichung beschrieben werden. Wenn mehr Daten im System gegeben sind, als für die Berechnung von eventuellen Unbekannten notwendig sind, führt das Programm eine Ausgleichsrechnung durch. Hierbei werden die mit Unsicherheiten versehenen Werte soweit verändert, dass die Unsicherheiten möglichst klein und eventuelle Widersprüche beseitigt werden. Der Datenausgleichsrechnung liegt die Methode der kleinsten Fehlerquadrate zu Grunde, die es auch ermöglicht unbekannte Größen und deren Unsicherheitsbereiche zu bestimmen.

Die Software STAN bietet an die Stoffflussanalyse auf verschiedenen Ebenen durchzuführen: auf der Güterebene (beispielsweise Neodym-Eisen-Bor Magnete in verschiedenen Anwendungen) oder auf der Stoffebene (in diesem Fall Neodym).

### 3.2.3 Unsicherheiten

Da die in der Stoffflussanalyse verwendeten Daten empirisch ermittelt wurden, ist es von großer Bedeutung auch den Unsicherheiten, mit denen jene behaftet sind, Beachtung zu schenken. Im Rahmen dieser Arbeit werden einzelnen Datenwerten Unsicherheitsklassen zugeordnet.

Die im Rahmen einer Literaturrecherche ermittelten Daten werden drei Kategorien zugeteilt: „sichere Datenlage“, „mittlere Datenlage“ und „unsichere Datenlage“. Der recherchierte Wert wird als Mittelwert angenommen. Jedem Wert wird ein Schwankungsbereich zugeordnet, der wiederum dem 95 % Vertrauensintervall der Gaußschen Glockenkurve entspricht, der zur Berechnung der Standardabweichung dient. Beispiele für Daten mit geringer Unsicherheit sind statistische Informationen (z.B. Statistik Austria), gemessene Werte und Daten aus wissenschaftlichen Berichten. Die Mittlere Unsicherheit wird den eigenhändig ermittelten Schätzungen zugeordnet oder Werten, die in nur einem Bericht aufzufinden und größenordnungsmäßig nicht einschätzbar sind. Hohe Datenunsicherheit wird in dieser Arbeit Quellen zugeordnet, deren Angaben nicht in die Größenordnung der übrigen Quellen passen und als Ausreißer zu werten sind.

Tabelle 4 zeigt die für diese Arbeit verwendeten Schwankungsbereiche nach Kategorien mit dazugehöriger Berechnung der Standardabweichung.

**Tabelle 4: Schwankungsbereiche nach Kategorien und dazugehörige Berechnung der Standardabweichung**

<b>Kategorie</b>	<b>95 % Vertrauensintervall</b>	<b>Standardabweichung</b>
Geringe Datenunsicherheit	+/- 25 % von X	$\sigma = X * 1/8$
Mittlere Datenunsicherheit	+/- 50 % von X	$\sigma = X * 1/4$
Hohe Datenunsicherheit	+/- 90 % von X	$\sigma = X * 9/20$

### 3.2.4 Stoffflussanalyse für Neodym

Zu Beginn dieser Analyse ist es essentiell die Grenzen des Systems genau zu definieren. Die räumliche Grenze des Systems ist die österreichische Staatsgrenze, da alle Neodym-Flüsse innerhalb Österreichs betrachtet werden sollen. Alle Stoffflüsse, die von außen in das System hinein fließen, sind somit Importe, alle Flüsse aus dem System heraus Exporte.

Die zeitliche Grenze des Systems ist das Kalenderjahr 2011. Somit sollen alle Stoffflüsse und Lagerveränderungen von 1.1.2011 bis zum 31.12.2011 betrachtet werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist es die Flüsse und Lager für Neodym im System Österreich zu identifizieren und durch anschließende Recherche auch zu quantifizieren. Als Informationsquellen dienen an dieser Stelle vor allem wissenschaftliche Berichte aus dem Internet und Anfragen bei verschiedenen Unternehmen und Institutionen.

Das System Neodym-Haushalt für Österreich im Jahr 2011 besteht aus folgenden fünf Prozessen: *Windkraft, Medizin und Forschung, Private Haushalte, Verarbeitende Industrie und Abfallwirtschaft*. Die Prozesse „Verarbeitende Industrie“, „Private Haushalte“ und „Abfallwirtschaft“ werden durch Subprozesse näher beschrieben, die verbleibenden Prozesse werden, wie üblich, als „black boxes“ behandelt.

Abbildung 9 zeigt das qualitative Stoffflusssystem für Neodym in Österreich, inklusive der bereits erwähnten Prozesse, die durch Flüsse miteinander verbunden sind.

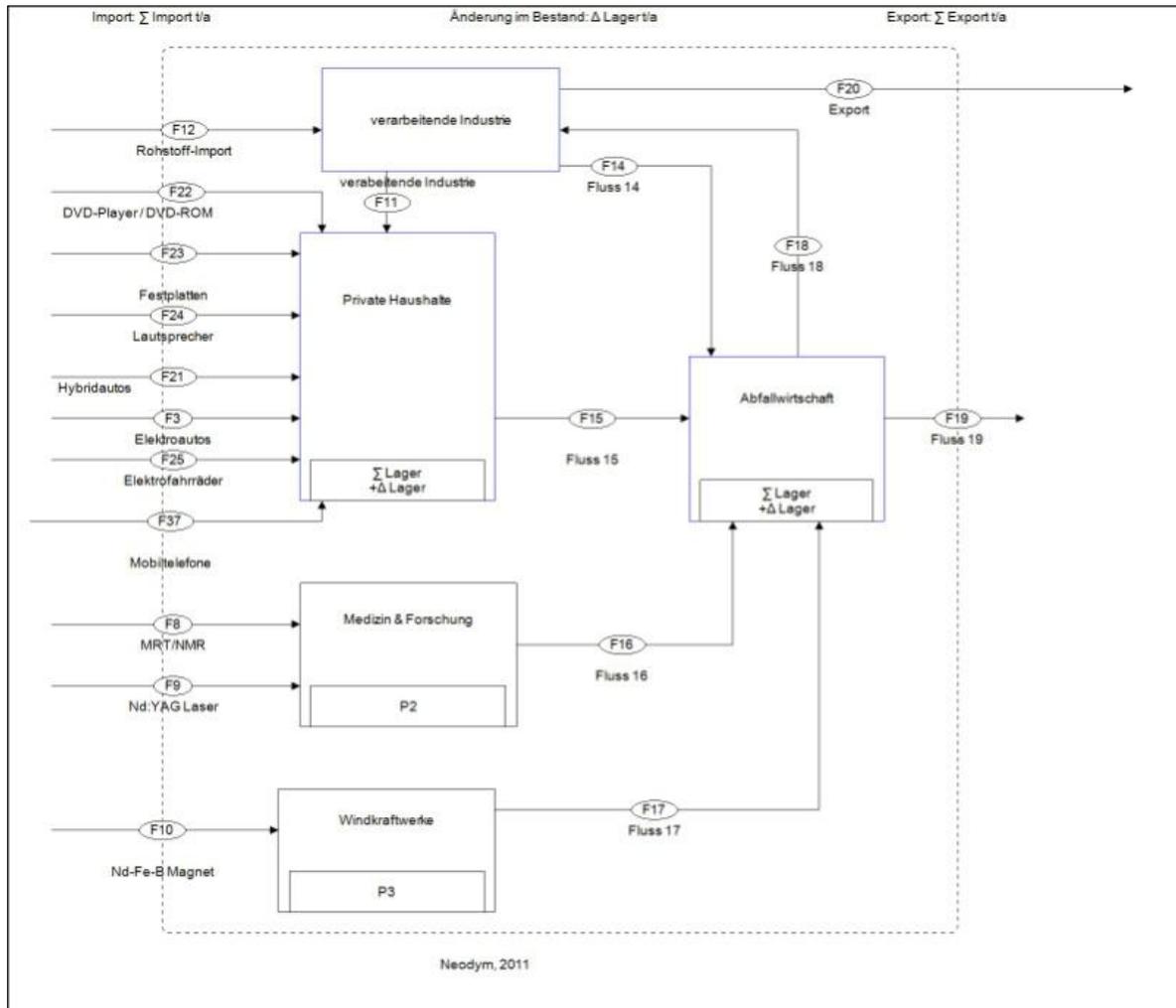


Abbildung 9: Qualitatives Stoffflusssystem für Neodym in Österreich im Jahr 2011.

Aufgrund der unsicheren Datenlage wird im Falle dieser Arbeit ein „bottom up approach“ gewählt. Das heißt, dass die Güter in denen Neodym Verwendung findet, ermittelt und diese dann Prozessen zugeordnet werden. Die festgelegten Prozesse werden durch Flüsse miteinander verbunden. Im Anschluss wird versucht, sowohl die Flüsse als auch die Lager innerhalb der Prozesse zu quantifizieren und das anfangs approximative System zu verbessern und zu präzisieren.

Bei den ermittelten Neodym-Flüssen im System Österreich 2011 handelt es sich um folgende Anwendungen: Permanentmagneten in Windkraftanlagen, Smartphones, Festplatten, Lautsprechern,

DVD Playern, MRTs und Elektromotoren; Dotierungsmittel in Nd:YAG Lasermaterial, Katalysator in der Industrie und Bestandteil von speziellen Gläsern.

Da laut Buchert et al. (2011) bereits 2010 76 % des verfügbaren Neodyms zur Herstellung von Permanentmagneten verwendet wurde, ist es nicht verwunderlich, dass Neodym in vielen der Flüsse in Form der magnetischen Legierung NdFeB auftritt.

Im folgenden Teil der Arbeit soll auf jene Produkte, die in diesem Stoffflusssystem auftreten, näher eingegangen werden. Begonnen wird mit allgemeinen Informationen zum Hochleistungs-Permanentmagneten NdFeB, da diese den weitesten Anwendungsbereich haben und somit hier auch grundlegend diskutiert werden sollen.

- **Hochleistungs-Permanentmagnete Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B**

Ein Permanentmagnet ist ein Material, das dauerhaft magnetisiert ist und im Laufe der Zeit nur unwesentlich entmagnetisiert wird. Dieser Typ Magnet kann bis zum 2000-fachen seines Gewichts heben (Angerer et al., 2009). Abbildung 10 zeigt eine sogenannte Hysterese-Kurve magnetischer Materialien. Durch Anlegen eines äußeren Magnetfelds H, wird ein magnetischer Fluss B in diesem Material induziert, der bei Entfernung des äußeren Magnetfelds wieder gegen null gehen würde. Ist das magnetische Material jedoch ein Permanentmagnet, so bleibt B auch bei H=0 erhalten. Der Wert, den B hier bei H=0 annimmt, nennt sich *Remanenz* und liefert Information darüber, wie stark die Leistung eines Permanentmagneten ist.

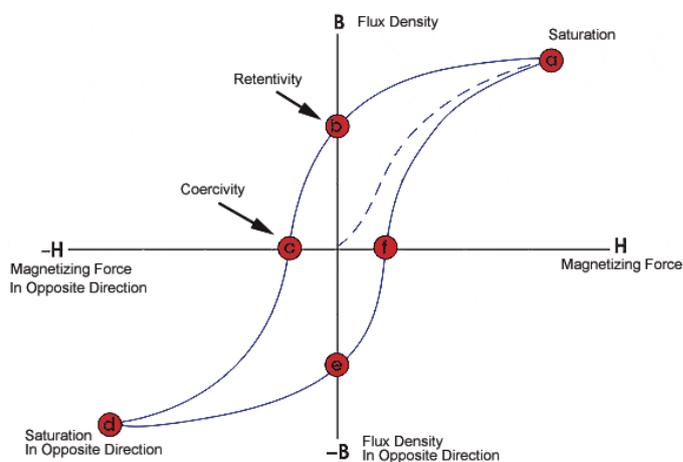


Abbildung 10: Hysterese-Kurve eines permanent magnetisierten Stoffes (NDT Resource Centre, 2012).

Materialien, die sich zur Verwendung als Permanentmagneten eignen, gibt es einige: Hartferriten, Seltene Erden Magneten (NdFeB oder SmCo) oder Aluminium-Nickel-Cobalt (Alnico) – Legierungen. Der stärkste, der hier genannten Magnete, ist der Neodym-Eisen-Bor Permanentmagnet (Angerer et al., 2009).

Typischerweise besitzen NdFeB Magnete bei Raumtemperatur eine Remanenz von 1,1 bis 1,3 Tesla und eine Energiedichte von 250-300 kJ/m<sup>3</sup> (Haring et al., 2003). Rodewald et al. (2002) sprechen sogar von Energiedichten bis 420 kJ/m<sup>3</sup>.

Neodym-Eisen-Bor Permanentmagnete sind zwar stärker als Samarium-Cobalt Magnete, jedoch ist die Curie-Temperatur niedriger, weshalb sie weniger temperaturbeständig sind. Des Weiteren sind sie bedingt durch das stark negative elektrochemische Standardpotential der Seltenen Erden von E= -2,2 bis -2,5 V sehr korrosionsanfällig (Rodewald et al., 2002). Um die Temperaturbeständigkeit zu

verbessern, wird Neodym teilweise durch Dysprosium ersetzt, wodurch die Dauereinsatztemperatur zwischen 100 und 200 °C liegen kann (Rodewald et al., 2002). Die Korrosionsbeständigkeit kann einerseits durch Beimengung von Kobalt und Kupfer (edle Metalle – positives Standardpotential!) verbessert werden oder durch Beschichtung der Magnete mit galvanischen Überzügen (Chrom, Zinn oder Nickel), Elektro-Tauchlackierungen oder Aluminiumsprühlackierungen (Rodewald et al., 2002). Unabhängig von der Beimengungen zur Verbesserung der Temperatur- und Korrosionsbeständigkeit bestehen Neodym-Magnete aus folgenden Molmassenanteilen: Neodym 26,7 %, Bor 1% und Eisen 72,3 % (Angerer et al., 2009).

Abbildung 11 zeigt die zeitliche Entwicklung der Permanentmagneten vom Jahr 1910 bis 2000, aufgetragen gegen die Energiedichte. Des Weiteren sollen die zylinderförmigen Magneten die verschiedenen Größen der magnetischen Werkstoffe bei gleicher Energiedichte darstellen. Dies veranschaulicht sehr deutlich, warum Neodym-Eisen-Bor Magnete für Miniaturanwendungen (Smartphones, in-ear Kopfhörer, etc.) unverzichtbar sind.

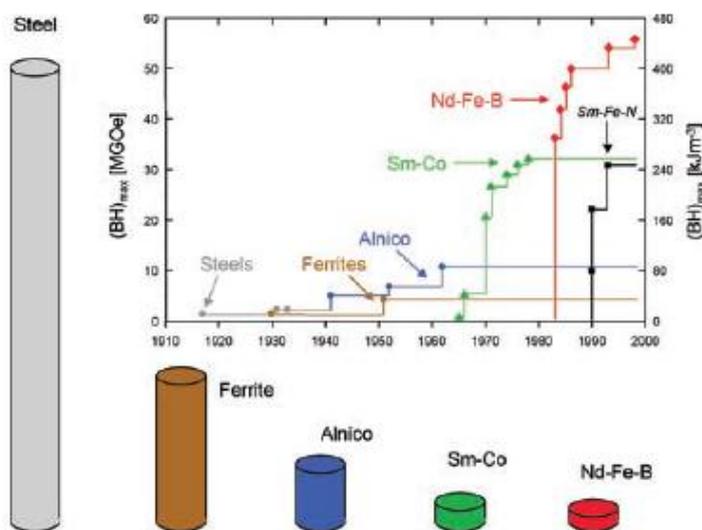


Abbildung 11: Zeitliche Entwicklung der Permanentmagnete gegen die Energiedichte (Gutfleisch et al., 2011).

Während 97 % der Seltenen Erden in der Volksrepublik China produziert werden, sind es bei den Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten etwas weniger, wobei China dennoch unangefochtener Weltmarktführer ist. 75-80 % der NdFeB Magnete werden in China, 17-25 % in Japan und 3-5 % in Europa hergestellt (Öko-Institut, 2011).

Beispiele für Unternehmen, die in Europa Magnete aus Seltenen Erden herstellen sind die Firmen *Walker Europe* in den Niederlanden, *Magnet Applications* in Großbritannien und *Vacuumschmelze* in Deutschland (Öko-Institut, 2011).

Für die zu erstellende Stoffflussanalyse ist es von großer Bedeutung, dass die Molmassenkonzentration von Neodym im Permanentmagneten bekannt ist. Tabelle 5 zeigt die der Literatur entnommenen Molmassenkonzentrationen für Neodym, Dysprosium, Eisen und Bor.

Tabelle 5: Molmassenkonzentration NdFeB Permanentmagnete (inkl. Quellenangabe).

Quelle	Nd	Dy	Fe	B
Gutfleisch et al. 2011	21,77 wt%	9,81 wt%	67,44 wt%	0,98 wt%
Angerer et al. 2009	26,7 wt%	-	72,3 wt%	1 wt%
Öko-Institut 2011	30 wt% <sup>3</sup>	3 wt%	-	-
nach Moss et al. 2011				
Shin Etsu	29 wt%	3 wt%	66 wt%	1 wt%
Great Western Mineral Group	31 wt%		68 wt%	1 wt%
Technology Metals Research	28 wt%	2 wt%	69 wt%	1 wt%
Avalon Rare Metals	30 wt%	-	-	-

Du und Graedel (2011b) schätzen die weltweiten Lager an Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten, die sich in diversen Produkten in Verwendung befinden, auf 97.000 Tonnen.

### 3.2.4.1 Prozess 1 – Windkraft

Der erste Prozess im System „Neodym Österreich 2011“ ist die Windkraft. Neodym wird in Form von Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten in einigen Windkraftanlagen verbaut, weshalb der Windkraft in dieser Arbeit ein eigener Prozess zugeordnet wird.

Allgemein ist die Gewinnung von Strom aus erneuerbarer Energie und mit ihr auch die Windkraft auf dem Vormarsch. Im Jahr 2011 lag der Anteil der Windenergie am elektrischen Endenergieverbrauch bei 3,6 %, 2012 wird er bereits bei 4,9 % liegen (IG Windkraft, 2011). Betrachtet man den Anteil der Windkraft an der Ökostromerzeugung im Jahr 2010, so liegt dieser bei 34,2 %. Der Anteil der Wasserkraft an der Ökostromerzeugung liegt im selben Jahr, zum Vergleich, bei 21,3 % (IG Windkraft, 2011).

<sup>3</sup> Neodym/Praseodym Gemisch, von Öko Institut 2011 angenommen

D'Souza et al. (2011) geben an, dass die Windturbinenindustrie seit 1979 existiert. Ebenso ist die Geschichte der Windkraft als Energiequelle in Österreich eine relativ kurze. Im Jahr 1994 belief sich die installierte Leistung noch auf 0,26 MW. Bis ins Jahr 1999 war der jährliche Ausbau der Windkraft moderat, mit 1-13 MW/ Jahr. Erst ab dem Jahr 2000 nahm der jährliche Ausbau zu und die installierte Leistung entwickelte sich von 415 MW im Jahr 2003 zu 1084 MW im Jahr 2011 (IG Windkraft, 2011). Die Einsatzdauer einer Windkraftanlage wird auf 20 Jahre geschätzt (Schittl, 2012; Du; Graedel, 2011b). Da in Österreich keine Neodym-Eisen-Bor Magneten produziert werden, handelt es sich bei dem folgend näher erläuterten Fluss „Permanentmagneten in getriebelosen Windkraftanlagen“ um einen „Import“ in das betrachtete System hinein.

- **Permanentmagneten in getriebelosen Windkraftanlagen**

Eine klassische Windkraftanlage besteht aus drei Teilen (Murphy&Spitz Research, 2011):

- 1.) **Rotor**
- 2.) **Getriebe und**
- 3.) **Generator**

Im Falle der Windkraftanlagen WKA mit Direktantrieb fällt das Getriebe weg, diese bestehen folglich nur aus Rotor und Generator. WKAs mit Direktantrieb werden entweder mit kupferhaltigen Elektromagneten oder starken Permanentmagneten betrieben (Murphy&Spitz Research, 2011). Einige Vorteile der Windkraftanlagen mit Direktantrieb sind, dass sie wartungsfrei bzw. wartungsarm sind und dass die Betriebskosten, bedingt durch die Einsparung des Schmieröls für das Getriebe, niedriger sind (Nicole Weinhold, 2010). Öko-Institut (2011) schätzt, dass 14 % der neu installierten Windkraftanlagen mit Neodym-Permanentmagneten versehen sind. Um abschätzen zu können, wie viele Permanentmagnete in Österreich in Windkraftanlagen eingesetzt werden, wurden mehrere Ansätze gewählt. Ausgehend von Informationen von der Homepage der Interessensvertretung „IG Windkraft“, wurden die Hersteller der in Österreich installierten Windkraftanlagen mittels Fragebogen (siehe Anhang) zur Verwendung von Permanentmagneten in ihren Produkten befragt. Da diese Befragung nicht alle notwendigen Informationen lieferte, wurde zusätzlich versucht durch Recherche auf den Internetauftritten der Unternehmen Informationen zu finden und dadurch auf die Verwendung von Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten schließen zu können.

An dieser Stelle ist es zweckdienlich kurz auf den Windkraftsektor in Österreich einzugehen. Laut IG Windkraft (2011) lag der Anteil der Windenergie am Energieverbrauch bei 3,6 % und die Prognose für 2012 bei 4,9 %. Insgesamt lag die installierte Leistung Ende 2011 bei 1084 MW, wobei davon 73 MW im Jahr 2011 errichtet wurden (IG Windkraft, 2011). IG Windkraft (2011) beziffert die

durchschnittliche Anlagengröße, die 2011 errichtet wurde, mit 2,2 MW. Wie in Abbildung 12 ersichtlich, teilen sich die 1084 MW installierte Leistung auf einige verschiedene Hersteller auf, wobei Enercon und Vestas gemeinsam 82 % der Marktanteile halten.

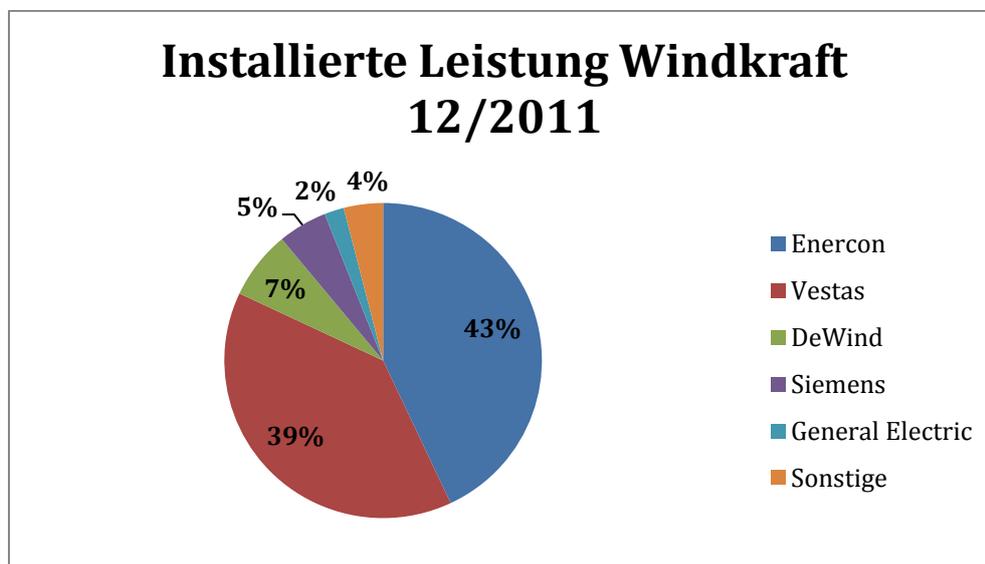


Abbildung 12: Installierte Leistung nach Herstellern, Stand Dezember 2011 (IG Windkraft, 2011).

Da die Schätzungen der Neodym-Eisen-Bor Magnete pro Megawatt angegeben werden, wurden im Zuge dieser Arbeit, die von der IG Windkraft (2011) bezogenen Marktanteile in die installierten Megawatt pro Hersteller umgerechnet (siehe Tabelle 6). Dies ergibt eine leichte Ungenauigkeit von 10 MW, dies wird hier aber toleriert, da die erhaltenen Megawatt dennoch einer annähernden Verteilung der installierten Leistung nach Herstellern entsprechen.

Tabelle 6: Hersteller in Österreich installierter WKAs inkl. Marktanteil und berechneter MW

Hersteller	Anteil	MW
Enercon	0,43	466,12
Vestas	0,39	422,76
DeWind	0,07	75,88
Siemens	0,05	54,20
General Electric	0,02	21,68
Repower	0,011	11,92
Nordex	0,0014	1,52
Windtec	0,002	2,17
Fuhrländer	0,002	2,17
Leitwind	0,003	3,25
Lagerwey	0,006	6,50
Seewind	0,007	7,59

Die in den Windkraftanlagen enthaltenen Permanentmagneten werden in Tonnen / Megawatt (t/MW) angegeben. Tabelle 7 zeigt die in der Literatur dargestellten Schätzungen für die eingesetzten Mengen (t/MW) an Permanentmagnet in Windkraftanlagen.

**Tabelle 7: Abschätzung des Magnetbedarfs für Permanentmagnet-Generatoren in WKAs (t/MW)**

Quelle	Min	Max	Mittelwert
Gutfleisch et al. 2011	-	-	0,5
nach Moss et al. 2011			
<b>General Electric</b>	0,5	0,75	0,625
<b>Technology Metals Research</b>	0,67	0,67	0,67
<b>Avalon Rare Metals</b>	0,6	1	0,8
<b>Jack Lifton Report</b>	0,7	1	0,85

Da sowohl zum Gewicht der Permanentmagnet-Generatoren, als auch zur Neodym-Konzentration in den Magneten Schätzungen existieren, ist der nächste Schritt die betreffenden Windkraftanlagen zu identifizieren.

In dieser Arbeit wurde der Ansatz gewählt, die Recherche auf Herstellerebene durchzuführen, da die IG Windkraft die notwendigen Informationen nicht zur Verfügung stellen konnte. Aus diesem Grund wurde ein Fragebogen erstellt und den Herstellern der in Österreich installierten Windkraftanlagen zugesandt (siehe Anhang). Die Fragen sollten klären, ob der Hersteller NdFeB Magnete verwendet, ob er Anlagen mit dieser Technologie in Österreich installiert hat und ob er die gebrauchten Magnete recycelt. Von den acht kontaktierten Windkraftanlagen-Herstellern, wurde von drei Firmen eine Rückmeldung erhalten.

**Tabelle 8: Recherchierte Information zur Verwendung von NdFeB Permanentmagneten verschiedener Hersteller**

Hersteller	Installierte WKA mit NdFeB	Quelle
Enercon	<b>NEIN</b>	Enercon Homepage
Vestas	<b>Keine Angabe</b>	
DeWind	<b>Keine Angabe</b>	
Siemens	<b>NEIN</b>	Auskunft Siemens Energy
General Electric	<b>Keine Angabe</b>	
Repower	<b>NEIN</b>	Auskunft Repower
Nordex	<b>NEIN</b>	Nordex Homepage
Windtec	<b>Keine Angabe</b>	
Fuhrländer	<b>Keine Angabe</b>	
Leitwind	<b>JA</b>	Auskunft Leitwind
Lagerwey	<b>JA</b>	Lagerwey Homepage
Seewind	<b>Keine Angabe</b>	

Da bei einigen Windkraftanlagen-Herstellern keine Rückmeldung erhalten wurde, musste ein anderer Weg gesucht werden die benötigten Informationen zu erhalten. Im Zuge der Internetrecherche wurde eine von der Europäischen Interessensvertretung für Windkraft unterstützte Plattform entdeckt, die als Basis für die weitere Untersuchung herangezogen wurde (thewindpower.net, 2012). Die gefundene Plattform erwies sich als äußerst nützlich, da sie alle in Österreich errichteten Windfarmen, die dazugehörigen Hersteller und in den meisten Fällen auch die Anlagentypen aufgelistet haben.

Aufgrund der ermittelten und erhaltenen Informationen kann angenommen werden, dass die Firmen Vestas, Leitwind und Lagerwey Windkraftanlagen mit Neodym-Magneten in Österreich installiert haben. Im Rahmen dieser Arbeit wird geschätzt, dass insgesamt 214 MW NdFeB enthaltende WKAs in Österreich in Betrieb sind (siehe Anhang B).

Die Lebensdauer der installierten Windkraftanlagen wird auf 20 Jahre geschätzt (Schittl, 2012; Du; Graedel, 2011b). Abbildung 13 zeigt den Lebenszyklus einer Windkraftanlage (D'Souza et al., 2011). Der Lebenszyklus umfasst die Verarbeitung der Rohstoffe, die Produktion der Windkraftanlagen, deren Installation und bei Erreichen des Lebensendes deren Abbau. Einzelne Komponenten werden einem Recycling zugeführt, andere auf Deponien abgelagert (D'Souza et al., 2011).

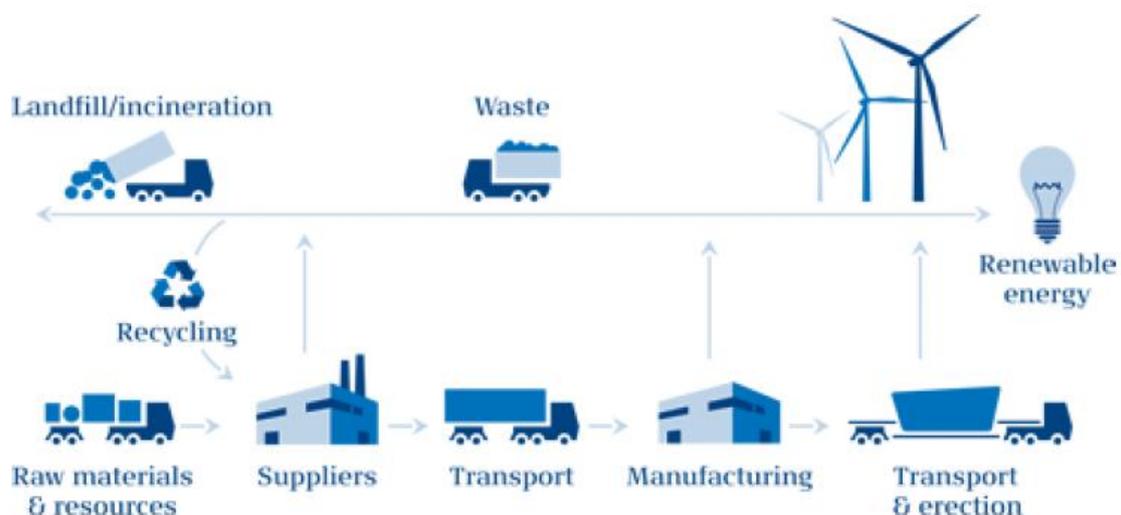


Abbildung 13: Lebenszyklus einer Windturbine (D'Souza et al., 2011).

Da es sich bei der Windenergie um eine erst kürzlich genutzte Energiequelle handelt und die Lebensdauer der Windräder bei 20 Jahren liegt, ist das Recycling noch kein großes Thema. Jedoch geben D'Souza et al. (2011) an, wie weit die einzelnen Komponenten der Windturbine recycelt werden können (siehe Tabelle 9).

**Tabelle 9: Behandlung der einzelnen Komponenten einer WKA nach der Demontierung (D'Souza et al., 2011).**

<b>Material</b>	<b>Behandlung</b>
<b>Aluminium</b>	90 % Recycling / 10 % Deponie
<b>Kupfer</b>	90 % Recycling / 10 % Deponie
<b>Stahl</b>	90 % Recycling / 10 % Deponie
<b>Polymere</b>	50 % Verbrennung / 50 % Deponie
<b>Gummi</b>	100 % Verbrennung
<b>Andere Komponenten</b>	100 % Deponie

Die Neodym-Eisen-Bor Permanentmagnete, die Gegenstand dieser Arbeit sind, werden im Rahmen der Lebenszyklus-Analyse von D'Souza et al. (2011) nicht erwähnt, jedoch gelten dieselben Probleme, die allgemein im Recycling dieser Permanentmagneten auftreten. Besonders eklatant sind hier die starken Magnetfelder, die einen Weitertransport erschweren und eine Entmagnetisierung der Magneten vor Ort erfordern.

Um genauere Informationen zum Recycling der Permanentmagneten in den Windkraftanlagen zu erhalten, wurde im Rahmen des an die Hersteller gerichteten Fragebogens auch eine Frage zu diesem Thema gestellt. Einzig und allein die Firma Leitwind äußerte sich dazu und gab an, dass sie in der Lage seien durch ein patentiertes, modulares Generatorkonzept die Magneten zerstörungsfrei auszubauen und wieder zu verwenden. Die gesamten Generatoren für Windkraftanlagen der Firma Leitwind, die in der Europäischen Union installiert sind (110 MW, alle mit Neodym-Eisen-Bor Permanentmagnet), werden in der Tiroler Gemeinde Telfs zusammengebaut.

D'Souza et al. (2011) rechnen ebenso mit einer Lebenserwartung der Windkraftanlagen von 20 Jahren, jedoch mit einer Schwankung von +/- 4 Jahren. Laut ihrem Bericht gab die Firma Vestas an, dass ihre Windkraftanlagen eine Lebenserwartung von bis zu 30 Jahren hätten.

### 3.2.4.2 Prozess 2 – Medizin und Forschung

Der zweite Prozess, der in diesem System dargestellt wird, ist „Medizin und Forschung“. Neodym kann durch zwei mögliche Flüsse in diesen Prozess gelangen: als mit Neodym dotiertes Lasermaterial Nd:YAG und als Neodym-Eisen-Permanentmagnet in der Magnetresonanztomographie (Angerer et al., 2009; Moss et al., 2011).

- **Nd:YAG Laser**

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (oder kurz LASER) ist ein, sowohl in Bereichen der Wissenschaft und Forschung, als auch der Medizin und Materialbearbeitung, unverzichtbares Werkzeug geworden. Das Prinzip des Lasers basiert auf dem Effekt der stimulierten Emission (siehe Abbildung 14). Während das Licht, das durch Verwendung einer Glühbirne entsteht, nach dem Absorptionsprozess vom Grundzustand  $E_1$  in den angeregten Zustand  $E_2$  spontan in den Grundzustand zurückfällt, ist das im Fall des Lasers anders: nach dem Absorptionsvorgang fällt das Elektron nur durch die Anregung eines einfallenden Lichtquants  $h\nu$  wieder zurück nach  $E_1$ . Während im Fall der Glühbirne polychromatisches Licht in alle Richtungen des Raumes emittiert wird, ist die Strahlung des Lasers monochromatisch und kohärent.

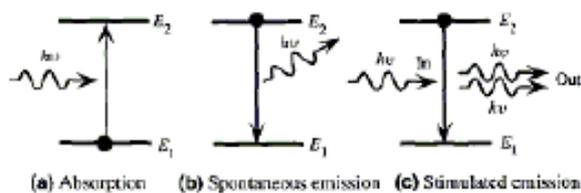


Abbildung 14: Schemen für Absorption und Emission (Kasap, 2001).

Das in dieser Stoffflussanalyse relevante Material Nd:YAG gehört zur Gruppe der sogenannten Festkörperlasermaterialien, die aus einem Wirtsmaterial und dem Lasermaterial bestehen. Im Fall dieses Materials fungiert Yttrium-Aluminium-Granat ( $Y_3Al_5O_{12}$ ) als Wirtsmaterial und die Seltene Erde Neodym als Lasermaterial (Angerer et al., 2009).

Laser werden vor allem zur Bearbeitung von Materialien verwendet: dazu gehört u.a das Schneiden und Verbinden, die Oberflächenbehandlung und die Formgebung.

In der industriellen Materialbearbeitung werden vor allem drei Lasertypen herangezogen: CO<sub>2</sub> Laser, Nd:YAG Laser und dioden-gepumpte Hochleistungs-Laser (Angerer et al., 2009). Neben der Materialbearbeitung ist der Einsatz von Lasern in Medizin und Forschung weit verbreitet (Angerer et al., 2009). Im medizinischen Bereich werden Nd: YAG Laser häufig in der Dermatologie eingesetzt, sowohl mit einer Frequenz von 1064 nm und frequenzverdoppelt mit 532 nm (Greve; Raulin, 2011).

Der Bereich der Festkörperlaser wird von Nd:YAG dominiert; dieses Material besteht hauptsächlich aus Yttrium- Aluminium- Granat, wobei Yttrium im Kristallgitter durch 0,8 bis 1,1 Atom. % Neodym ersetzt ist (Angerer et al., 2009).

Genaue Zahlen oder Schätzungen für die Verwendung dieses Lasermaterials in Österreich konnten nicht gefunden werden. Betrachtet man jedoch Tabelle 10, die die von Angerer et al. (2009) erstellte Projektion des globalen Neodym-Verbrauchs für die Herstellung von Nd:YAG Kristallen für die Laser-Materialverarbeitung darstellt, ist eindeutig erkennbar, dass der Bedarf an Neodym für diese Anwendung äußerst gering ist. Der weltweite Neodym-Verbrauch für diese Anwendung liegt 2006 bei 15 kg und wird laut Projektion 2030 zwischen 42-215 kg liegen. Zieht man in Betracht, dass es sich hierbei um die globale Produktion der Lasermaterialien handelt und dass Neodym in Yttrium-Aluminium-Granat in einer Konzentration von 0,8 bis 1,1 Atom. % vorliegt, ist es relativ naheliegend diesen Materialfluss als unbedeutend zu bezeichnen. Auch ein Recycling dieser geringen Mengen und geringen Konzentrationen würde vermutlich nicht in Frage kommen.

**Tabelle 10: Projektion des globalen Rohstoffverbrauchs für die Herstellung von Nd:YAG Kristallen zur Laser-Materialverarbeitung (Angerer et al., 2009).**

<b>Rohstoff</b>	<b>Weltproduktion 2006 [t]</b>	<b>Verbrauch 2006 [kg]</b>	<b>Bedarfsvorschau 2030 [kg]</b>
<b>Neodym</b>	<b>7.300</b>	<b>15</b>	<b>42-215</b>
<b>Yttrium</b>	7.008	552	1.710-8.110
<b>Aluminium</b>	33.700.000	85	264-1.250

Wie sich im Laufe der Recherche herausstellte, werden Nd:YAG Laser nicht nur im Bereich Medizin und Forschung, sondern primär auch in der industriellen Materialverarbeitung eingesetzt. Da es jedoch, wie in Tabelle 10 ersichtlich, um äußerst geringe Neodym-Mengen handelt, die weltweit für diese Anwendung benötigt werden, sind diese Flüsse zu vernachlässigen und werden in der Stoffflussanalyse mit dem Wert 0 versehen.

- **MRT**

Laut Moss et al. (2011) werden 5 % der weltweit hergestellten Neodym-Eisen-Bor Magnete für den Einsatz in der Magnetresonanztomographie MRT verwendet. Auch Rodewald et al. (2003) postulieren eine Verwendung dieser Magnete im Bereich der Magnetresonanztomographie und –spektroskopie.

Laut Hornak (2011) werden im so genannten MRI – magnetic resonance imaging- hauptsächlich supraleitende Elektromagneten verwendet. In diesen Materialien wird der Effekt ausgenutzt, dass der elektrische Widerstand supraleitender Materialien bei Unterschreiten ihrer kritischen Temperatur  $T_c$  null wird. Da  $T_c$  bei den meisten supraleitenden Materialien nahe beim absoluten Nullpunkt liegt (Ausnahme z.B Hochtemperatursupraleiter YBCO), müssen diese Materialien, um die Supraleitung und somit das Magnetfeld zu erhalten, mit flüssigem Helium (4,2 °K) gekühlt werden. Hornak (2011) beziffert das Volumen an flüssigem Helium in einem MRI / MRT Magneten mit 1700 Litern.

Über den direkten Einsatz von Hochleistungs-Permanentmagneten in diesem Anwendungsbereich konnte der Literatur keine vertiefende Information entnommen werden.

Laut Bundesministerium für Gesundheit (2009) waren im Strukturplan für das Jahr 2007 147 Magnetresonanz-Tomographie Geräte in Österreich installiert.

Einer persönlichen Mitteilung der Firma Philips Austria ist zu entnehmen, dass die Firma Philips in Österreich keine MRT Geräte installiert haben, die NdFeB-Magnete verwenden. Allgemein wurde von Seiten der Firma betont, dass sie in ihren Geräten nur die Supraleiter-Technologie verwenden würden, da diese in genannten Bereich „state-of the art“ sei. Des Weiteren wären Philips Austria und Siemens mehr als 90 % der in Österreich installierten MRT Geräte zuzuordnen. Auch der Bericht von Angerer et al. (2009) bezeichnet Siemens Healthcare und Philips Healthcare als die „großen“ europäischen Hersteller der Tomographen. Durch Recherche auf der Homepage von Siemens Healthcare konnte ein Gerät ermittelt werden, dessen Magnetfeld durch Einsatz eines Permanentmagneten generiert wird. Dieser Tomograph nennt sich MAGNETOM C! 0.35T (siehe Abbildung 15)



Abbildung 15: MAGNETOM C! 0.35T (Quelle: Siemens Healthcare)

Der Vorteil des in Abbildung 15 dargestellten Tomographen ist, dass aufgrund des eingesetzten Permanentmagneten keine ringförmige Anordnung mehr notwendig ist. Die Patienten sind also während der Bildgebung zugänglich, wodurch auch Behandlungen möglich sind. Im 18. Wiener Gemeindebezirk wird ein so genanntes „MRT open“ betrieben (MRT open, 2012). Als Vorteil wird der Einsatz bei Patienten mit Herzschrittmachern, Übergewicht, Platzangst und Gelenksbeschwerden als auch bei Kindern genannt.

Laut Du und Graedel (2011b) liegt die Einsatzdauer eines MRT-Geräts bei 10 Jahren.

### 3.2.4.3 Prozess 3 – Private Haushalte

Der Prozess, der in diesem System wohl die meisten Flüsse aufweist, ist „Private Haushalte“. Dieser Prozess beschreibt welche Neodym-haltigen Flüsse für den privaten Nutzen in die österreichischen Haushalte fließen und wie lange sie dort als Lager verweilen. Bei den Flüssen handelt es sich primär um Produkte, die Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten enthalten.

- **Elektrofahrzeuge**

Seit geschätzten 20 Jahren wird an der Entwicklung alternativer, von fossilen Brennstoffen unabhängiger Antriebstechnologien für Kraftfahrzeuge gearbeitet. Die Fahrzeugtypen, die sich in diesem Zusammenhang am ehesten durchsetzen konnten, sind der Hybrid-Antrieb (Elektro- und Kraftstoffantrieb), das Elektrofahrzeug (reiner Elektroantrieb) und gasbetriebene Fahrzeuge (Angerer et al., 2009).

Das Wort Hybrid stammt vom lateinischen Wort für „Mischling“ (*Hybrida*) ab und wird dafür verwendet Kraftfahrzeuge zu benennen, die sowohl durch einen Elektromotor als auch durch einen Verbrennungsmotor mit geringerer Leistung angetrieben werden. (Angerer et al., 2009). Das Hybridfahrzeug benötigt neben dem Elektromotor, dem Treibstofftank und dem Verbrennungsmotor noch eine Batterie als Energiespeicher (Angerer et al., 2009). Der Großteil der Elektroantriebe in Hybridfahrzeugen sind so genannte Permanent-Synchronmaschinen, die mit Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten versehen sind (Angerer et al., 2009). Zusätzlich zu den Seltenen Erden enthaltenden Elektromotoren, werden in Hybrid-Fahrzeugen auch Nickel-Metall-Hybrid Batterien verbaut, die ebenfalls Seltene Erden enthalten. Neben den Metallen Nickel und Kobalt enthalten diese Batterien auch „Mischmetall“, ein Seltene Erden – Gemisch aus Lanthan, Cer, Neodym und Praseodym (Öko Institut, 2011). Das Öko Institut (2011) beziffert, nach Auskunft von Toyota, die Masse der NiMH-Batterie des Toyota Prius mit 35 kg, wobei 7% oder 2,9 kg den Seltenen Erden zuzuordnen sind. Des Weiteren erwähnt das Öko Institut (2011) die Marktführung des Toyota Prius und die daraus folgende Dominanz der NiMH Batterie. Langfristig gesehen wird diese Form des Energiespeichers aber von der Lithium-Ionen-Batterie abgelöst werden (Öko Institut, 2011).

Im Jahr 2010 waren rund 4,5 Millionen PKWs in Österreich zugelassen, davon allerdings nur 0,11 % mit Hybrid-Antrieb (Wimmer, 2012).

Das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie plant, dass bis 2020 900.000 Hybridautos und 130.000 bis 150.000 Elektroautos in Österreich zugelassen sein sollen (Wimmer, 2012). Leoni (2005) spricht davon, dass im Jahr 2004 90.000 Hybrid-Fahrzeuge weltweit verkauft wurden, wobei 62 % Toyota Prius Modelle und 30 % Honda Civic Modelle waren.

Abbildung 16 zeigt eine Darstellung des Weltmarktführers Toyota Prius. Die Illustration inkludiert eine Darstellung des Elektromotors und der, durch die Bremsenergie wieder aufgeladenen, NiMH-Batterie.

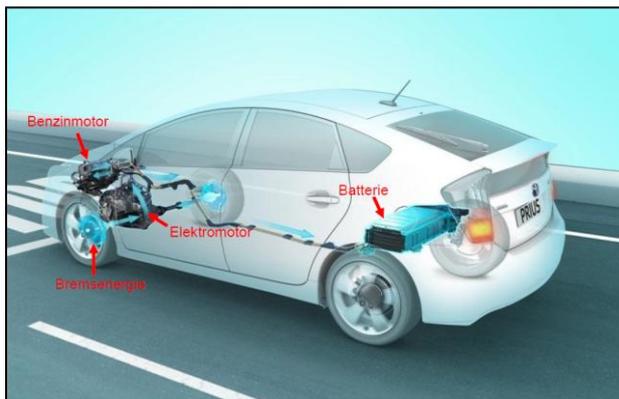


Abbildung 16: Illustration des Toyota Prius, dargestellt inklusive Elektromotor und Batterie (Wimmer, 2012).

Um die für die Stoffflussanalyse relevanten Neodym-Flüsse darstellen zu können, ist es essentiell die Neodym-Gehalte der Fahrzeuge, bzw. der Motoren und der Batterien zu kennen. Tabelle 11 zeigt die, verschiedenen Literaturquellen entnommenen, Informationen zum Neodym-Gehalt der Hybrid-Fahrzeuge. Da Toyota mit seinem Hybrid-Modell Prius unangefochtener Marktführer ist, beziehen sich viele Angaben direkt auf den Toyota Prius, wobei diese Angaben in dieser Arbeit für alle Hybridfahrzeuge herangezogen werden können.

Tabelle 11: Der Literatur entnommene Schätzungen zu den Neodym-Gehalten der Hybrid-Fahrzeuge

Modell	Quelle	Neodym-Gehalt	Magnet-Gehalt
Toyota Prius (motor)	Oakdene Hollins, 2010	1 kg	-
Toyota Prius (motor)	Oakdene Hollins, 2010	0,9 – 1,8 kg	-
Toyota Prius (motor)	Bryce, 2010	1 kg	-
Elektromotor	Öko-Institut, 2011	0,193 kg	-
Hybrid-Auto gesamt	Angerer et al. 2009	0,5 – 1 kg	Annahme 1,5 und 4,5 kg Magnet mit 30 % Nd
Toyota Prius gesamt	Gutfleisch et al. 2011	-	1,3 kg
Hybrid-Auto Motor	Buchert et al. 2011	0,15-0,36 kg	-

Laut Statistik Austria (2012) wurden in Österreich im Kalenderjahr 2011 356.145 Personenkraftwagen (PKW) neu zugelassen. Von dieser Gesamtanzahl sind 631 mit Elektro- und 1310 mit Hybrid-Antrieb.

Um auch die Lager in den privaten Haushalten quantifizieren zu können, ist es notwendig die insgesamt zugelassenen Fahrzeuge zu kennen. Laut Statistik Austria (2011a) waren am 31.12.2011 in Österreich 4.513.421 PKWs zugelassen, davon 989 mit Elektro- und 6.060 mit Hybrid-Antrieb.

Ein weiteres Verkehrsmittel, das sich zurzeit großer Beliebtheit erfreut, ist das Elektrofahrrad. Der VCÖ (2011) sagte für das Jahr 2011 Verkaufszahlen für die Elektrofahrräder von bis zu 40.000 Stück voraus. Tabelle 12 zeigt die Verkaufszahlen der Elektrofahrräder nach Kalenderjahr, bzw. die Prognose der Verkaufszahlen des VCÖ für das Jahr 2011. Definitiv ermittelte Verkaufszahlen für dieses Jahr konnten nicht aufgefunden werden.

**Tabelle 12: Verkaufszahlen Elektrofahrräder in Österreich nach Jahren (VCÖ, 2011).**

<b>Verkaufszahlen Elektrofahrräder Österreich</b>	
<b>Jahr 2011</b>	30.000 bis 40.000 <sup>4</sup>
<b>Jahr 2010</b>	20.000
<b>Jahr 2009</b>	12.000
<b>Jahr 2008</b>	8.000
<b>Jahr 2005</b>	3.500

Lo (2007) gibt an, dass im Motor eines Elektrofahrrads (36 V/180W) 380 g NdFeB Magnet verbaut sind. Liu et al. (2011) geben 300 g bzw. 500 g als Masse des Magneten in einem Elektrofahrrad an.

Die Einsatzdauer eines Autos liegt laut Du und Graedel (2011b) bei 14 Jahren. Für die weitere Berechnung der Verweildauer der Elektroautos, Hybridautos und Elektrofahrräder, wurde diese Einsatzdauer angenommen, da keine weiteren Informationen dazu zu finden waren. Jedoch ist anzunehmen, dass diese im Fall der Elektrofahrräder als etwas zu hoch angesetzt ist.

---

<sup>4</sup> Prognose des VCÖ

- **Festplatten (hard disk drive – HDD)**

In Festplatten, die sich in Computern befinden, werden Neodym-Eisen-Bor Magneten verbaut. Shin-Etsu (zitiert in Oakdene Hollins, 2010) nimmt an, dass ein Drittel der Neodym-Permanentmagneten für hard disk drives HDD eingesetzt wird.

In Laptops werden Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten im Gegensatz zu den Stand-PCs auch zur Verwendung in Lautsprechern eingesetzt (Buchert et al., 2012). Tabelle 13 zeigt die der Literatur entnommenen Gehalte an Permanentmagneten in Computer-Festplatten.

**Tabelle 13: Magnetgehalte für Festplatten**

<b>Magnetanwendung</b>	<b>Quelle</b>	<b>Magnet-Gehalt pro Anwendung</b>
HDD	<b>Liu et al. 2011</b>	<b>15 g</b>
HDD	<b>Liu et al. 2011</b>	<b>22 g</b>
HDD und Lautsprecher in Laptop	<b>Buchert et al. 2012</b>	<b>8,2 g</b>
HDD	<b>Laner et al. 2011</b>	<b>32,4 g</b>

Laut Statistik Austria (2011b) waren 2011 78,1% der österreichischen Haushalte mit einem Computer ausgestattet. Der Begriff Computer umfasst in diesem Fall Desktop-PCs, Laptops und Handheld Computer.

Laut Buchert et al. (2012) verteilten sich die Marktanteile der in Deutschland im zweiten Quartal 2011 verkauften Computer wie folgt: 50,4% Laptops, 28,5 % Desktop-PCs, 14 % Tablet PCs und 7,1 % Netbooks. Da für Tablet PCs und Netbooks keine Daten vorliegen, die den Magnet- oder Neodym-Gehalt beschreiben, wird in der Stoffflussanalyse nur mit Daten zu Desktop-PCs und Laptops gearbeitet.

Du und Graedel (2011b) geben die Lebensdauer eines Computers mit 10 Jahren an. Hausmann (2005) gibt für Computer Lebensdauern von 5 bis 8 Jahren an. Buchert et al. (2012) geben die Lebensdauer eines Laptops mit 5,6 Jahren an und schätzen, dass in Deutschland 50 % der Alt-Laptops gesammelt werden.

Über den Verbleib der zweiten Hälfte der Laptops gibt es keine Daten. Es wird jedoch vermutet, dass es wie auch bei anderen elektronischen Geräten mehrere Möglichkeiten des Verbleibs gibt:

- Die nicht mehr in Nutzung befindlichen Geräte werden zu Hause gelagert.
- Kleinere elektronische Geräte werden, obwohl verboten, teilweise mit dem Restmüll entsorgt.
- Elektroaltgeräte, aber auch Autos, werden ins Ausland verkauft und dort weiter verwendet oder einem Recycling unterzogen.

Wurden Laptops erfolgreich eingesammelt, läuft die weitere Behandlung nach folgendem Schema ab (Buchert et al., 2012): die Abfallunternehmen sind im ersten Schritt dazu verpflichtet Display und Akku des Laptops zu entfernen und diese zu einer separaten Behandlung zu senden. Das Gerät wird im Anschluss geshreddert (mechanische Vorbehandlung) und in mehrere Fraktionen sortiert. In diesem Sortiervorgang kommt es zu einem großen Verlust an wertvollen Rohstoffen, da die Zuordnung in die einzelnen Fraktionen zu wenig genau ist und manche Rohstoffe dadurch in Fraktionen gelangen aus denen sie nicht extrahiert werden können. Auf Festplatten wird ein größeres Augenmerk geworfen, da sie teilweise wertvolle Daten enthalten. Diese Daten können entweder durch eine Software gelöscht werden, durch Anlegen eines starken Magnetfelds oder durch einen separaten Shredder-Prozess. Dies lässt darauf schließen, dass zumindest ein Teil der Festplatten separat behandelt werden, was als Recycling-Möglichkeit ausgebaut werden könnte.

Ein weiterer Aspekt, der im Zusammenhang mit dem Recycling von Festplatten beachtet werden muss, ist, dass die einzelnen Fraktionen, die wertvolle Rohstoffe enthalten, schwierig voneinander zu trennen sind. Dies hängt vor allem mit dem komplexen Design des Produkts zusammen, das unter anderem verschiedene Schrauben enthält, was wiederum ein automatisiertes Zerlegen schwierig macht. Aufgrund dieses komplexen Designs werden die Festplatten geshreddert und ergeben ein Gemisch an wertvollen Rohstoffen, die größtenteils verloren gehen. Die Verluste der Edelmetalle liegen bei 70 %, die der Seltenen Erden sogar bei 100 %, da sie sich in der Stahlfraktion befinden und nicht mehr wiedergewonnen werden können.

Buchert et al. (2012) geben in ihrem Bericht einige Punkte vor, die die Rückgewinnung der kritischen Rohstoffe aus Festplatten möglich macht. Es wird unter anderem vorgeschlagen, dass die Laptops / PCs soweit wie möglich manuell zerlegt werden, um die einzelnen Komponenten einem separaten Recycling zuführen zu können. Da ein Großteil der NdFeB Magneten in Festplatten verbaut wird, ist es von großer Bedeutung diese auch als sekundäre Ressourcen zu nutzen. Ein Recycling der

Festplatten müsste sich prinzipiell rentieren, da Laptops und PCs eine kürzere Lebensdauer besitzen als Windkraftanlagen und Elektro- bzw. Hybridautos.

- **Smartphones bzw. Mobiltelefone**

Die so genannten Smartphones haben in den letzten Jahren das klassische Mobiltelefon abgelöst. Diese neue Generation der Mobiltelefone verfügt über viele neue Anwendungsmöglichkeiten und technische Applikationen, die auch den Einsatz relativ großer Mengen wertvoller Metalle erfordert (Buchert et al., 2012). Folgende Metalle sind für die Herstellung von Smartphones von Relevanz: Kobalt, Gallium, Indium, Niob, Tantal, Wolfram, Platingruppenmetalle und Seltene Erden, wie das hier näher betrachtete Neodym (Buchert et al., 2012). Wie in den meisten Flüssen dieses Stoffflusssystemes wird Neodym auch in diesem Fall als Neodym-Eisen-Bor Permanentmagnet vorgefunden.

Buchert et al. (2012) berichten, dass keine quantitativen Informationen zur Neodym-Konzentration in Mobiltelefonen existieren, jedoch wurde folgende Näherung gewählt: Neodym-Eisen-Bor Permanentmagnete werden in kleinen Lautsprechern, wie denen der Mobiltelefone, eingesetzt. Laut Buchert et al. (2012) wiegt dieser Magnet 190 mg. Unter der Annahme, dass die Zusammensetzung des Magneten ähnlich denen der Laptop Lautsprechern sein müsste, werden folgende in Tabelle 14 dargestellte Neodym-Gehalte festgelegt:

**Tabelle 14: geschätzte Neodym-Mengen eines Smartphones (Buchert et al., 2012).**

Metall	Metall pro Smartphone in g	Komponente
Neodym	0,050 g	Lautsprecher Magnet
Praseodym	0,010 g	Lautsprecher Magnet

Liu et al. (2011) geben an, dass pro Mobiltelefon 5 g Permanentmagnet verbaut werden. Dieser Wert erscheint jedoch im Vergleich zur Angabe von Buchert et al. (2012) relativ hoch und wird deshalb für die Stoffflussanalyse nicht herangezogen.

In Österreich besaßen im Jahr 2010/2011 91% der Haushalte ein Mobiltelefon (Statistik Austria, 2011c). Der Anteil der Smartphone-Besitzer stieg im Jahr 2011 alleine um ein Viertel auf 56% an (MMA, 2011).

Laut Reischl (2012) wurden in Österreich im Jahr 2011 3,3 Millionen Mobiltelefone verkauft. Konsument.at (2012) nennen dieselbe Verkaufszahl für das Jahr 2011.

Laut Buchert et al. (2012) ist im Fall eines Smartphones bzw. Handys mit einer Lebensdauer von drei bis vier Jahren zu rechnen. Hausmann (2005) gibt eine Lebensdauer der Mobiltelefone von 2,2 bis 5 Jahren an. Dies bedeutet, dass diese Produkte relativ kurzfristig einem möglichen Recycling zugänglich werden, wenn dieses Potential auch genutzt wird. Des Weiteren geben Buchert et al. (2012) an, dass in Deutschland nur 5% aller Mobiltelefone kontrollierte Recycling-Einrichtungen erreichen. Die verbleibenden Mobiltelefone erfahren vermutlich dasselbe Schicksal wie Laptops und Flat Screens, sie werden zu Hause gelagert, mit dem Restmüll entsorgt oder ins Ausland verkauft. Vor allem die Größe der Mobiltelefone bietet an sie zu Hause in einer Schublade zu lagern bzw. sie mit dem Hausmüll zu entsorgen.

Laut Buchert et al. (2012) werden im Recycling von Mobiltelefonen im ersten Schritt die Kobalt enthaltenden Lithium-Ionen-Batterien entnommen und einem separaten Recycling-Prozess zugeführt. Das Mobiltelefon wird im Anschluss, ohne Akku, in einer pyro-metallurgischen Anlage ohne weitere Zerlegung verarbeitet. In diesem Vorgang werden Metalle wie Kupfer, Blei, Nickel, Zinn und Edelmetalle wie Gold, Silber und Palladium rückgewonnen.

Anhand der niedrigen Sammelrate in Deutschland (5%) ist es offensichtlich, dass diese erhöht werden muss, um die wertvollen Rohstoffe aus dem Mobiltelefon auch nutzen zu können.

Laut BITKOM (2011b) neigen die deutschen Staatsbürger zum Horten ihrer Mobiltelefone: 83 Millionen Alt-Handys, die nicht mehr in Nutzung sind, werden in den privaten Haushalten gelagert. Würde man dies anhand der Bevölkerungszahlen auf Österreich herunterbrechen, ergebe das 8,3 Millionen Alt-Handys in Österreich.

Nach einer Umfrage von BITKOM (2011b) wird mit den Alt-Handys unterschiedlich verfahren: so heben 30 % der Deutschen ihre Telefone auf, 23% verschenken sie, 13% geben sie bei den Händlern oder Mobilfunkanbieter ab, 8% spenden sie für einen guten Zweck, 7% geben sie bei einer kommunalen Sammelstelle ab, 2% werfen sie in den Hausmüll und 17% wollten dazu keine Angabe machen.

In Österreich wurden im Rahmen der „Ö3-Wundertüte“-Spendenaktion 467.000 Alt-Handys gesammelt (ORF, 2012). Diese Mobiltelefone werden auf ihre Funktionstüchtigkeit hin untersucht und dann entweder in europäischen Recyclinganlagen aufgearbeitet oder, wenn sie noch funktionieren, als „second-hand“ Mobiltelefone in Schwellen- und Entwicklungsländer geliefert.

- **Lautsprecher**

Auch in Lautsprechern finden Neodym-Eisen-Bor Magneten Verwendung. Mengenmäßige Angaben finden sich nur zu Lautsprechern von HiFi-Anlagen, nicht jedoch zu den sogenannten „in-ear headphones“, die zu Smartphones und MP3-Playern verkauft werden. Diese Flüsse können leider hier nicht berücksichtigt werden.

Liu et al. (2011) geben an, dass in einem Lautsprecher mit 0,75 kg Gewicht und 50 Watt Leistung, 50 g NdFeB Permanentmagnet verbaut sind.

Laut Statistik Austria (2011 c) befinden sich in 64% der Österreichischen Haushalte HiFi-Anlagen, bei 3,605 Millionen Haushalten im Jahr 2011, ergibt das 2,3 Millionen HiFi-Anlagen.

Für eine grobe Schätzung der Lautsprecher wurden zwei Stück 0,75 kg Lautsprecher pro HiFi-Anlage angenommen.

Du und Graedel (2011b) geben die Lebensdauer von Audiosystemen mit 10 Jahren an. Hausmann (2005) gibt die Lebensdauer von Audiosystemen mit 8 – 15 Jahren an.

- **DVD Player**

Wie in Festplatten dürften auch in DVD Laufwerken und DVD-Playern Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten verbaut sein. Liu et al. (2011) geben an, dass pro DVD Player / DVD ROM 5 g NdFeB Permanentmagnet verbaut sind. Die Menge an Magnet wird geschätzt, indem einerseits die Anzahl der DVD Player in Österreich bestimmt werden, als auch angenommen wird, dass in jedem PC ein DVD Laufwerk eingebaut ist.

Laut Statistik Austria (2011 c) besitzen 77% der Österreichischen Haushalte einen DVD Player oder Videorecorder. In dieser Stoffflussanalyse wird angenommen, dass es sich nur um DVD Player handelt. Bei 3,605 Millionen Haushalten ergibt dies 2,8 Millionen DVD Player.

Laut BITKOM (2010) wurden im Jahr 2009 in Deutschland ungefähr 3 Millionen DVD Player verkauft. Da keine aktuelleren Daten vorliegen, wird daher angenommen, dass in Österreich 2011\_ungefähr 300.000 DVD Player verkauft wurden.

Hausmann (2005) gibt die Lebensdauer von DVD Playern mit 6,5 Jahren an.

#### 3.2.4.4 Prozess 4 – Verarbeitende Industrie

Dieser Prozess, Verarbeitende Industrie, soll beschreiben, wie und wo Neodym-Metall bzw. Neodymoxid nach dem Import zu weiterführenden Produkten / chemischen Verbindungen verarbeitet wird. Der Prozess wird durch Subprozesse näher dargestellt, da die aus Neodym-Metall hergestellten Verbindungen weiter industriell genutzt werden und nicht direkt in Verbindung mit den Prozessen Private Haushalte, Medizin und Forschung und Abfallwirtschaft stehen.

Österreich ist maßgeblich an der Seltenen Erden Verarbeitung in der Europäischen Union beteiligt: 24 % der EU-Importe gehen allein nach Österreich (Eurostat, 2010). Das Unternehmen, das für diesen überaus hohen Importanteil im Vergleich zu anderen EU-Staaten verantwortlich ist, ist die Treibacher Industrie AG mit Stammsitz in Althofen und weiteren weltweiten Niederlassungen. Die Treibacher Industrie AG beschäftigt sich neben der Verarbeitung von Seltenen Erden u.a mit der Herstellung von Hochleistungskeramiken und Hartmetallen (Treibacher Industrie AG, 2012). Das Unternehmen konnte aufgrund der steigenden Preise für Seltene Erden seinen Umsatz 2011 um 31% auf 546 Millionen Euro steigern und beschäftigte im selben Jahr 702 Mitarbeiter. Die Exportquote lag 2011 bei 88% (Treibacher Industrie AG, 2012). Die Treibacher Industrie AG wurde 1898 von keinem anderem als Carl Auer von Welsbach gegründet, der wie bereits erwähnt Didym in die Elemente Neodym und Praseodym aufzutrennen vermochte (Treibacher Industrie AG, 2012).

Da das Unternehmen mit seinem Produktangebot in Österreich Alleinstellungsmerkmal besitzt, ist es schwierig zuverlässige Daten zu erhalten.

Im Zuge der Recherche auf der Homepage der Treibacher Industrie AG (2012) konnten folgende Produkte im Sortiment des Unternehmens ermittelt werden, die Neodym enthalten: Neodymmetall, Neodymchlorid, Neodymfluorid, Neodymoxid, Neodymcarbonat, Neodymnitrat, Neodymacetat und Mischmetall.

- **Neodymmetall**

Metallisches Neodym wird primär zur Verarbeitung zu Hochleistungspermanentmagneten NdFeB verwendet. Des Weiteren wird es zur Herstellung spezieller Legierungen und Sputtertargets verwendet (MREL, 2012). Die Treibacher Industrie AG stellt keine Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten her, was nun eher auf die anderen Anwendungsbereiche schließen lässt.

- **Neodymchlorid**

Neodymchlorid wird hauptsächlich für Gläser und Kondensatoren eingesetzt. Wird es einem Glas beigemischt, färbt es dieses je nach Dotierung von violett, rot bis grau. Wird Licht durch dieses Spezialgläser durchgestrahlt, zeigt es scharfe Absorptionsbanden (MREL, 2012).

- **Neodymfluorid**

Wie Neodymchlorid wird auch Neodymfluorid hauptsächlich für Gläser und Kondensatoren eingesetzt. Des Weiteren ist es ein Rohstoff zur Weiterverarbeitung zu Neodymmetall und Neodymlegierungen (MREL, 2012).

- **Neodymoxid**

Neodymoxid, das auch *Neodymia* genannt wird, dient hauptsächlich zur Anwendung in Gläsern und Kondensatoren. Es färbt, wie Neodymchlorid, Gläser in den unterschiedlichsten Farbtönen und wird aufgrund der scharfen Absorptionsbanden in der Astronomie eingesetzt. Neodymoxid dient auch zur Dotierung von Lasermaterial (Nd:YAG) (MREL, 2012).

- **Neodymcarbonat**

Neodymcarbonat kommt wie Neodymchlorid, Neodymfluorid und Neodymoxid in Gläsern und Kondensatoren zum Einsatz (MREL, 2012).

- **Neodymnitrat**

Neodymnitrat kommt wie die anderen Neodymsalze in Gläsern und Kondensatoren zum Einsatz (MREL, 2012).

- **Neodymacetat**

Neodymacetat kommt wie die anderen Neodymsalze in Gläsern und Kondensatoren zum Einsatz (MREL, 2012).

- **Mischmetall**

Mischmetall (50 % Cer, 30 % La, 15 % Nd, 5 % Pr) wird als Additiv in der Metallurgie oder auch als Legierungsbestandteil eingesetzt, z.B zur Entfernung von Sauerstoff und Schwefel in der Stahlindustrie (MREL, 2012).

Auf Anfrage an die Treibacher Industrie AG (siehe Anhang), in welchen Mengen sie die geführten Neodym-Verbindungen herstellen würden und wie hoch der Exportanteil dieser Verbindungen liege, konnte von der entsprechenden Ansprechperson keine Auskunft gegeben werden. Die Begründung ist die Vertraulichkeit der entsprechenden Informationen, was bereits bevor die Anfrage gestellt wurde, zu erwarten war.

Das Unternehmen selbst klassifiziert sich allerdings die Neodym-Mengen betreffend, da es keine NdFeB Permanentmagneten herstellt, als nicht sehr bedeutend (Anfrage Treibacher). Diese Information der Treibacher Industrie AG lässt darauf schließen, dass in diesem Unternehmen relativ geringe Mengen an Neodym-Verbindungen hergestellt werden.

Der im System geschaffene Subprozess soll die *nachgelagerte Industrie* widerspiegeln, die durch die Treibacher Industrie AG hergestellte Neodym-Verbindungen in ihren Produkten weiterverarbeiten. Leider konnte zum Subprozess keine weitere Information gefunden werden, jedoch ist, angesichts der Exportquote der Firma Treibacher von 88% und der eigens titulierten geringen Bedeutung der Firma in der Herstellung von Neodym-Verbindungen zu vermuten, dass die Flüsse und Lager der *nachgelagerten Industrie* relativ gering sein müssten.

### 3.2.4.5 Prozess 5 – Abfallwirtschaft

Momentan gibt es weltweit kaum Recycling für Seltene Erden (Öko Institut, 2011). Einzig und allein Abfälle aus der Herstellung der Permanentmagneten (pre-consumer origin) werden einem Recyclingprozess zugeführt, nicht hingegen Produkte, die sich bereits in Verwendung befanden (post-consumer origin) (Öko Institut, 2011). Als Ursachen für das kaum betriebene Recycling werden laut Öko Institut (2011) die niedrigen Mengen der Seltenen Erden in ihren Anwendungen, die noch relativ niedrigen Preise für die Rohstoffe und die Tendenz der Seltenen Erden sich nach Aufschmelzung der Güter in der Schlacke zu befinden, genannt. Öko Institut (2011) betont jedoch auch, dass das Recycling der Seltenen Erden ein aktuelles Forschungsthema darstellt, da die Exportbeschränkungen Chinas und die damit steigenden Preise für die Seltenerdoxide es unabdingbar machen in Zukunft auch anthropogene Lager zu nutzen.

Wie bereits erwähnt, wurden im Jahr 2010 76 % des produzierten Neodym für die Verarbeitung zu Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten verwendet (Buchert et al., 2011). Diese Zahl veranschaulicht sehr deutlich, dass vor allem das Recycling dieser Magneten als anthropogenes Lager genutzt werden kann bzw. könnte. Alleine 20-30% der hergestellten Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten fallen während der Produktion als Abfall an (Öko Institut, 2011). Das Recycling des Produktionsabfalls hat für Österreich keine Relevanz, da NdFeB Magneten nicht in Österreich hergestellt werden.

Obwohl noch kein effizientes Recycling betrieben wird, existieren bereits Lösungsansätze, wie die Seltenen Erden aus dem magnetischen Material zurückgewonnen werden könnten (Öko Institut, 2011):

- Aufschmelzen des Abfalls und Rückgewinnung in metallischem Zustand (geringe Ausbeuten erwartet).
- Aufschmelzen und Rückgewinnung der Seltenen Erden als Oxide.
- Wiederverwendung des magnetischen Materials ohne Auftrennung des Gemisches.
- Extraktion von Neodym aus dem Magnetabfall mit Hilfe von geschmolzenem Magnesiumchlorid.
- Recycling der NdFeB Magneten aus Festplattenlaufwerken durch vermahlen und anschließendem erneuten Sintern unter weiterer Zugabe von 1% Neodym.
- Hitachi hat bereits veröffentlicht, dass sie eine Maschine entwickelt hätten, die die NdFeB Magnete aus Festplatten entferne, um den Recyclingprozess zu automatisieren. Diese

Maschine könnte 100 Magnete in einer Stunde entfernen, acht Mal mehr als in Handarbeit.  
Der kommerzielle Einsatz soll im Jahr 2013 beginnen.

An zweiter Stelle der Neodym-Anwendungen liegt der Einsatz in NiMH-Batterien mit 12% der Neodym-Produktion (Buchert et al. 2011).

Möglichkeiten für ein Recycling dieser Batterien sind (Öko Institut, 2011):

- Hydrometallurgische Aufarbeitung der Schlacke zur Rückgewinnung der Seltenerdmetalle.
- Extraktion der Seltenen Erden aus der NiMH Batterie durch Schwefelsäure (Rückgewinnungsrate: 95%).
- Statt einer aufwendigen Aufarbeitung der Schlacke existieren auch Ansätze, wobei das Seltene Erden enthaltende Material von den übrigen Materialien vor der Aufarbeitung getrennt wird.

Auch wenn das Recycling der Seltenen Erden noch nicht weit verbreitet ist, so wird dennoch intensiv daran geforscht. Vor allem Japan tätigt große Anstrengungen, um Recyclingprozesse im eigenen Land zu etablieren (Oakdene Hollins, 2010). Jedoch sind die Ausbeuten aus den Techniken noch zu gering und der finanzielle Aufwand noch zu groß als dass sich sekundäre Rohstoffquellen wirklich rentieren würden (Öko Institut, 2011). Oakdene Hollins (2010) berichten in ihrer Analyse, dass sich wohl die Behandlung mit flüssigen Metallen als attraktivste Methode behaupten werde.

Ein weiterer Aspekt, der das Recycling der Seltenen Erden schwierig macht, ist der große Energieverbrauch der Recycling-Prozesse und dass, im Falle der Magnet-Anwendungen, das Zerlegen der Elektrogeräte arbeitsaufwendig ist und oft manuell geschehen muss (Öko-Institut, 2011).

In Zusammenhang mit dem Recycling der NdFeB Magnete, die aufgrund der großen Nachfrage am ehesten Versorgungsengpässe erleiden werden, sind einige besondere Herausforderungen zu bewältigen (Öko Institut, 2011):

- Die starken Magnetfelder dieses Materials machen den weiteren Transport schwierig, da sie den Flugbetrieb gefährden können. Das Material müsste entweder entmagnetisiert werden oder direkt vor Ort verarbeitet werden.
- Ein großer Teil der Magnete wird in Festplatten und Motoren verwendet. Wie bereits erwähnt ist das Zerlegen dieser Güter, um die Magneten zu erhalten, aufwendig und dadurch auch kostspielig.
- Elektronikschrott wird häufig in pyro-metallurgischen Anlagen verarbeitet. Viele Metalle können dadurch rückgewonnen werden. Die Seltenerdmetalle gelangen aufgrund ihrer

niedrigen Schmelzpunkte jedoch in die Schlacke, die momentan noch nicht zur Rückgewinnung herangezogen wird.

Allgemein gilt es als Voraussetzung für die Entwicklung eines Recyclingsystems für Seltene Erden, dass effiziente Sammelsysteme entwickelt werden, die es ermöglichen die anthropogenen Lager auch nutzen zu können. Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt ist, dass große Teile der Konsumgüter am Ende ihrer Lebensdauer in Entwicklungsländer exportiert werden und so als Recyclingpotential verloren gehen (Öko Institut, 2011).

Aufgrund des steigenden Versorgungsrisikos der Europäischen Union mit kritischen Rohstoffen, arbeiten die Mitgliedsländer und die EU mit Nachdruck an der Entwicklung eines Recycling- und Sammelsystems, um die sekundären Ressourcen für sich zu gewinnen. Buchert et al. (2012) schlagen folgende Vorgehensweise vor, um dieses System zu entwickeln:

- Steigerung der Sammelrate: um die Recyclingrate zu erhöhen, ist es essentiell auch die Sammelrate zu erhöhen. Um diesen Effekt zu erzielen, müssen einerseits die Sammel-Infrastruktur ausgebaut werden und andererseits die Konsumenten durch Kampagnen für diese Thematik sensibilisiert und informiert werden. Das größte Augenmerk sollte auf der Verbesserung der Sammelrate von kleinen elektronischen Geräten liegen, da diese mit nur 5% eindeutig verbesserungswürdig ist.
- Kontrolle der illegalen Abfall-Exporte: um die Recyclingrate zu erhöhen, ist es wichtig, dass illegal nach Osteuropa, Afrika und Asien exportierte Abfälle besser kontrolliert bzw. verhindert werden. Eine Intensivierung der Export-Kontrollen sollte helfen, dass die Elektronikabfälle auch als Recyclingpotential innerhalb der EU genutzt werden können.
- Rechtsbasis: eine Entwicklung eines funktionierenden Recycling-Systems innerhalb der Europäischen Union benötigt auch die dementsprechende rechtliche Basis. Momentan ist ein Recycling von Elektronikabfällen nur möglich, wenn die entsprechenden Komponenten einen gewissen Gewichtsanteil am Produkt haben. Dies gilt für Kupfer, Stahl und Glas, aber nicht für kritische Metalle wie die Seltenen Erden.
- Technische Optimierung des Recycling: die aktuell praktizierte Methode des Shredderns ganzer elektronischer Bauteile, ohne sie vorher manuell zu zerlegen, führt zu hohen Verlusten an wertvollen Rohstoffen. Um diese Verluste in Zukunft zu vermindern, ist es von großer Relevanz die rohstoffreichen Bauteile separat zu behandeln.

- Fortschritt in Recycling-Methoden forcieren: für viele Rohstoffe gibt es noch keine wirtschaftlich nutzbaren Möglichkeiten der Rückgewinnung aus sekundären Ressourcen. Für die Entwicklung eines EU-weiten Recyclingnetzes ist es folglich essentiell, dass hier vielfach weiter geforscht wird, um umsetzbare Methoden zu etablieren, die ein zukünftiges Recycling ermöglichen.
- Temporäres Lager: Solange die Methoden zur Rückgewinnung der wertvollen Rohstoffe noch nicht entwickelt worden sind, wäre es sinnvoll Lagerstätten einzurichten, um die Rohstoff-enthaltenden, elektronischen Bauteile zwischenlagern zu können.
- Gerätedesign: neben der Entwicklung der Infrastruktur, der Rechtsbasis und der technischen Methoden zum Recycling der kritischen Rohstoffe, ist auch der Aspekt des Gerätedesigns nicht zu übersehen. Für ein effizientes Recycling wäre es von Nutzen, wenn die Geräteteile, die wertvolle Rohstoffe enthalten, leicht und ohne aufwendigen manuellen Einsatz ausbaubar wären, um ein schnelleres und damit auch wirtschaftlicheres Zerlegen der Geräte in ihre Fraktionen zu ermöglichen.

### 3.2.4.5 Abschätzung des Recyclingpotentials unter Verwendung von Weibull-Funktionen

Da zu den meisten Gütern unzureichend Daten vorhanden sind, um die exakten Abfallflüsse aus den Lagern der privaten Haushalte angeben zu können, musste ein anderer Ansatz gewählt werden. Zu diesem Zweck wird eine Verallgemeinerung der Exponentialverteilung herangezogen, die Weibull-Verteilung. Diese Funktion eignet sich gut zur Beschreibung von Produktausfällen mit zeitabhängiger Ausfallrate unter Einbeziehung von Ermüdungserscheinungen und Frühfehlern (Runge, 2010). Beschrieben wird diese Funktion durch die Parameter Alpha und Beta.

Über die durchschnittliche Lebensdauer der verschiedenen Produkte konnten Informationen gefunden werden, die dazu verwendet wurden Weibull Funktionen für die Produktgruppen Windkraft, Elektrofahrzeuge, Elektronische Geräte und Mobiltelefone zu entwickeln. Hierzu wurde definiert nach welchem Zeitraum 5%, 50% und 95% der Produkte aus einem Jahresfluss aus der Nutzung ausscheiden und zu Abfall werden. Die Software „@risk“ (Palisade Corporation, 2012) erstellt anhand dieser Informationen die dazugehörige Weibull-Funktion und deren Parameter Alpha und Beta. Somit können Dichtefunktionen erstellt werden, die auf der Abszisse die Lebensdauer in Jahren darstellen und auf der Ordinate die jeweilige Funktionsdichte, also die Wahrscheinlichkeit, dass ein Produkt in diesem Jahr zu einem Abfallprodukt wird.

Unter Heranziehung der dazugehörenden Weibull-Verteilung, können Szenarien generiert werden, die veranschaulichen, welche Auswirkung z.B. eine entsprechende Zunahme der Elektroautos in Österreich bis ins Jahr 2020 auf die Abfallwirtschaft hätte bzw. welches Recyclingpotential dieses liefern würde.

Die Ergebnisse der Abschätzung des Recyclingpotentials für einige Produkte der Neodym-Stoffflussanalyse dienen als Diskussionsgrundlage in Kapitel 4.

Tabelle 15 enthält die Perzentilwerte zur Abbildung der Lebensdauer, die für die vier Weibull-Verteilungen herangezogen wurden.

**Tabelle 15: Perzentilwerte zur Abbildung der Lebensdauer verschiedener Produktgruppen als Grundlage zur Ermittlung der entsprechenden Weibull-Verteilungen**

<b>Funktion</b>	<b>5%</b>	<b>50%</b>	<b>95%</b>
<b>Windkraft</b>	10 Jahre	20 Jahre	30 Jahre
<b>Elektrofahrzeuge</b>	7 Jahre	14 Jahre	20 Jahre
<b>Elektronische Geräte</b>	2 Jahre	5 Jahre	9 Jahre
<b>Mobiltelefone</b>	1 Jahr	3 Jahre	6 Jahre

## 4. Ergebnisse und Interpretation

### 4.1 Ergebnisse Kritikalitätsbewertung

Zu Beginn dieser Arbeit wurde versucht, die für Österreich kritischen Rohstoffe zu bestimmen. Hierzu wurden in Kapitel 3, Material und Methoden, zwei verschiedene Ansätze, die der Literatur entnommen wurden, vorgestellt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Methode der Ad-hoc Arbeitsgruppe der Europäischen Kommission (siehe 3.1.1) auf Österreich angewandt. Die Methode von Graedel et al. (siehe 3.1.2) ist mit Sicherheit wissenschaftlich exakter, benötigt jedoch auch ein großes Ausmaß an Daten, um die jeweiligen Parameter zu bestimmen. Das hätte den Rahmen dieser Arbeit gesprengt und kam deshalb nicht zum Einsatz. Die in Kapitel 3.1.1 vorgestellte Methode wurde für jene Elemente, die bereits für die Europäische Union als kritisch erachtet werden, durchgeführt. Der Sinn dieser Vorgehensweise ist die resultierende Vergleichbarkeit der kritischen Rohstoffe für Österreich und der Europäischen Union.

Abbildung 17 zeigt die Kritikalität einiger Elemente für die Republik Österreich (kreisförmige Symbole) im Vergleich zur Kritikalität für die Europäische Union (dreieckige Symbole, hellblau). Die Kritikalität setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, der wirtschaftlichen Bedeutung des Elements für eine Volkswirtschaft (hier auf der Abszisse aufgetragen) und dem Versorgungsrisiko mit dem dieses Element behaftet ist (hier auf der Ordinate aufgetragen).

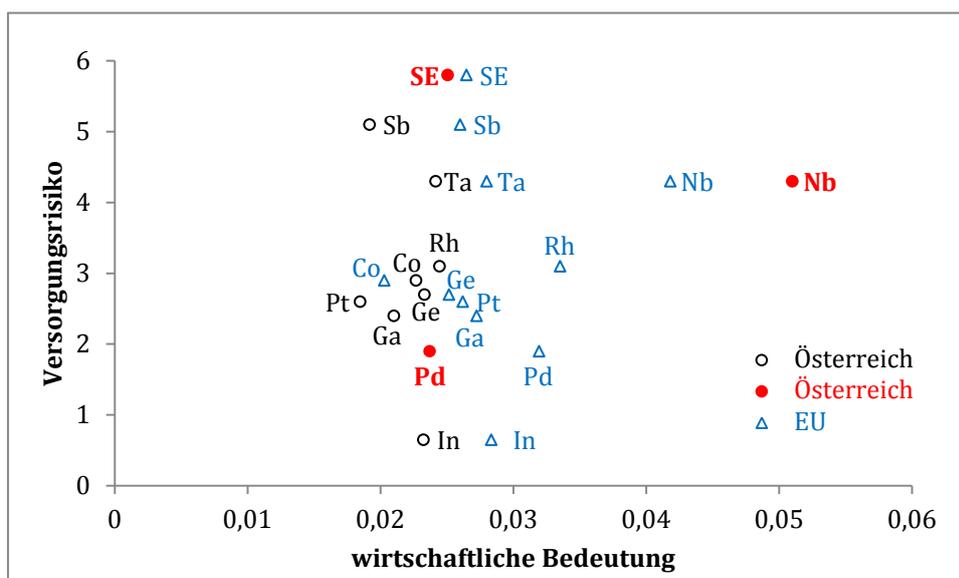


Abbildung 17: Vergleich Ergebnisse Kritikalität für die EU und Österreich (Schlosser; Gattringer, 2012).

Bei Begutachtung des Versorgungsrisikos und der wirtschaftlichen Bedeutung, ist es von großer Relevanz zu beachten, dass es sich hierbei um relative Werte handelt, die absoluten Zahlen haben keinerlei Bedeutung.

Das Versorgungsrisiko, das von der Anzahl der Länder, die dieses Element produzieren, und deren politischer Stabilität abhängt, ist offensichtlich für die Seltenerdmetalle am größten. Wie bereits erwähnt, werden 97 % der weltweit gehandelten Seltenen Erden in China produziert. Dies erklärt das überaus hohe Versorgungsrisiko. Die wirtschaftliche Bedeutung der Seltenen Erden liegt im Vergleich zu den anderen kritischen Rohstoffen im Mittelfeld, jedoch dürfte die wirtschaftliche Bedeutung dieser Elemente für die EU etwas höher sein als für die Republik Österreich. Betrachtet man die verbleibenden Elemente, ist die geringere wirtschaftliche Bedeutung in Österreich im Vergleich zur Europäischen Union auch hier festzustellen (wobei Kobalt hier eine Ausnahme darstellt).

Ein relativ hohes Versorgungsrisiko weisen auch die Elemente Antimon, Tantal, Niob und Rhodium auf. Die größte wirtschaftliche Bedeutung besitzt sowohl in Österreich als auch in der Europäischen Union das Element Niob. Die verbleibenden Elemente, die allesamt ohnehin „kritisch“ sind, sind in ihrer wirtschaftlichen Bedeutung ähnlich. Das Versorgungsrisiko zeigt in diesem Fall größere Unterschiede auf.

Hier ist festzuhalten, dass es sich als relativ schwierig erweist die Kritikalität von Rohstoffen zu bestimmen, wenn essentielle Parameter wegen fehlender Daten nicht bestimmt werden können. So konnte die wirtschaftliche Bedeutung u.a. für Wolfram und Magnesium (und einige mehr) nicht berechnet werden, da die prozentuale Verteilung der Elemente in ihren Anwendungen nicht bekannt ist und sie somit auch nicht den wirtschaftlichen Sektoren der untersuchten Volkswirtschaft zugeordnet werden können. Des Weiteren finden sich in öffentlich zugänglichen Quellen keine Informationen zur Austauschbarkeit oder zum Anteil des Recyclings der Elemente, was eine genauere Bestimmung des Versorgungsrisikos ermöglichen würde.

Die Elementgruppe der Seltenen Erden ist auf alle Fälle auch für Österreich als überaus kritisch anzusehen, da die Wahrscheinlichkeit, dass Versorgungsengpässe eintreten, sehr hoch ist und weil Österreich wirtschaftlich von den Seltenen Erden Importen abhängt. 24 % der EU-Importe gehen allein in die kleine Volkswirtschaft Österreich.

## 4.2 Ergebnisse Stoffflussanalyse Neodym

Anhand der in Kapitel 3, Material und Methoden, dargelegten Daten wurden die Flüsse und Lager im System „Neodym in Österreich 2011“ soweit wie möglich quantifiziert. Abbildung 18 zeigt das erstellte, quantifizierte Stoffflussbild für Neodym in Österreich im Jahr 2011.

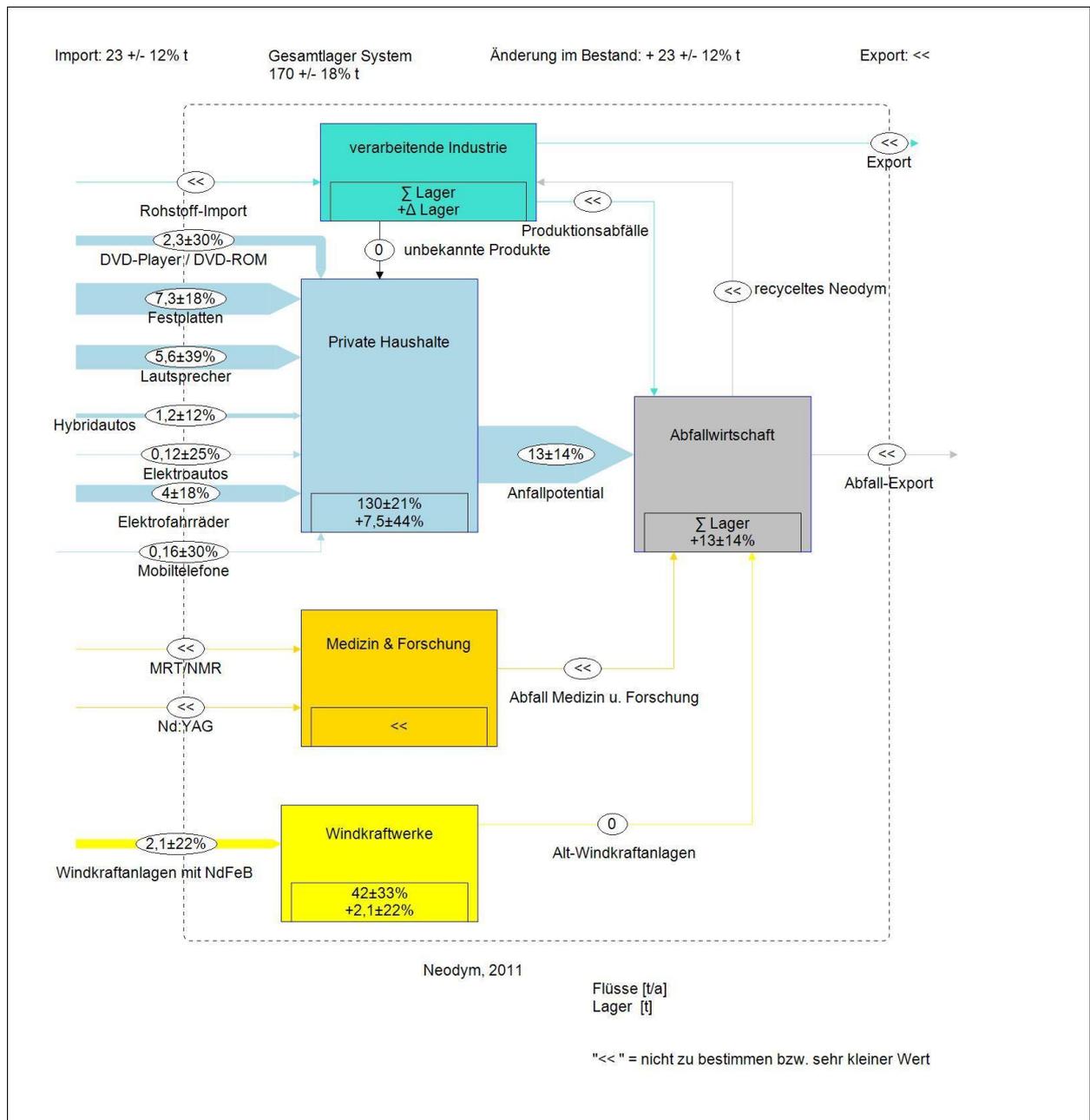


Abbildung 18: Stoffflussbild für Neodym in Österreich 2011, Stoffebene, Einheit Tonnen.

Wie in Abbildung 18 ersichtlich, konnte der Fluss in den Prozess Windkraftwerke abgeschätzt werden und ebenso das dazugehörige Lager.

Die Flüsse MRT/NMR und Nd:YAG Laser in den Prozess Medizin und Forschung, ebenso wie Fluss 16 aus diesem Prozess zum Prozess Abfallwirtschaft wurden als nicht relevant angesehen, da wie in Kapitel 3 bereits erörtert, die Neodym Mengen in diesen Anwendungen gering sind und zusätzlich keine Daten vorliegen, die eine Quantifizierung ermöglichen würden.

Im Prozess Private Haushalte konnten die Lager aller Produkte geschätzt werden, sowie alle Input-Flüsse, ausgenommen der Lautsprecher (Siehe Kapitel 4.2.4). Die Output-Flüsse dieses Prozesses zur Abfallwirtschaft wurden durch das Anfallpotential (=Lager/mittlere Lebensdauer) der einzelnen Produkte geschätzt (Hausmann, 2005).

Über den Prozess Verarbeitende Industrie konnten keine quantitativen Daten ermittelt werden. Der Prozess wurde qualitativ beschrieben, jedoch konnte die Firma Treibacher, die aus Datenschutz-Gründen keine Angaben zu den in ihrem Unternehmen verarbeiteten Neodym-Mengen machen kann, keine weitere Auskunft geben. Die kontaktierte Person gab lediglich an, dass die produzierten Mengen, da keine Neodym-Eisen-Bor Magneten hergestellt würden, gering sind. Die Input- und Output-Flüsse wurden deshalb mit “<<” versehen und werden als nicht relevant betrachtet.

Der Output-Fluss aus dem Prozess Abfallwirtschaft konnte auch nicht geschätzt werden, da keine Daten über den genauen Verbleib der einzelnen Produkte nach der Entsorgung zu finden waren. Als Beispiel ist hier anzuführen, dass zwar bekannt ist, dass eine gewisse Anzahl an Altfahrzeugen nach Afrika exportiert wird, jedoch ist nicht anzunehmen, dass Elektro- oder Hybridautos in diese armen Länder verkauft werden. Des Weiteren haben vermutlich auch noch wenige dieser Fahrzeuge ihr Lebensende erreicht.

Wie bereits erwähnt, wurde aufgrund der mangelnden Informationen zur Anzahl und zum Verbleib der aus der Nutzung geschiedenen Produkte, die Annäherung mit einer Weibull-Funktion durchgeführt. Die Ergebnisse hierzu werden in den detaillierten Ergebnissen der Prozesse dargestellt.

In allen Berechnungen wurden den zugrunde liegenden Daten Vertrauensbereiche zugeordnet und diese mittels Gaußscher Fehlerfortpflanzungsrechnung berücksichtigt.

Die erstellte Stoffflussanalyse ergibt ein gesamtes Lager für Neodym in Österreich von 170 <sup>+/- 18%</sup> Tonnen, einen Gesamt-Import von 23 <sup>+/- 12%</sup> Tonnen und einen Lager-Zuwachs von 23 <sup>+/- 12%</sup> Tonnen.

#### 4.2.1 Ergebnisse Prozess Windkraft

In der Berechnung wurde von einem durchschnittlichen Magnetbedarf der getriebelosen Windkraftanlagen, von  $710^{+/-88,75}$  kg/MW ausgegangen.

Öko-Institut (2011) schätzte den Anteil der mit NdFeB-Permanentmagneten versehenen Windkraftanlagen an den Neuinstallationen auf 14%, dies ergibt bei 73 MW Neuinstallationen im Jahr 2011,  $10,22^{+/-2,55}$  MW dieses Typs.

Das Lager wurde nach eigener Recherche auf insgesamt 214 MW geschätzt, abzüglich des Input-Flusses im Jahr 2011, ergeben das  $203,78^{+/-50,95}$  MW installierte Leistung.

Der Güterfluss des Neodym-Eisen-Bor Magneten in den Prozess Windkraft beläuft sicher daher auf  $7,25^{+/-2,03}$  t, das Lager bevor der Fluss zugeführt wird auf  $144,68^{+/-40,44}$  t.

Mit Hilfe der Software STAN wurde nach Angabe der Neodym-Konzentrationen mit  $0,29 +/- 0,04$  t/t die Flüsse und Lager in Neodym-Mengen umgerechnet. Tabelle 16 stellt diese dar, 2011 befanden sich  $42^{+/-33\%}$  Tonnen Neodym im Prozess Windkraft, der Zuwachs beträgt  $+ 2,1^{+/-22\%}$  Tonnen.

Tabelle 16: Ergebnisse Prozess Windkraft - Stoffebene Neodym

Prozess: Windkraft						
<b>Input</b>						<b>Tonnen</b>
P3	F10	Nd-Fe-B Magnet		P3,Windkraftwerke	berechnet	$2,11^{\pm 0,65}$
<b>Output</b>						
P3	F17	Fluss 17		P3,Windkraftwerke	P17,Sortierung	berechnet $0,00^{\pm 0,00}$
<b>Lager</b>						
<b>Stoff</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>Standardabweichung</b>	<b>Konzentration</b>	<b>MW</b>	<b>STABW</b>	
Neodym	42,13 t	13,97 t	Nd im Magneten	0,29 t/t	0,04 t/t	

Da, wie bereits im Kapitel Material und Methoden dargestellt, die Lebensdauer der Windkraftanlagen bei 20, wenn nicht sogar 30 Jahren liegt und die installierte Leistung in Österreich erst in diesem Jahrtausend stark zunahm, wird der Output-Fluss in das System Abfallwirtschaft mit 0 beziffert, bzw. als sehr klein angesehen und folglich in der Darstellung mit „<<“ versehen.

Im nächsten Schritt wurde das Recycling-Potential mit Hilfe einer Weibull-Funktion untersucht und diese dann dazu verwendet, ein Szenario für die Windkraftentwicklung bis 2020 zu diskutieren. Das Szenario der Windkraftentwicklung bis ins Jahr 2020 wird im Anschluss mit der Schätzung der Lagerzusammensetzung im Jahr 2011 überlagert.

Abbildung 19 zeigt die Weibull-Funktion für die Lebensdauer eines Windkraftwerks, die dazugehörigen Lebensdauer-Parameter finden sich in Kapitel 3.2.4.6. Die Weibull-Parameter für die hier dargestellte Funktion sind wie folgt: Alpha= 3,43 und Beta= 20,93.

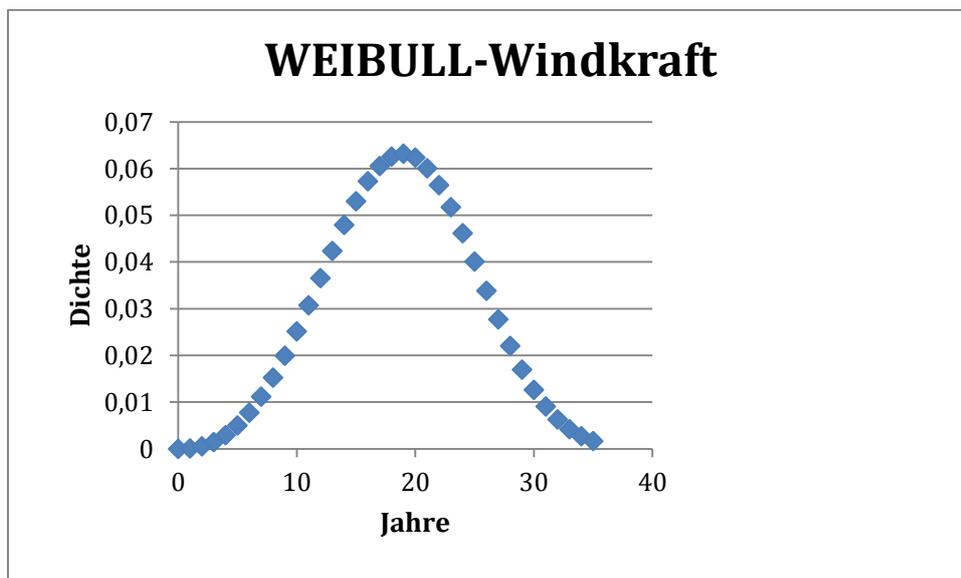


Abbildung 19: Weibull Funktion zur Lebensdauer eines Windkraftwerks.

Schittl (2012) gibt eine Entwicklung der Windkraftanlagen mit Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten von 60 MW Neuinstallationen im Jahr 2020 an. Vom Ausgangspunkt, Neuinstallationen 2011, wird ein lineares Wachstum angenommen (siehe Tabelle 17).

Um das bestehende Lager auch in die Abschätzung des Recyclingpotentials einbeziehen zu können, werden die Neuinstallationen von Windkraftanlagen mit Neodym bis ins Jahr 1994 geschätzt. Hierzu wurden anhand der Daten zu den jährlichen Installationen an Windkraftanlagen (IG Windkraft, 2011) angenommen, dass 20 % davon mit Neodym-Eisen-Bor Permanentmagnet sind. Dies ergibt insgesamt das geschätzte Lager 2011 von 214 MW Windkraftanlagen mit Neodym.

Tabelle 17: Szenario "Windkraft mit NdFeB-Permanentmagnet"; Neuinstallationen in Megawatt bis 2020.

<b>Jahr</b>	<b>Neuinstall.</b>	<b>Jahr</b>	<b>Neuinstall.</b>	<b>Jahr</b>	<b>Neuinstall.</b>
<b>2011</b>	10,22 MW	<b>2001</b>	3,6 MW	<b>2000</b>	7,4 MW
<b>2012</b>	15,57 MW	<b>2002</b>	9 MW	<b>1999</b>	2,6 MW
<b>2013</b>	21,10 MW	<b>2003</b>	55,2 MW	<b>1998</b>	1,8 MW
<b>2014</b>	26,64 MW	<b>2004</b>	38,4 MW	<b>1997</b>	1,6 MW
<b>2015</b>	32,17 MW	<b>2005</b>	43,6 MW	<b>1996</b>	2,2 MW
<b>2016</b>	37,70 MW	<b>2006</b>	29,4 MW	<b>1995</b>	0,2 MW
<b>2017</b>	43,23 MW	<b>2007</b>	3,8 MW	<b>1994</b>	0 MW
<b>2018</b>	48,76 MW	<b>2008</b>	2,8 MW		
<b>2019</b>	54,29 MW	<b>2009</b>	0 MW		
<b>2020</b>	60 MW	<b>2010</b>	3,6 MW		

Durch Kombination der Weibull-Funktion mit dem Szenario Windkraft 2020, lässt sich berechnen, welches Recycling-Potential sich in diesem Fall einstellen würde. Da der Input-Fluss im Jahr 2020 endet, nimmt auch der anfallende Abfall gegen Ende des betrachteten Zeithorizonts ab. Dieser ist also nicht für weitere Überlegungen heranzuziehen.

Abbildung 20 zeigt die anfallenden Neodym-Mengen, die für ein Recycling zugänglich werden, im Falle eines linearen Anstiegs der Windkraftanlagen mit NdFeB Permanentmagneten bis 60 MW im Jahr 2020. Die Jahre nach 2020 sind hier nicht berücksichtigt, d.h die reale Menge könnte noch höher sein oder sich, bei gleichbleibender Neuinstallation ab 2020, auf einem Plateau einpendeln. Das Maximum an anfallendem Neodym für ein Recycling aus den Windkraftanlagen, ergibt sich in diesem Szenario zwischen den Jahren 2030 und 2040.

2034 würden, aus den bis 2020 installierten Windkraftanlagen, 16 Tonnen Neodym anfallen, die als Recyclingpotential genutzt werden könnten.

Basis dieser Annahme ist, dass Neodym nicht substituiert wird oder technologische Erneuerungen den zukünftigen Markt beeinflussen. Aus Abbildung 20 ist klar ersichtlich, dass die Windkraftanlagen sich zwar nicht als Lösung für einen kurzfristig auftretenden Versorgungsengpass eignen, jedoch ist es vorteilhaft, dass in den Anlagen große Mengen an Neodym konzentriert vorliegen, die leichter zugänglich sind, als in anderen Produkten.

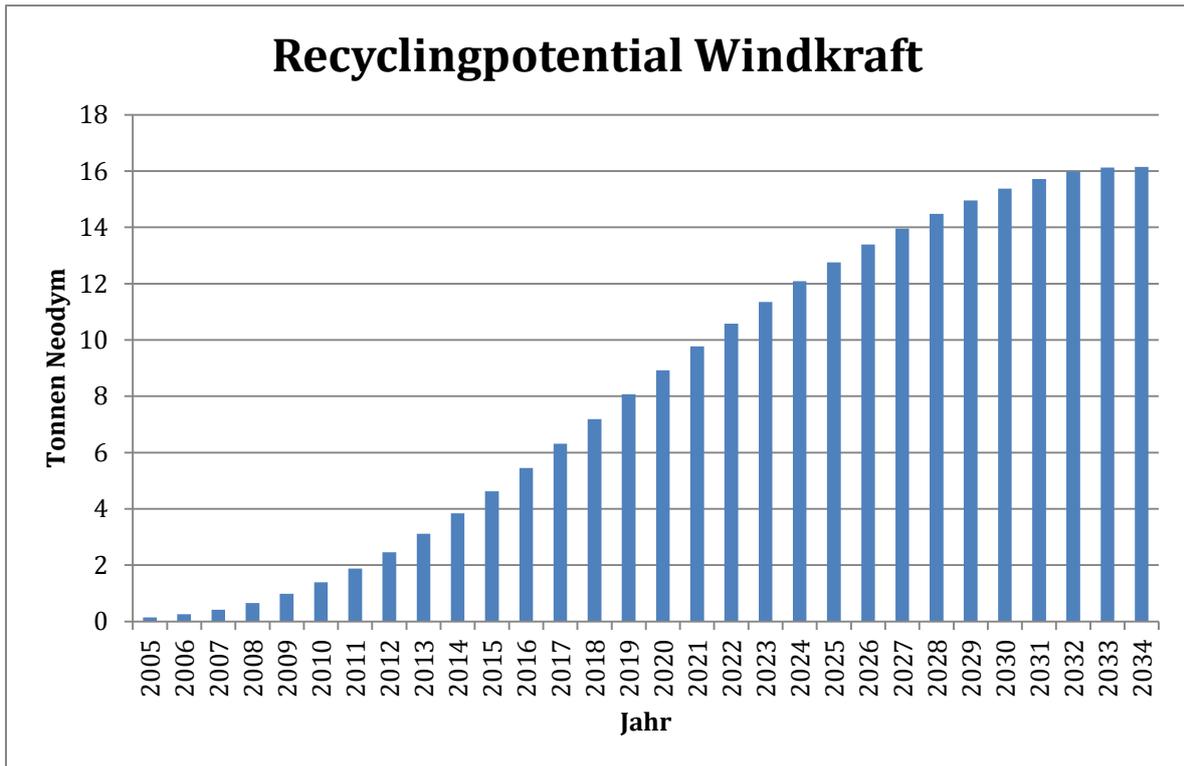


Abbildung 20: Anfallende Neodym-Mengen pro Jahr im Szenario Windkraft bis 2020.

#### 4.2.2 Ergebnisse Prozess Medizin und Forschung

Anders als zu Beginn dieser Arbeit vermutet, hat sich herausgestellt, dass die Anwendungen von Neodym in Nd:YAG Lasermaterial und als Permanentmagnet in MRTs und NMRs als nicht relevant zu erachten sind.

Auf diese Thematik wird in Kapitel 3 näher eingegangen und begründet warum diese beiden Flüsse 0 gesetzt werden bzw. als sehr klein angesehen und im Systembild mit „<<“ versehen werden.

Im Falle der MRT Geräte ist, begründet durch die Aussage der Firma Philips Health Care, klar, dass keine bzw. nur ein Gerät mit der Permanentmagneten-Technologie installiert ist, da diese Technologie nicht „state of the art“ sei. Vielmehr würden supraleitende Materialien als Elektromagneten eingesetzt, die zwar bedingt durch die ringförmige Anordnung und durch die Kühlung mit flüssigem Helium aufwendiger sind, jedoch größere Magnetfelder schaffen können.

Beim Nd:YAG Lasermaterial ist dies nicht der Fall. Es ist sowohl in der Materialverarbeitung als auch in Medizin und Forschung ein oft eingesetztes Werkzeug. Jedoch liegt die Konzentration von Neodym im Wirtsmaterial, wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, bei 0,8 bis 1,1 Atom %. Neodym wird also nur zur Dotierung des Wirtsmaterials Yttrium-Aluminium-Granat verwendet und eignet sich in diesen Konzentrationen vermutlich nicht für ein Recycling.

#### 4.2.3 Ergebnisse Prozess Verarbeitende Industrie

Die Ergebnisse für den Prozess Verarbeitende Industrie sind, wie auch für den Prozess Medizin und Forschung, weniger ergiebig als gedacht. Aus Datenschutz Gründen gibt es keine statistische Information über die Verarbeitung von Seltenen Erden in Österreich. Dies basiert darauf, dass die Firma Treibacher diesbezüglich ein Alleinstellungsmerkmal hat und keine Informationen und Daten überlieferte. Nach eigenen Angaben, wie in Kapitel 3 näher erörtert wird, spielt die Firma in der Produktion von Neodym-Verbindungen eine untergeordnete Rolle.

Obwohl die Werte der einzelnen Flüsse und Lager 0 gesetzt wurden, da keine Daten vorhanden waren und die Firma Treibacher über sich selbst äußerte, in diesem Bereich keine große Rolle zu spielen, so lassen sich dennoch Schlüsse aus der qualitativen Betrachtung des Prozesses ziehen. Im erstellten System wurde davon ausgegangen, dass Rohstoffe (Neodym oder Neodymoxid) nach

Österreich importiert werden und dort in der „Verarbeitenden Industrie“ zu verschiedenen Neodym-Verbindungen verarbeitet werden. Diese Verbindungen, bei denen es sich um Chemikalien handelt, die keinen direkten Einsatz durch private Konsumenten erfahren, werden einer „Nachgelagerten Industrie“ zugeführt und dort weiterverarbeitet. Im Subprozess „Nachgelagerte Industrie“ werden die Neodym-Verbindungen zur Herstellung von Produkten verwendet, die vermutlich auch als Fluss in die Privaten Haushalte gelangen. Da diese Produkte nicht qualifiziert werden konnten, wird dieser Fluss hier als „unbekannte Produkte“ bezeichnet. Vom Subprozess „Nachgelagerte Industrie“ führt ebenso ein Export-Fluss weg als auch ein Abfall-Fluss der anfallenden Produktionsabfälle. Von der Abfallwirtschaft erreicht ein Fluss, nach durchgeführtem Recycling, erneut den Prozess „Verarbeitende Industrie“.

Da es sich bei den in der Firma Treibacher hergestellten Verbindungen um Spezial-Chemikalien handelt und diese auch nur in kleinem Maßstab hergestellt würden (Auskunft Treibacher), dürften hier auch keine großen Mengen an Produktionsabfällen anfallen. Würden in Österreich, wie z.B. in der Firma Vacuumschmelze in Deutschland NdFeB Permanentmagneten hergestellt, würde das vermutlich etwas anders aussehen. Bei der Herstellung der Permanentmagneten fallen, wie in Kapitel 3 bereits dargelegt, 20-30% an Produktionsabfall an, was ein Recycling wirtschaftlich notwendig macht. Ebenso wurde im Kapitel Material und Methoden bereits erwähnt, dass die Firma Treibacher 88% der hergestellten Verbindungen ins Ausland exportiert, was vermuten lässt, dass dies auch für Großteil der hergestellten Neodym-Verbindungen gilt.

#### 4.2.4 Ergebnisse Prozess Private Haushalte

Der Prozess, der die meisten Ergebnisse liefert, ist bei momentaner Datenlage der Prozess Private Haushalte. Hier sollten die Güterflüsse verschiedener Produkte beschrieben werden, die in den Haushalten von Herr und Frau Österreicher Verwendung finden. Abbildung 21 zeigt das Systembild der Subprozesse „Private Haushalte“ auf Stoffebene und stellt sowohl die Flüsse als auch die Lager der einzelnen Produkte dar. Mit Ausnahme des Lautsprecher Input-Flusses und der Flüsse, die vom Prozess Verarbeitende Industrie herrühren, konnten sämtliche Lager und Flüsse geschätzt werden.

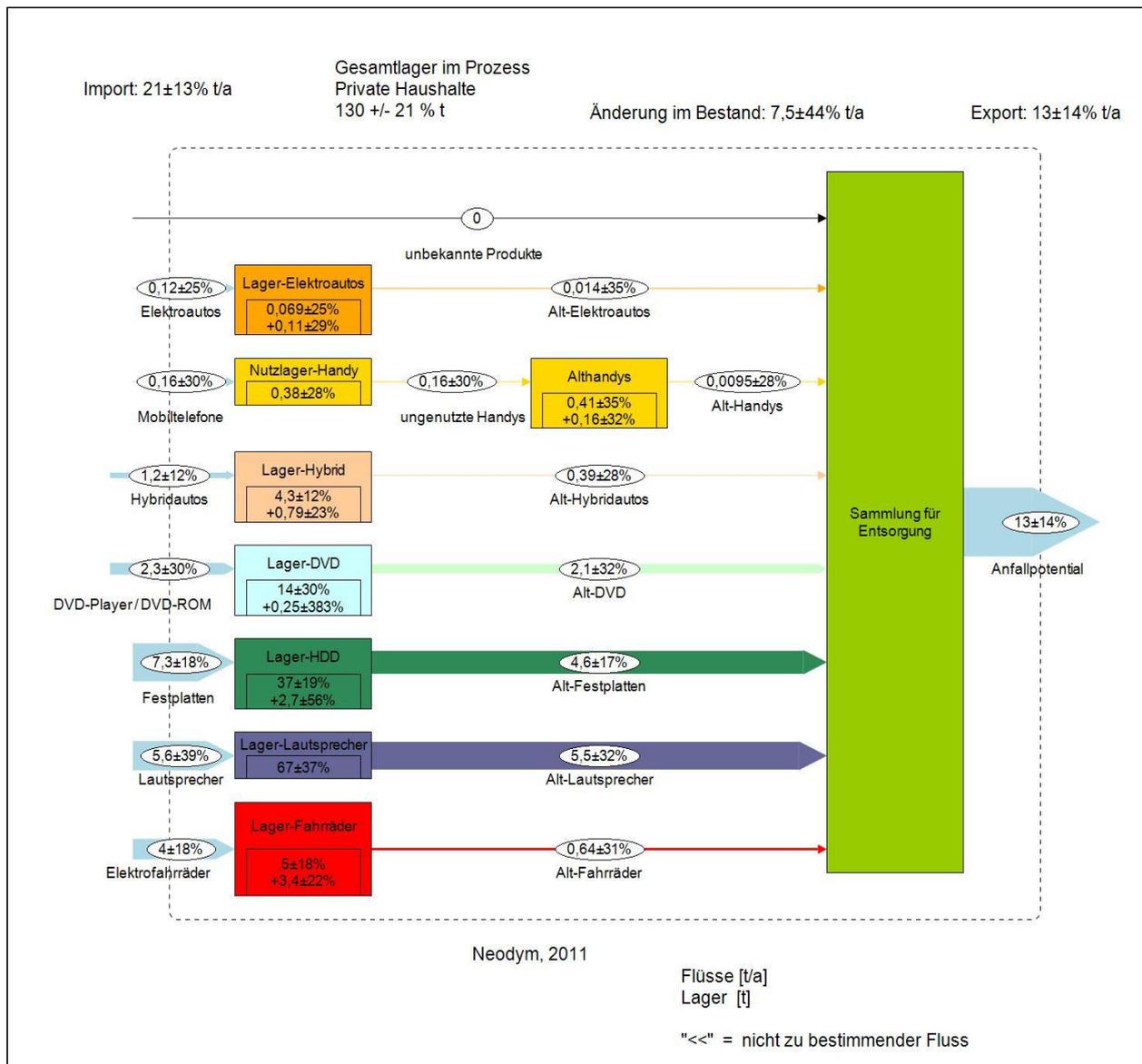


Abbildung 21: Subprozess Private Haushalte im System "Neodym in Österreich 2011" - Stoffebene – Einheit: Tonnen.

Die erwähnten fehlenden Flüsse konnten aufgrund von unzureichenden Daten nicht quantifiziert werden. Im Falle der Lautsprecher waren keine Verkaufszahlen zu finden, lediglich das Lager konnte basierend auf der Ausstattungsstatistik der Österreichischen Haushalte geschätzt werden. Die Flüsse und Lager, die ihren Ursprung beim Prozess Verarbeitende Industrie haben, konnten aufgrund fehlender Daten nicht bestimmt werden (siehe Kapitel 4.2.3).

Das gesamte Lager im Prozess Private Haushalte beläuft sich auf 130 <sup>+/- 21%</sup> Tonnen Neodym, wobei das Lager im Jahr 2011 um 7,5 <sup>+/- 44%</sup> Tonnen anwächst. In Relation zum gesamten Lager für Neodym in Österreich von 170 <sup>+/- 18%</sup> Tonnen Neodym (Gesamtlageränderung + 23 <sup>+/- 12%</sup> t Neodym), ist der Prozess Private Haushalte wohl der größte im betrachteten System.

#### 4.2.4.1 Elektroautos

Aus den in Kapitel 3 dargestellten Daten ergibt sich eine durchschnittliche Neodym-Menge von 0,193 kg <sup>+/- 0,048</sup> kg pro Elektroauto.

Ebenso wurde bereits angeführt, dass in Österreich Ende 2011 989 Elektroautos zugelassen waren und dass im Jahr 2011 631 Elektroautos neu zugelassen wurden. Diese Zulassungszahlen wurden zur Berechnung des Neodym-Flusses und –Lagers im Jahr 2011 für Elektroautos herangezogen.

Mit Hilfe der durchschnittlichen Lebensdauer eines Autos von 14 Jahren wurde das Anfallpotential berechnet und als Abfallfluss in Richtung Prozess Abfallwirtschaft geschätzt.

Tabelle 18 zeigt die berechneten Flüsse und Lager für die Elektroautos im Subprozess Private Haushalte. Bedingt durch die geringe Anzahl an Elektroautos in Österreich im Jahr 2011, ist sowohl die dadurch gelagerte Neodym-Menge gering (kg-Bereich) als auch der Fluss, der der Abfallwirtschaft und somit einem Recycling zugeführt wird, sehr klein.

**Tabelle 18: Flüsse und Lager der Elektroautos im Subprozess Private Haushalte im System "Neodym in Österreich 2011".**

	Elektroautos	Menge Neodym
<b>Input-Fluss 2011</b>	0,12 <sup>+/- 0,03</sup>	t
<b>Lager 2011</b>	0,07 <sup>+/- 0,02</sup> + 0,11 <sup>+/- 0,03</sup>	t
<b>Output-Fluss als Abfall</b>	0,01 <sup>+/- 0,00</sup>	t

Um die zukünftig aufkommenden Abfallströme und das dadurch entstehende Recyclingpotential abschätzen zu können, wird auch für die Elektroautos, Hybridautos und Elektrofahrräder eine WEIBULL-Verteilung erstellt und im Anschluss an Szenarien geknüpft.

Im Fall der Elektro- und Hybridautos sind die Szenarien von der österreichischen Regierung mögliche und angenommene Entwicklungen dieser Produkte (bmvit, 2010).

Abbildung 22 zeigt die für Elektrofahrzeuge erstellte Weibull-Verteilung anhand der in Kapitel 3.2.4.6 angeführten Parameter. Für diese Dichtefunktion gibt die Software „@ risk“ die Parameter Alpha = 4,72 und Beta = 17,86 an.

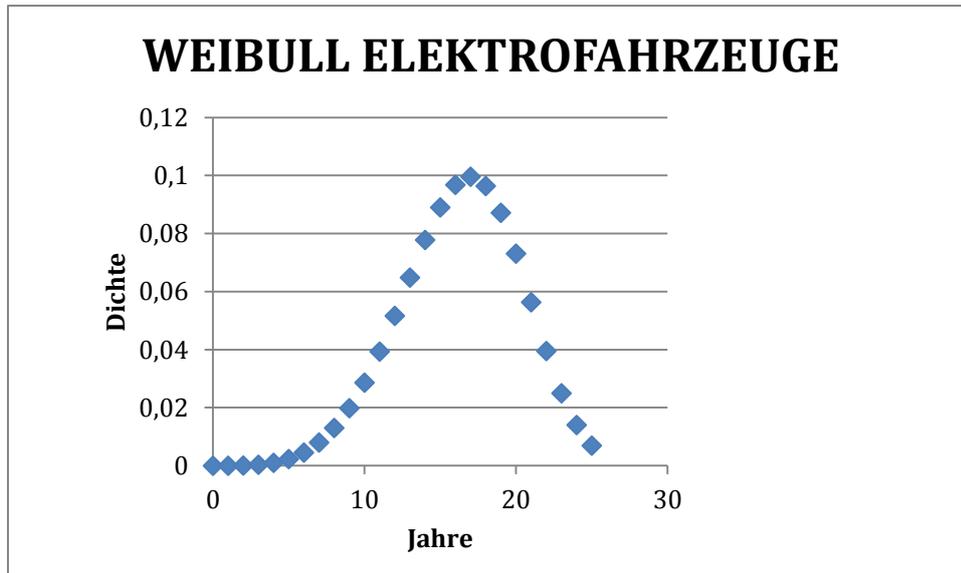


Abbildung 22: WEIBULL-Verteilung für Elektrofahrzeuge.

Im Einführungsplan für Elektromobilität (bmvit, 2010) werden für Elektroautos drei mögliche Szenarien angeführt, wovon zwei in dieser Arbeit näher betrachtet wurden.

Das erste betrachtete Szenario wird vom Bundesministerium für Verkehr als „realistisches Szenario“ bezeichnet und bedeutet, dass in Österreich im Jahr 2020 135.280 Elektroautos zugelassen sein würden. Von der Anzahl der zugelassenen Elektroautos im Jahr 2011 bis zum angenommenen Wert im Jahr 2020 wird ein lineares Wachstum angenommen (siehe Tabelle 19). Um das Recyclingpotential korrekt abschätzen zu können wird für das vergangene Wachstum des Lagers der Elektroautos ein exponentielles Wachstum angenommen.

Tabelle 19: angenommene Lagerentwicklung Elektroautos im "Szenario realistisch" und „worst-case Szenario“.

Szenario real.		Szenario worst case	
Jahr	Lager Stück	Jahr	Lager Stück
2005	2	2005	2
2006	6	2006	6
2007	17	2007	17
2008	47	2008	47
2009	130	2009	130
2010	353	2010	353
2011	989	2011	989
2012	22136	2012	1456
2013	36184	2013	1984
2014	50231	2014	2513
2015	64278	2015	3041
2016	78326	2016	3570
2017	92373	2017	4098
2018	106420	2018	4627
2019	120468	2019	5155
2020	135280	2020	5683

Abbildung 23 zeigt das entstehende Recyclingpotential, das im „Szenario realistisch“ von den, möglicherweise bis 2020, gekauften Elektroautos ausgeht. Wie bereits im Szenario Windkraft ist zu beachten, dass nur die Input-Flüsse bis ins Jahr 2020 in die Berechnungen einbezogen werden. Alle folgenden Flüsse ab dem Jahr 2020 würden das Recyclingpotential noch weiter erhöhen. Ist es der Fall, dass die Input-Flüsse ab 2020 gleich bleiben würden, würde sich ein Plateau einstellen und die anfallende Neodym-Menge pro Jahr konstant bleiben.

Wieder wird hier nicht davon ausgegangen, dass Neodym in den Anwendungen substituiert wird oder auch technologische Erneuerungen den Markt beeinflussen.

Abbildung 23 zeigt, dass im Jahr 2032 die maximale Neodym-Menge pro Jahr durch aus der Nutzung scheidende Elektroautos anfällt. In dem Jahr würden in diesem Szenario 2,1 t Neodym anfallen, die durch ein geeignetes Recycling erneut verwendet werden könnten.

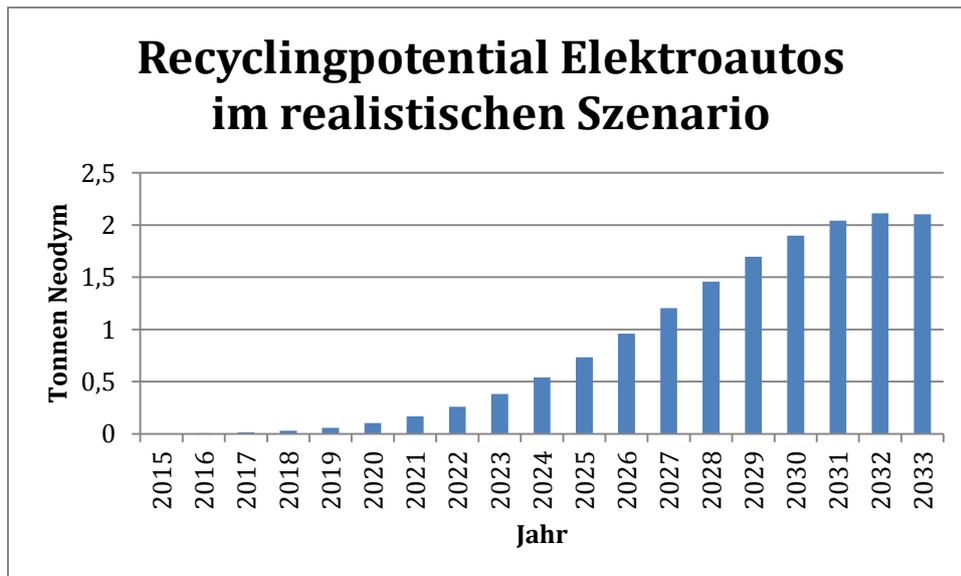


Abbildung 23: Recyclingpotential der Elektroautos im "Szenario realistisch".

Vergleicht man diese Kurve (Abbildung 23) mit der Kurve im Szenario Windkraft, liegt das Maximum, bedingt durch die kürzere Lebensdauer der Elektroautos, hier im Jahr 2032, während es bei den Windkraftwerken im Jahr 2034 liegt. Mengenmäßig fällt im Falle der Windkraft am Maximum jedoch die achtfache Menge an Neodym an.

Das zweite betrachtete Szenario wird vom Bundesministerium für Verkehr als „worst case- Szenario“ bezeichnet. In dieser Prognose wird davon ausgegangen, dass im Jahr 2020 5683 Elektroautos in Österreich zugelassen sein werden. Auch hier wird wieder ein lineares Wachstum bis 2020 angenommen (siehe Tabelle 19).

Im „worst-case Szenario“ ist mit einer sehr schleppenden Entwicklung der Elektroautos in Österreich zu rechnen. Dies ergibt in logischer Konsequenz auch ein geringeres Recyclingpotential aus dieser Anwendung. Im Jahr 2032 liegt erneut das Maximum an anfallenden Altautos aus den Jahren bis 2020, jedoch handelt es sich hierbei nur noch um 83 kg Neodym, die erneut verwendet werden könnten (siehe Abbildung 24).

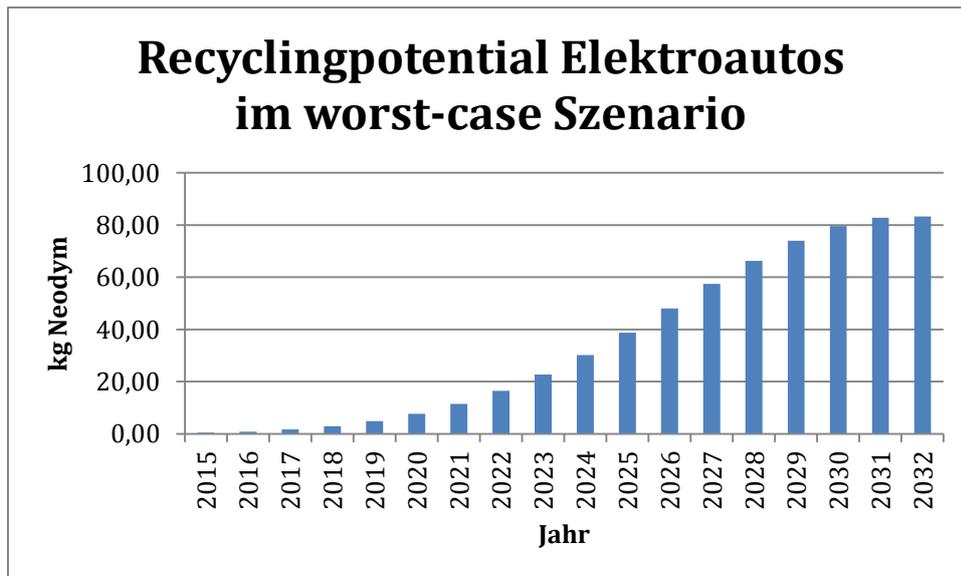


Abbildung 24: Recyclingpotential Elektroautos im "worst-case Szenario" bis 2020.

#### 4.2.4.2 Hybridautos

Aus den in Kapitel 3 angeführten Daten ergibt sich eine durchschnittliche Neodym-Menge von 0,898  $\pm$  0,112 kg pro Hybridauto. Ebenso wurde dort angeführt, dass im Jahr 2011 1320 Hybridautos neu in Österreich zugelassen wurden, wodurch Ende 2011 insgesamt 6060 Autos mit dieser Antriebstechnologie auf den Österreichischen Straßen unterwegs waren. Der Output-Fluss zum Prozess Abfallwirtschaft wurde erneut über die durchschnittliche Lebensdauer geschätzt (Anfallpotential). Die Lebensdauer wurde mit 14 Jahren angenommen. Tabelle 20 zeigt die geschätzten Neodym-Flüsse und –Lager für Hybridautos in Österreich im Jahr 2011.

Tabelle 20: Flüsse und Lager für Hybridautos im Subprozess Private Haushalte im System "Neodym in Österreich 2011".

	Hybridautos	Menge Neodym
Input-Fluss 2011	1,18 $\pm$ 0,15	t
Lager 2011	4,27 $\pm$ 0,53 + 0,79 $\pm$ 0,18	t
Output-Fluss als Abfall	0,39 $\pm$ 0,11	t

Zur Abschätzung des durch Hybridautos entstehenden Recyclingpotentials, wurde die Weibull-Verteilung aus Kapitel 4.2.4.1 herangezogen. Ebenso dienten die Szenarien des Bundesministeriums für Verkehr (bmvit, 2010) als Grundlage für die durchgeführten Berechnungen. Im ersten Szenario der Österreichischen Bundesregierung, das als „realistisches Szenario“ bezeichnet wird, würde die Anzahl der Hybridautos bis ins Jahr 2020 auf 992.874 ansteigen. Tabelle 21 zeigt die Entwicklung des

Hybridauto-Lagers unter der Annahme, dass die Stückzahlen sich vom aktuellen Ausgangspunkt weg linear entwickeln. Um das Lager auch in die Vergangenheit abschätzen zu können wurde ein exponentielles Wachstum bis zum Lagerstand 2011 gewählt. Als Jahresgrenze wird das Jahr 1997 herangezogen und das verbleibende Lager (200 Stück) als Fluss für dieses Jahr gewählt.

**Tabelle 21: Angenommene Entwicklung des Hybridauto-Lagers bis 2020 im "realistischen Szenario" und „worst-case Szenario“.**

<b>Szenario realistisch</b>		<b>Szenario worst-case</b>	
<b>Jahr</b>	Lager Stück	<b>Jahr</b>	Lager Stück
<b>1997</b>	200	<b>1997</b>	200
<b>1998</b>	255	<b>1998</b>	255
<b>1999</b>	326	<b>1999</b>	326
<b>2000</b>	416	<b>2000</b>	416
<b>2001</b>	530	<b>2001</b>	530
<b>2002</b>	677	<b>2002</b>	677
<b>2003</b>	863	<b>2003</b>	863
<b>2004</b>	1102	<b>2004</b>	1102
<b>2005</b>	1405	<b>2005</b>	1405
<b>2006</b>	1793	<b>2006</b>	1793
<b>2007</b>	2287	<b>2007</b>	2287
<b>2008</b>	2918	<b>2008</b>	2918
<b>2009</b>	3732	<b>2009</b>	3732
<b>2010</b>	4792	<b>2010</b>	4792
<b>2011</b>	6060	<b>2011</b>	6060
<b>2012</b>	163390	<b>2012</b>	23670
<b>2013</b>	266486	<b>2013</b>	35648
<b>2014</b>	369582	<b>2014</b>	47627
<b>2015</b>	472678	<b>2015</b>	59605
<b>2016</b>	575774	<b>2016</b>	71584
<b>2017</b>	678870	<b>2017</b>	83562
<b>2018</b>	781966	<b>2018</b>	95540
<b>2019</b>	885062	<b>2019</b>	107519
<b>2020</b>	992874	<b>2020</b>	120066

Abbildung 25 zeigt das entstehende Recyclingpotential, das von den 992.874 Hybridautos im „Szenario realistisch“, die sich bis 2020 auf Österreichs Straßen befinden sollen, ausgeht. An dieser Stelle ist erneut zu betonen, dass hier nur die Flüsse bis 2020 betrachtet werden und dass keine Rücksicht auf mögliche Substitutionen von Neodym oder technologische Erneuerungen genommen wird. Das Maximum an anfallendem Neodym durch Alt-Hybridautos liegt im Jahr 2033 mit 72 Tonnen, die durch ein mögliches Recycling als sekundärer Rohstoff zur Verfügung stehen würden.

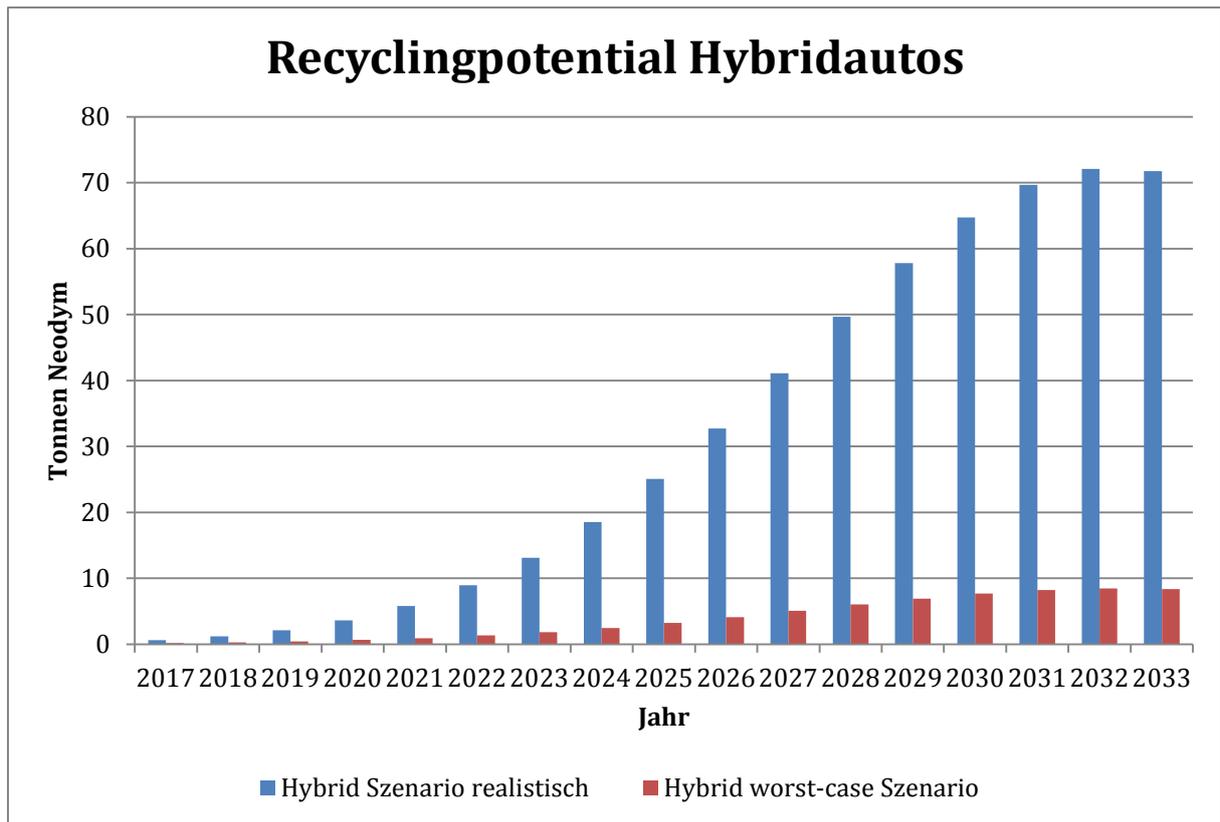


Abbildung 25: Recyclingpotential Hybridautos im "realistischen Szenario"(blau) und im „worst-case Szenario“ (rot).

Bedingt durch die größere Neodym-Menge pro Auto und der größeren Stückzahl an Hybridautos, die in Österreich zugelassen sind und vermutlich zugelassen werden, geht von den Hybridautos im Vergleich zu den Elektroautos anscheinend ein größeres Recyclingpotential aus.

Als zweites Szenario wurde, wie auch für die Elektroautos, das sogenannte „worst-case Szenario“ betrachtet. Es geht von einem Wachstum des Hybridauto-Lagers auf 120.066 Stück bis 2020 aus. In dieser Arbeit wird wieder ein lineares Wachstum von 2010 bis 2020 angenommen (siehe Tabelle 21).

Durch Verknüpfung des Szenarios mit der Weibull-Verteilung für Elektrofahrzeuge wird das in Abbildung 25 dargestellte Recyclingpotential berechnet, das von den Flüssen der Hybridautos bis 2020 ausgeht.

Das Maximum an Neodym, das durch Alt-Hybridautos aus den Jahren bis 2020 zur Verfügung stünde, liegt im Jahr 2032 bei 8,5 Tonnen Neodym.

Dies zeigt sehr klar, dass auch im Falle eines moderaten Wachstums der Hybridfahrzeuge in Österreich im korrekten Recycling dieser Fahrzeuge ein großes sekundäres Rohstoffpotential verbirgt.

#### 4.2.4.3 Elektrofahräder

Die in Kapitel 3 angeführten Daten ergeben einen durchschnittlichen Neodym-Eisen-Bor Magnetgehalt von  $0,393 \pm 0,049$  kg pro Elektrofahrzeug. Der Neodym-Gehalt der Magnete wird auf  $29,12 \pm 3,64$  % geschätzt. Der Fluss im Jahr 2011 wird mit 35.000 Elektrofahräder beziffert, das Lager Ende 2011 mit 78.500 Stück. Die Lebensdauer wird, wie für Elektroautos und Hybridautos, auf 14 Jahre geschätzt, da keine alternativen Daten dazu auffindbar waren. Diese Lebensdauer erscheint allerdings etwas zu hoch und ist hier mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Tabelle 22 zeigt die berechneten Neodym-Mengen der Flüsse und Lager der Elektrofahräder in Österreich im Jahr 2011.

**Tabelle 22: Flüsse und Lager der Elektrofahräder im Subprozess Private Haushalte im System "Neodym in Österreich 2011".**

	Elektrofahräder	Menge Neodym
<b>Input-Fluss 2011</b>	4,01 $\pm 0,71$	t
<b>Lager 2011</b>	4,98 $\pm 0,88$ + 3,36 $\pm 0,73$	t
<b>Output-Fluss als Abfall</b>	0,64 $\pm 0,20$	t

Zur Abschätzung des zukünftigen Recyclingpotentials, das von den Elektrofahrädern ausgeht, wurde erneut die Weibull-Verteilung aus Kapitel 4.2.4.1 herangezogen und auf ein Szenario bis ins Jahr 2020 angewendet. Da kein Regierungsplan zur Entwicklung der Elektrofahräder vorlag, wurde ein lineares Wachstum des Lagers mit der gleichen Steigung wie zwischen den Jahren 2008-2011 angenommen.

Tabelle 23 zeigt die angenommene Entwicklung der jährlich verkauften Elektrofahräder bis ins Jahr 2020, die zur Schätzung des Recyclingpotentials für Neodym herangezogen wurde. In diesem Szenario würden im Jahr 2020 in Österreich 112.200 Elektrofahräder verkauft werden.

Tabelle 23: Angenommenes Szenario und Entwicklung der jährlichen Flüsse an Elektrofahrrädern bis ins Jahr 2020.

Jahr	Fluss Stück	Jahr	Fluss Stück
2008	8000	2007	6500
2009	12000	2006	5000
2010	20000	2005	3500
2011	35000	2004	2000
2012	41000	2003	500
2013	49900		
2014	58800		
2015	67700		
2016	76600		
2017	85500		
2018	94400		
2019	103300		
2020	112200		

Durch Verknüpfung des Szenarios mit der dazugehörigen Weibull-Funktion kann das Recyclingpotential, das von den Elektrofahrräder-Flüssen von 2003 bis 2020 ausgeht, geschätzt werden (siehe Abbildung 26). Das Maximum der anfallenden Neodym-Menge in Alt-Elektrofahrrädern liegt im Jahr 2033 bei 6,8 Tonnen.

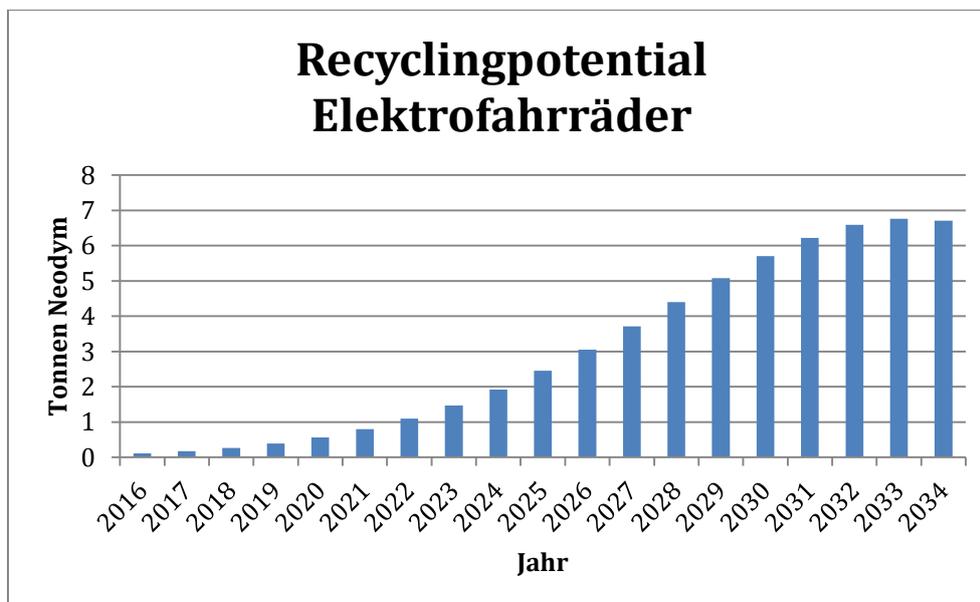


Abbildung 26: Recyclingpotential der Elektrofahrräder im Szenario bis 2020.

Durch die relativ große Stückzahl an Elektrofahrrädern in Österreich und unter Annahme der gleichbleibenden, linearen Entwicklung der Verkaufszahlen für diese Produkte, liegt hier ein großes Potential zur Nutzung selbiger als sekundäre Rohstoffe. In dieser Arbeit wurde mit der durchschnittlichen Lebensdauer der Autos gerechnet. Wenn jedoch die Lebensdauer kürzer sein sollte, könnte es sein, dass diese Rohstoffquellen noch kurzfristiger einem Recycling zugänglich wären.

#### 4.2.4.4 Festplatten – HDDs

Aus den in Kapitel 3 bereits dargestellten Daten ergibt sich, dass pro Festplatte in einem PC  $19,4^{+/-2,425}$  g Neodym-Eisen-Bor Permanentmagnet verbaut sind. Erneut wird mit einer Neodym-Konzentration von  $29,12^{+/-3,64}$  % gerechnet.

Laut Statistik Austria (2011 b) besitzen 78,1 % der Österreichischen Haushalte einen Computer. Da nach eigener Abschätzung angenommen wird, dass sich in vielen Haushalten mehr als ein Computer befindet (inklusive Laptops und Tablet-PCs) wird in dieser Arbeit geschätzt, dass 78,1% der Österreichischen Bevölkerung einen Computer besitzen.

Folglich wird bei einer Einwohnerzahl von 8,4 Millionen, von 6,56 Millionen Computern ( $^{+/- 820.050}$ ) in den Österreichischen Haushalten ausgegangen.

Da keine Computer-Verkaufszahlen für Österreich im Jahr 2011 gefunden werden konnten, wurde der Input-Fluss über die Verkaufszahlen in Deutschland geschätzt. Laut Bitkom (2011 a) wurden in Deutschland im Jahr 2011 13,4 Millionen Computer verkauft. Für Österreich wird in dieser Arbeit aus diesem Grund ein Input-Fluss von 1,3 Millionen Computern ( $^{+/- 325.000}$ ) geschätzt.

Um den Output-Fluss abschätzen zu können, wird, aufgrund fehlender Daten, das Anfallpotential mit Hilfe der mittleren Lebensdauer ( $8^{+/- 1}$  Jahre) berechnet. Tabelle 24 zeigt die berechneten Neodym-Flüsse und -Lager für Festplatten im Subprozess Private Haushalte.

**Tabelle 24: Berechnete Flüsse und Lager für Festplatten im Subprozess Private Haushalte im System "Neodym in Österreich 2011".**

	Festplatten	Menge Neodym
Input-Fluss 2011	7,34 $^{+/- 1,30}$	t
Lager 2011	37,06 $^{+/- 6,97}$ + 2,71 $^{+/- 1,53}$	t
Output-Fluss als Abfall	4,63 $^{+/- 0,82}$	t

Da für die Computer, die Festplatten enthalten, keine genauen Abfalldaten für Österreich vorhanden sind, wird auch hier zur Abschätzung des Recyclingpotentials eine Weibull-Verteilung erstellt. Aus den in Kapitel 3.2.4.6 dargestellten Parametern wird mit der Software „@ risk“ die dazugehörige Dichtefunktion erstellt und die Weibull-Parameter Alpha und Beta bestimmt.

Abbildung 27 zeigt die Weibull-Dichtefunktion, die für Elektronische Geräte definiert wurde, jedoch im Rahmen dieser Arbeit nur auf Festplatten angewendet wurde. Für diese Funktion sind die Parameter Alpha = 2,26 und Beta = 5,16.

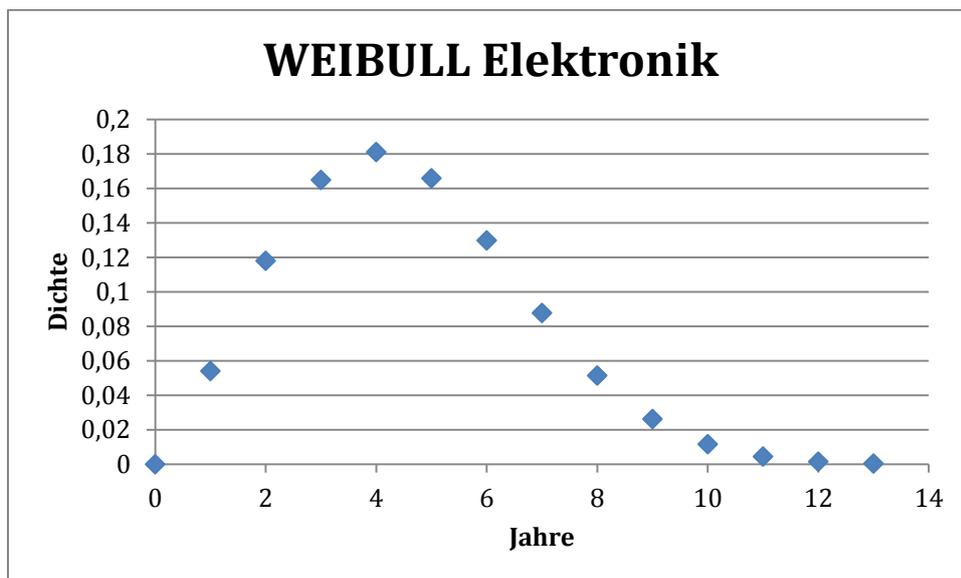


Abbildung 27: Weibull-Dichtefunktion für Elektronische Geräte (z.B Festplatten).

Zur Abschätzung des anfallenden Recyclingpotentials durch Festplatten wird erneut versucht ein Szenario zu definieren. Da keine Daten zur Entwicklung der Computer-Verkaufszahlen gefunden werden konnten, wurde angenommen, dass die jährlichen Flüsse von 2011 bis 2020 konstant bei 1,3 Millionen Stück blieben. Da eine Anwendung der Weibull-Dichtefunktion, bedingt durch das fehlende Szenario und die Annahme, dass das Lager konstant bleibt, nicht zielführend erscheint, wird das Recyclingpotential über das Anfallpotential (820.050 Stück) berechnet. Es wird folglich davon ausgegangen, dass auf Grund des konstanten Lagers jedes Jahr dieselbe Stückzahl an Festplatten aus der Nutzung scheidet. Für die Mobiltelefone wird selbiges angenommen.

Abbildung 28 stellt das Recyclingpotential dar, das von den möglichen Flüssen bis 2020 ausgeht und wann die anfallenden Neodym-Mengen einem Recycling zugänglich wären. Das Recyclingpotential

liegt konstant bei jährlich 4,6 Tonnen Neodym, die aus den anfallenden Alt-Festplatten wiedergewonnen werden könnten.

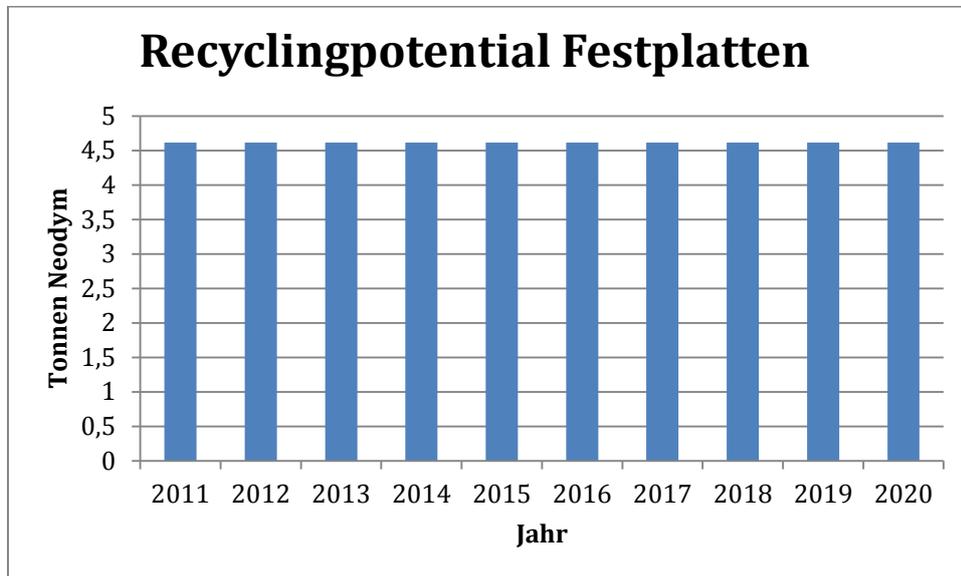


Abbildung 28: Recyclingpotential der Festplatten bei konstanten Flüssen bis 2020.

#### 4.2.4.5 Mobiltelefone

Die in Kapitel 3 angeführten Daten ergeben eine durchschnittliche Neodym-Menge von  $0,05^{+/- 0,0125}$  g pro Mobiltelefon. Da 91 % der Österreicher ein Mobiltelefon besitzen, ergibt das bei 8,4 Millionen Einwohnern, eine Stückzahl von 7,64 Millionen  $+/- 955.000$  in den Österreichischen Haushalten. Diese Zahl wird in Folge als „Nutzlager“ bezeichnet, da sich auch viele Mobiltelefone in einem „ungenutzten Lager“ befinden. Wie bereits erwähnt, wurden im Jahr 2011 3,3 Millionen  $+/- 825.000$  Mobiltelefone in Österreich verkauft, die den Input-Fluss in das Nutzlager darstellen. Ausgehend von der Schätzung des ungenutzten Handylagers für Deutschland (siehe Kapitel 3), wird für Österreich geschätzt, dass 8,3 Millionen  $+/- 2.075.000$  Mobiltelefone ungenutzt in den Schubladen und Kästen der Österreichischen Haushalte lagern. Anhand der geschätzten mittleren Lebensdauer von 2  $+/- 0,25$  Jahren, wird das Anfallpotential berechnet, das dem Output-Fluss ins ungenutzte Lager entspricht. Anhand der in Kapitel 3 dargestellten Daten werden in Deutschland 5 % der Alt-Mobiltelefone einem kontrollierten Recycling übergeben. Dieser Prozentsatz der Alt-Mobiltelefone entspricht hier dem Output-Fluss vom ungenutzten Lager zur Abfallwirtschaft. Tabelle 25 zeigt die berechneten Flüsse und Lager für Neodym in Mobiltelefonen im Subprozess Private Haushalte. Trotz der großen Anzahl

an Mobiltelefonen ist die gelagerte Neodym-Menge aus Mobiltelefonen im Prozess Private Haushalte relativ gering. Da Input- und Output-Fluss leicht variieren, werden sie gleichgesetzt, da anzunehmen ist, dass das Lager für Mobiltelefone in den Privaten Haushalten konstant ist.

Tabelle 25: Flüsse und Lager der Mobiltelefone im Subprozess Private Haushalte im System "Neodym in Österreich 2011".

	Mobiltelefone	Menge Neodym
Input-Fluss 2011	0,17 <sup>+/- 0,06</sup>	t
Lager 2011	0,38 <sup>+/- 0,11</sup>	t
Output-Fluss ins ungenutzte Lager	0,17 <sup>+/- 0,06</sup>	t
Output-Fluss kontrolliertes Recycling zur Abfallwirtschaft	0,01 <sup>+/- 0,00</sup>	t
Ungenutztes Lager 2011	0,41 <sup>+/- 0,15</sup> + 0,16 <sup>+/- 0,06</sup>	t

Um, wie auch für einige andere Produkte, das Recyclingpotential abschätzen zu können, wird auch für die Mobiltelefone eine Weibull-Verteilung erstellt. Da Mobiltelefone mit einer durchschnittlichen Lebensdauer von ungefähr zwei Jahren bis maximal 5 Jahren kürzer in den Privaten Haushalten gelagert werden, kann die Weibull-Funktion der Elektronischen Geräte nicht herangezogen werden. Abbildung 29 zeigt die Weibull-Funktion der Mobiltelefone, deren Parameter Alpha = 1,97 und Beta = 3,29 sind.

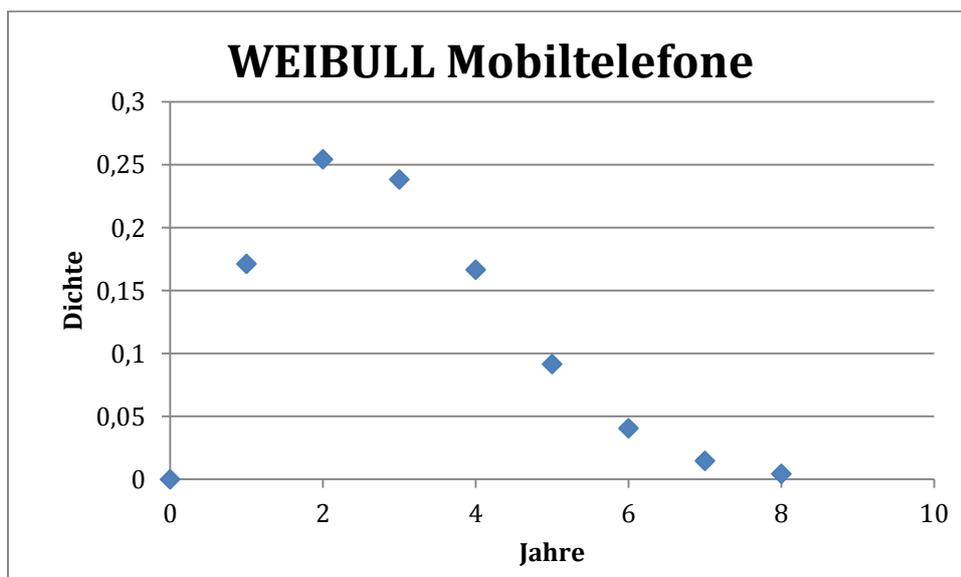


Abbildung 29: Weibull-Dichtefunktion für Mobiltelefone

Auch für die Mobiltelefone wurde versucht ein Szenario zu erstellen, jedoch liegen keine Daten vor, wie sich die Verkaufszahlen der Mobiltelefone entwickeln könnten. Da jedoch in dieser Arbeit davon ausgegangen wird, dass 91% der Österreicher ein Mobiltelefon besitzen, ist anzunehmen, dass dieser Markt bis zu einem gewissen Maß gesättigt ist. Dem Szenario liegt zugrunde, dass die Verkaufszahlen von 2011 bis 2020 konstant bei 3,3 Millionen Mobiltelefonen pro Jahr liegen. Wie auch bei den Festplatten wird anstatt mit der definierten Weibull-Funktion mit den jährlichen Anfallpotentialen (3.300.00 Stück) gerechnet, um das Lager für Mobiltelefone auch in das Recyclingpotential einbeziehen zu können.

In Abbildung 29 wird das Recyclingpotential der Mobiltelefone bis ins Jahr 2020 dargestellt.

Die recycelbare Neodym-Menge aus den Mobiltelefonen liegt konstant bei 165 kg pro Jahr. Würde, z.B die Sammelquote der Mobiltelefone, die einem kontrollierten Recycling überführt werden, weiterhin bei 5 % bleiben, hieße das, dass pro Jahr 8 kg Neodym aus Mobiltelefonen gewonnen werden könnten.

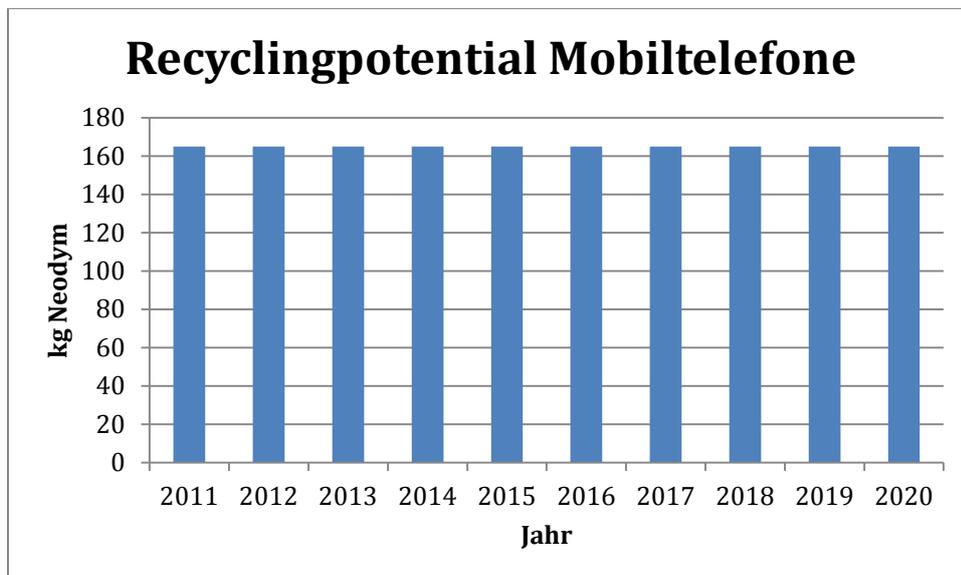


Abbildung 30: Recyclingpotential für Mobiltelefone im konstanten Szenario bis 2020.

#### 4.2.4.6 DVD-Player

Im Fall der DVD-Player beziehungsweise DVD-Laufwerke werden alle DVD-Player als auch alle Computer (Annahme: alle mit DVD Laufwerk) in die Rechnung einbezogen.

Wie in Kapitel 3 erörtert, wird angenommen, dass in jedem DVD-Player / -Laufwerk  $5^{+/- 1,25}$  g Neodym-Eisen-Bor Permanentmagnet verbaut ist, wieder unter der Voraussetzung, dass die Neodym-Konzentration bei  $29,12^{+/- 3,64}$  % liegt.

Das Lager für DVD-Player und –Laufwerke (in DVD Playern und Computern) beläuft sich 2011 auf insgesamt  $9.336.250^{+/- 1.074.275}$  Stück.

Der Input-Fluss für das Jahr 2011 wird anhand der deutschen Verkaufszahlen für DVD-Player geschätzt und mit den angenommenen Verkaufszahlen der Computer 2011 vereint. Dies ergibt insgesamt einen Input-Fluss von  $1.600.000^{+/- 333.542}$  Stück.

Für DVD-Player wird zur Abschätzung des Abfallstroms eine durchschnittliche Lebensdauer von  $6,5^{+/- 0,8125}$  Jahren angenommen.

Tabelle 26 zeigt die berechneten Flüsse und Lager für Neodym in DVD-Playern und -Laufwerken im Subprozess Private Haushalte.

**Tabelle 26: Flüsse und Lager DVD-Player und -Laufwerke im Subprozess Private Haushalte im System "Neodym in Österreich 2011".**

	DVD-Player / -Laufwerke	Menge Neodym
<b>Input- Fluss 2011</b>	$2,33^{+/- 0,70}$	t
<b>Lager 2011</b>	$13,59^{+/- 4,11} + 0,24^{+/- 0,98}$	t
<b>Output-Fluss zum Prozess Abfallwirtschaft</b>	$2,09^{+/- 0,68}$	t

#### 4.2.4.7 Lautsprecher (für HiFi-Anlagen)

Im Falle der Lautsprecher für HiFi-Anlagen konnte nur das Lager und der Output-Fluss abgeschätzt werden, nicht jedoch der Input-Fluss im Jahr 2011. Da zum Input-Fluss keine Daten vorliegen, wird er dem Output-Fluss zur Abfallwirtschaft gleichgesetzt.

Laut der in Kapitel 3 angeführten Daten ergibt sich für einen 0,75 kg Lautsprecher mit 50 Watt Leistung ein Neodym-Eisen-Bor Permanentmagnet Gehalt von  $50^{+/- 12,5}$  g, bei erneuter Neodym-Konzentration von  $29,12^{+/- 3,64}$  %.

Des Weiteren wird von einer Lautsprecher-Stückzahl im Lager 2011 von  $4.614.400^{+/- 1.153.600}$  ausgegangen.

Zur Abschätzung des Output-Flusses zur Abfallwirtschaft wird eine durchschnittliche Lebensdauer von  $12^{+/- 1,5}$  Jahren angenommen.

Tabelle 27 stellt das berechnete Neodym-Lager und den Output-Fluss zum Prozess Abfallwirtschaft dar.

Tabelle 27: Flüsse und Lager für Lautsprecher im Subprozess Private Haushalte im System "Neodym in Österreich 2011".

	Lautsprecher für HiFi-Anlagen	Menge Neodym
Input-Fluss 2011	$5,60^{+/- 2,21}$	t
Lager 2011	$67,19^{+/- 25,19}$	t
Output-Fluss zum Prozess Abfallwirtschaft	$5,60^{+/- 2,21}$	t

#### 4.2.5 Ergebnisse Prozess Abfallwirtschaft

Zur Berechnung des Abfallflusses vom Prozess Private Haushalte zum Prozess Abfallwirtschaft, wurden die Anfallpotentiale der einzelnen Produkte über deren Lebensdauer geschätzt. Im Fall der Mobiltelefone wurde zusätzlich die Sammelrate von 5 % in die Rechnung einbezogen.

Abbildung 31 zeigt den Subprozess Abfallwirtschaft im System „Neodym in Österreich 2011“. Dieses Systembild soll darstellen, dass Abfallflüsse im ersten Schritt einer Sortierung unterzogen werden. Im Anschluss wird ein Teil der Rohstoffe einem Recycling (Fluss „Abfall für Recycling“) zugeführt, ein Teil wird auf der Deponie endgültig abgelagert (Fluss „nicht recycelter Abfall“). Des Weiteren verbleiben auch im Recycling Reste, z.B in der Schlacke (Fluss „nicht recycelbare Überreste“), die schlussendlich zur Deponie überführt werden. Wiedergewonnene Rohstoffe können erneut der verarbeitenden Industrie zur Verwertung übergeben werden.

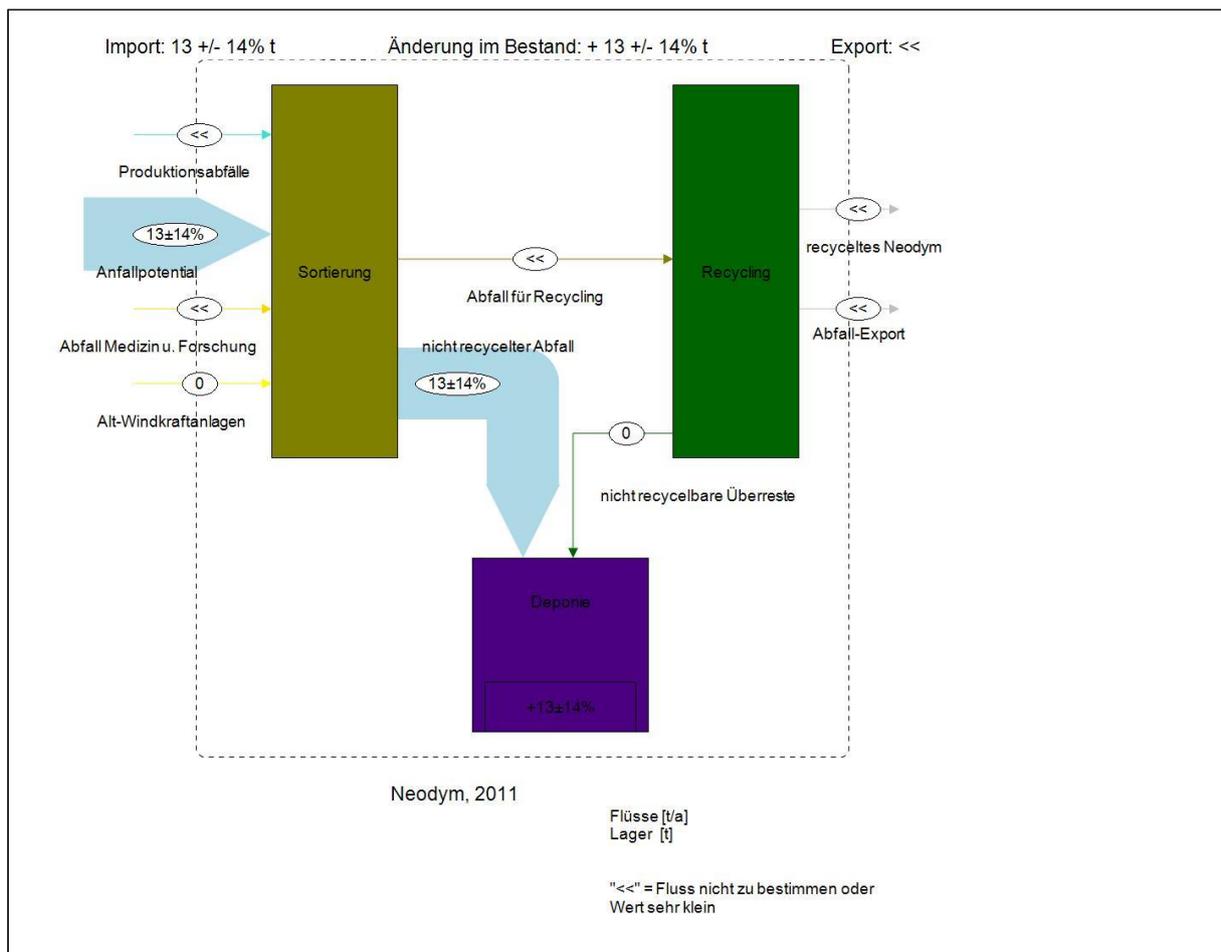


Abbildung 31: Subsystem „Abfallwirtschaft“ im System "Neodym in Österreich 2011" – Stoffebene-Neodym.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte kein Recycling von Neodym in Österreich festgestellt werden, da dies momentan noch nicht wirtschaftlich rentabel und teilweise auch technisch noch nicht umsetzbar ist. Deshalb wird hier vorerst angenommen, dass alle Neodym-haltigen Abfallfraktionen aus den Produkten der Privaten Haushalte auf einer Deponie enden. Dies bezieht nicht mit ein, dass einige Alt-Produkte auch ins Ausland exportiert werden. Zu dieser Thematik konnten jedoch keine quantitativen Daten gefunden werden.

Tabelle 28 zeigt die einzelnen Abfallflüsse der Produkte des Prozesses Private Haushalte.

Insgesamt fallen im Jahr 2011 aus diesem Prozess 13 <sup>+/- 14%</sup> Tonnen Neodym an, die wiederverwendet werden könnten.

**Tabelle 28: Geschätzte Abfallmengen pro Produktgruppe im Prozess Abfallwirtschaft, geschätzt über das Anfallpotential im System "Neodym in Österreich 2011".**

<b>Produkt</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>+/-</b>	<b>Einheit</b>	
Elektroautos	0,0137	0,0049	t	Neodym
Mobiltelefone	0,0095	0,0027	t	Neodym
Hybridautos	0,3900	0,1100	t	Neodym
Festplatten	4,6300	1,1600	t	Neodym
Elektrofahrräder	0,6400	0,2000	t	Neodym
DVD-Player	2,0910	0,6840	t	Neodym
Lautsprecher	5,6000	2,2100	t	Neodym
<b>Summe</b>	<b>13,3743</b>	<b>2,5980</b>	<b>t</b>	<b>Neodym</b>

Für Windkraftanlagen, Elektroautos, Hybridautos, Elektrofahrräder, Festplatten und Mobiltelefone wurden Szenarien erstellt, um zukünftig anfallende Neodym-Mengen, die als sekundäre Ressourcen genutzt werden können, abschätzen zu können.

Tabelle 29 und Abbildung 32 stellen die jährlich anfallenden Neodym-Mengen dar, basierend auf den bereits präsentierten Ergebnissen der Szenarien. Das Maximum an anfallendem Neodym würde im Jahr 2033 bei 36 Tonnen liegen. Wieder ist hier auch zu bemerken, dass nur die Flüsse bis 2020 in die Rechnung einbezogen werden und dass das reale Recyclingpotential noch höher liegen wird. Im Jahr 2011 wurde ein Anfallpotential für alle Produkte der Privaten Haushalte, die Neodym enthalten, von ungefähr 13 Tonnen geschätzt. Die in Abbildung 32 dargestellten Neodym-Mengen sind inklusive der Windkraftanlagen und exklusive Lautsprecher und DVD-Player zu verstehen. Dennoch ist offensichtlich, dass sie die anfallenden Neodym-Mengen bis ins Jahr 2033 beinahe verdreifachen werden und somit großes Potential für ein Recycling dieser Produkte besteht.

**Tabelle 29: Recyclingpotential für Neodym im Prozess Windkraft und in einigen Produkten aus dem Prozess Private Haushalte nach Jahren (Einheit: Tonnen).**

Jahr	Handy/t	HDD/t	E-Rad/t	Hybrid w.c/t	E-Autos w.c/t	Windkraft/t	Gesamt/t
2011	0,165	4,614	0,006	0,036	0,000	1,879	<b>6,700</b>
2012	0,165	4,614	0,012	0,048	0,000	2,457	<b>7,295</b>
2013	0,165	4,614	0,023	0,062	0,000	3,113	<b>7,976</b>
2014	0,165	4,614	0,040	0,081	0,000	3,839	<b>8,738</b>
2015	0,165	4,614	0,067	0,107	0,000	4,624	<b>9,577</b>
2016	0,165	4,614	0,109	0,146	0,001	5,454	<b>10,489</b>
2017	0,165	4,614	0,172	0,206	0,002	6,315	<b>11,474</b>
2018	0,165	4,614	0,263	0,299	0,003	7,191	<b>12,534</b>
2019	0,165	4,614	0,391	0,439	0,005	8,065	<b>13,679</b>
2020	0,165	4,614	0,565	0,644	0,008	8,927	<b>14,922</b>
2021	0,165	4,614	0,795	0,933	0,011	9,767	<b>16,285</b>
2022	0,165	4,614	1,093	1,325	0,016	10,579	<b>17,791</b>
2023	0,165	4,614	1,465	1,836	0,023	11,353	<b>19,456</b>
2024	0,165	4,614	1,918	2,477	0,030	12,082	<b>21,285</b>
2025	0,165	4,614	2,451	3,245	0,039	12,759	<b>23,272</b>
2026	0,165	4,614	3,056	4,122	0,048	13,385	<b>25,389</b>
2027	0,165	4,614	3,715	5,070	0,057	13,959	<b>27,581</b>
2028	0,165	4,614	4,403	6,031	0,066	14,483	<b>29,762</b>
2029	0,165	4,614	5,081	6,930	0,074	14,955	<b>31,819</b>
2030	0,165	4,614	5,704	7,683	0,080	15,371	<b>33,616</b>
2031	0,165	4,614	6,225	8,210	0,083	15,718	<b>35,014</b>
2032	0,165	4,614	6,592	8,451	0,083	15,977	<b>35,882</b>
2033	0,165	4,614	6,763	8,376	0,081	16,128	<b>36,126</b>

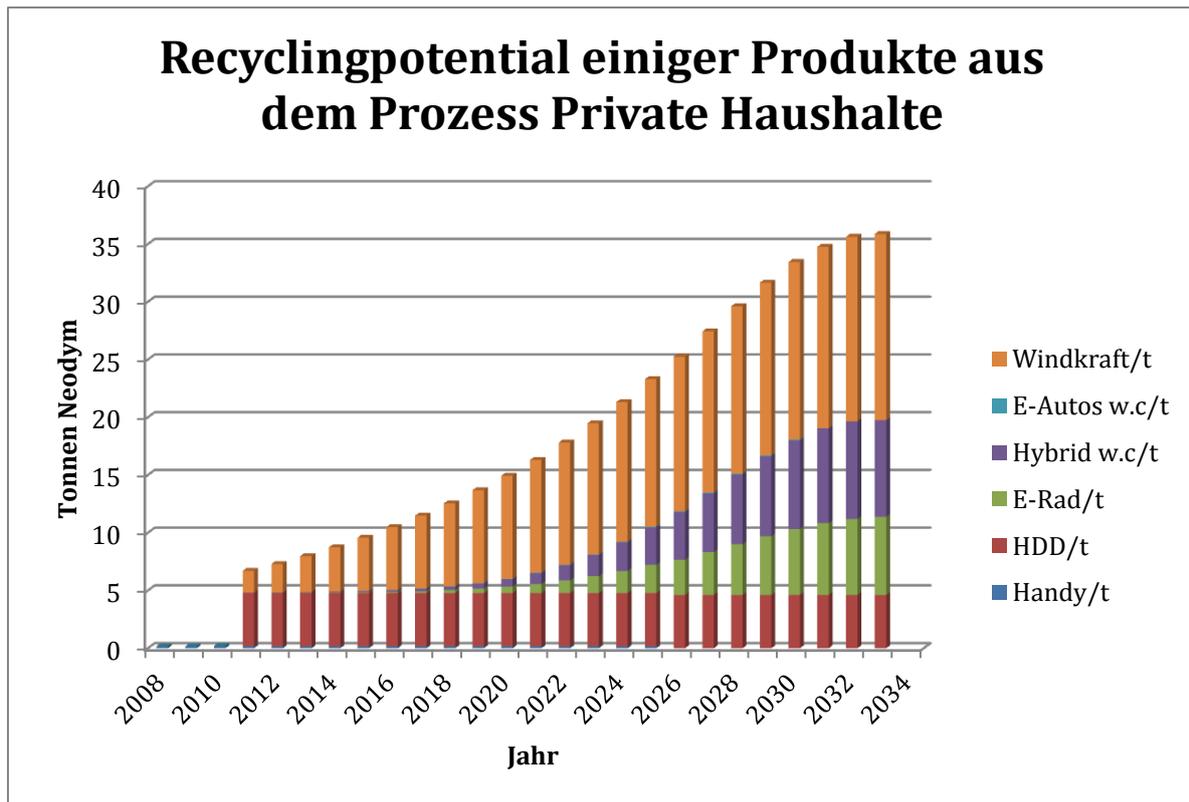


Abbildung 32: Darstellung des zukünftigen Recyclingpotentials aller dargestellten Szenarien.

Abbildung 32 zeigt das Recyclingpotential der einzelnen, in Szenarien betrachteten Produkte aus dem Prozess Private Haushalte und dem Prozess Windkraft. Bedingt durch das herangezogene Anfallpotential der Festplatten und der Mobiltelefone, bleiben die recycelbaren Neodym-Mengen dieser beiden Produkte in allen dargestellten Jahren konstant. Des Weiteren ist zu erkennen, dass bis ins Jahr 2020 die Festplatten das größte Recyclingpotential aufweisen, gefolgt von den Windkraftanlagen. In den Jahren bis 2033 entwickeln die Windkraftanlagen das größte Recyclingpotential, gefolgt von Hybrid-Autos (worst-case Szenario) und den Elektrofahrrädern.

## 5. Diskussion und Ausblick

### 5.1 Kritikalität und Stoffflussanalyse

In dieser Arbeit wurden im ersten Schritt Methoden näher betrachtet, die es ermöglichen der Kritikalität von Rohstoffen einen Wert zuzuordnen. Das Adjektiv „kritisch“ wird einem Rohstoff dann zugeschrieben, wenn es, aufgrund großer wirtschaftlicher Bedeutung und hohem Versorgungsrisiko, mit großer Wahrscheinlichkeit in einer Volkswirtschaft zu Versorgungsengpässen mit diesem Rohstoff kommen wird (siehe Kapitel 2.1). Die Anwendung der Methode der Ad-hoc Arbeitsgruppe der Europäischen Kommission (Europäische Kommission, 2010) auf die Republik Österreich zeigte, dass die wirtschaftliche Bedeutung der betrachteten Rohstoffe für Österreich geringer ist, als für die Europäische Union. Die Seltenen Erden besitzen, hinsichtlich ihres Versorgungs-Risikos für die gesamte Europäische Union, ein Alleinstellungsmerkmal. Folglich ist die Begutachtung eines dieser Seltenerdmetalle auf mögliche sekundäre Ressourcen für diese Arbeit sehr interessant.

Den Seltenen Erden sind die 15 Elemente der Lanthanoiden, sowie das Element Yttrium und in manchen Fällen auch Scandium zuzuordnen. Die Häufigkeit dieser Elemente in der Erdkruste liegt bei 0,5 bis 68 ppm, was im Vergleich zu den Platingruppenmetallen mit  $\sim 0,001$  ppm noch relativ häufig ist. Dennoch ist das Versorgungsrisiko in Bezug auf diese Elemente erhöht, da im Jahr 2011 98 % aller weltweit produzierten Seltenen Erden aus der Volksrepublik China stammten. Die Republik Österreich hat einen Anteil von 24 % an den Importen der Seltenen Erden der Europäischen Union und würde von möglichen Versorgungsengpässen wirtschaftlich beeinträchtigt sein. Seltene Erden finden Verwendung in Katalysatoren, Metallurgischen Additiven und Legierungen, Glaspoliermitteln und Keramiken, Permanentmagneten und Leuchtmitteln und sind dort, bedingt durch ihre einzigartigen Eigenschaften, schwer bis gar nicht zu ersetzen.

Das vom österreichischen Chemiker Carl Auer von Welsbach entdeckte Element Neodym, wurde in dieser Arbeit näher betrachtet. 2010 wurden 76 % des weltweit produzierten Neodyms für die Herstellung von starken Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten verwendet. 2015 soll der Prozentsatz bereits bei 90 % liegen. Zusätzlich ist eine Zunahme der Nachfrage nach diesen Magneten höher als für andere Anwendungsbereiche der Seltenen Erden. Dies ist auf den breiten Anwendungsbereich der magnetischen Legierung zurückzuführen. Sie befindet sich sowohl in Festplatten, Motoren, Fahrzeugen als auch in Akustischen Geräten, Optischen Geräten und MRTs. Lange Zeit wurde das Seltenerdmetall Samarium zur Herstellung von Permanentmagneten

verwendet, wurde aber 1984 von der Neodym-Legierung abgelöst, da diese eine höhere Energiedichte aufweist. Diese Eigenschaft ist vor allem für die Verwendung der Magneten in kleinen elektronischen Bauteilen von Relevanz (z.B. in Festplatten), da dies eine Miniaturisierung der Anwendungen ermöglicht.

Der Hauptteil dieser Arbeit war die Entwicklung eines Stoffflusssystemes für Neodym in Österreich. Nach einer ausgiebigen Recherche der Güterflüsse, die in das System eingebracht werden, wurden die Prozesse Windkraft, Private Haushalte, Verarbeitende Industrie, Medizin & Forschung und Abfallwirtschaft festgelegt. Nachdem das System qualitativ erstellt war und die einzelnen Prozesse mit Flüssen verbunden wurden, mussten Daten gesucht werden, um diese Flüsse auch quantifizieren zu können. Den Daten wurden im Anschluss Unsicherheitsbereiche zugeordnet, um die Standardabweichung anzugeben, die die Software „STAN“ benötigt, um die Berechnungen durchzuführen. Die durchgeführten Rechnungen durch Excel wurden mittels Gaußscher Fehlerfortpflanzung kalkuliert, um die Unsicherheiten in korrekter Art und Weise zu berücksichtigen.

Der Prozess Windkraft ist wohl der, der am häufigsten im Zusammenhang mit den Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten in den Medien vorkommt, wie u.a. in der Sendung Panorama im deutschen Sender „Das Erste“ unter dem Titel „Das schmutzige Geheimnis sauberer Windräder“ (Panorama, 2011). Nach eigener Recherche konnte geschätzt werden, dass 214 MW Leistung installiert sind, die durch mit NdFeB Permanentmagneten betriebene Windkraftanlagen generiert werden. In der Sendung Panorama (2011) ist davon die Rede, dass weltweit jedes fünfte Windrad mit dieser Technologie ausgestattet ist. Bei 1084 MW installierter Leistung in Österreich im Jahr 2011, würde dies 217 MW ergeben. Die Schätzung scheint daher größenordnungsmäßig korrekt zu sein. Für die Windkraft ergibt sich ein Input-Fluss von  $2,11^{+/-0,65}$  Tonnen Neodym und ein Lager von  $42,13^{+/-13,97} + 2,11^{+/-0,65}$  Tonnen Neodym. Mit über 40 Tonnen ist das Neodym-Lager im Prozess Windkraft 2011 sehr groß und würde sich prinzipiell gut für ein mögliches Recycling eignen. Jedoch sind die Lebensdauern der Windkraftanlagen durchschnittlich bei 20 bis 30 Jahren, was es schwierig macht, das gelagerte Neodym für kurzfristige Versorgungsengpässe zu verwenden. Das Szenario ergab, dass im Jahr 2034 16 Tonnen Neodym aus den bis 2020 installierten Windkraftanlagen, die ihr Lebensende erreicht haben, gewonnen werden könnten. Trotz der langen Lebensdauer der Windkraftanlagen, bergen diese ein enormes Rohstoffpotential. Der Vorteil des Neodym in den Windkraftanlagen ist, dass es in großen Mengen in Form eines einzelnen Magneten vorhanden ist, der relativ leicht ausgebaut werden könnte. Problematisch sind die großen Magnetfelder, die einen weiteren Transport verhindern. Die Materialien müssten somit entmagnetisiert werden, bevor sie an einem anderen Ort recycelt werden können, oder alternativ direkt vor Ort recycelt werden.

In den Prozess Medizin und Forschung führen die Flüsse MRT/NMR und Nd:YAG Laser. Beide Flüsse sind für ein mögliches Recycling nicht heranzuziehen. Die Verwendung von NdFeB Permanentmagneten entspricht im Fall der MRTs nicht dem aktuellen Entwicklungsstand, da hauptsächlich supraleitende Elektromagneten eingesetzt werden. Im Fall der Nd:YAG Laser ist dies zwar nicht zutreffend, jedoch ist eine Quantifizierung der Stückzahl dieses Lasertyps in der Medizin, Forschung und auch Materialverarbeitung in Österreich nicht möglich. Auch wenn der Neodym-Fluss in dieser Anwendung abgeschätzt werden könnte, ist bei einer Neodym-Konzentration von 0,8 bis 1,1 Atom - % in dieser Anwendung nicht davon auszugehen, dass es sich hier um wirtschaftlich rentable, recycelbare Mengen handelt.

Der Prozess Verarbeitende Industrie konnte ebenso nur qualitativ beschrieben werden, da aus Datenschutz-Gründen keine Angaben von der Firma Treibacher gemacht werden konnten. Es wurde lediglich preisgegeben, dass keine großen Mengen an Neodym-Verbindungen hergestellt würden, da die Firma Treibacher keine Neodym-Eisen-Bor Magneten vertreibt. Dies bedeutet folglich, dass auch keine relevanten Produktionsabfälle, die recycelt werden könnten, anfallen. Bei der Herstellung der Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten fallen 20-30 % allein an Produktionsabfall an. Des Weiteren hat Treibacher eine Exportquote von 88 %, was annehmen lässt, dass auch ein Großteil der Neodym-Verbindungen ins Ausland verkauft wird.

Der Prozess Private Haushalte hat sowohl die meisten Flüsse und Lager aufzuweisen, als auch die meisten Ergebnisse geliefert, aus denen nun Schlüsse gezogen werden sollen. Die ersten drei Flüsse, die gewissermaßen unter dem Überbegriff „Elektromobilität“ laufen, sind Elektroautos, Hybridautos und Elektrofahrräder. Für die Elektroautos wird ein Fluss im Jahr 2011 von  $0,12^{+/-0,03}$  Tonnen Neodym berechnet, ein Lager von  $0,07^{+/-0,02} + 0,11^{+/-0,03}$  Tonnen Neodym und ein Output-Fluss von  $0,01^{+/-0,00}$  Tonnen Neodym. Im „realistischen Szenario bis 2020“ liegt das Maximum an recycelbarem Neodym aus dieser Anwendung im Jahr 2032 mit 2,1 Tonnen und im „worst-case Szenario bis 2020“ im Jahr 2032 mit 83 kg. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass das „worst-case Szenario“ eher zutreffend sein könnte. Das bedeutet, dass die Neodym-Mengen aus Elektroautos zwar recycelt werden sollten, jedoch keine großen Versorgungsengpässe ausgleichen könnten. Zusätzlich sind die Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten in den Elektromotoren verbaut und nicht so leicht einem separaten Recycling zuzuführen. Sie müssten vermutlich manuell ausgebaut werden und sind somit schwieriger zugänglich als z.B. die Magneten in den Windkraftanlagen.

Für die Hybridautos wird ein Fluss im Jahr 2011 von  $1,18^{+/-0,15}$  Tonnen Neodym berechnet, ein Lager von  $4,27^{+/-0,53} + 0,79^{+/-0,18}$  Tonnen Neodym und ein Output-Fluss von  $0,39^{+/-0,11}$  Tonnen Neodym.

Im „realistische Szenario bis 2020“ liegt das Maximum an recycelbarem Neodym aus dieser Anwendung im Jahr 2032 mit 72 Tonnen und im „worst-case Szenario bis 2020“ im Jahr 2032 mit 8,5 Tonnen. In beiden Szenarien fallen durch die Alt-Hybridautos große Neodym-Mengen an, die in der Größenordnung der Windkraftanlagen liegen, jedoch durch die kürzere Lebensdauer schneller zugänglich sind. Da in den Hybridautos, sowohl im Elektromotor, als auch in der Batterie Neodym vorkommt, ist es notwendig, dass die einzelnen Komponenten so ausgebaut werden können, dass sie einem separaten Recycling zugeführt werden können. Ansonsten könnte das Neodym in der Schlacke der Eisenfraktion und folglich auf der Deponie enden.

Für die Elektrofahrräder ergibt sich ein Fluss im Jahr 2011 von  $4,01^{+/-0,71}$  Tonnen Neodym, ein Lager von  $4,98^{+/-0,88} + 3,36^{+/-0,73}$  Tonnen Neodym und ein Output-Fluss von  $0,64^{+/-0,20}$  Tonnen Neodym. Im angenommenen Szenario bis 2020 liegt das Maximum an recycelbarem Neodym aus dieser Anwendung im Jahr 2033 mit 6,8 Tonnen. Die Elektrofahrräder haben somit ein großes Potential für ein mögliches Recycling des enthaltenen Neodyms. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Motoren separat am Rad befestigt sind und somit auch leicht einem eigenen Recycling zugeführt werden könnten. Dies ist ein überraschendes Ergebnis dieser Arbeit, da dieser Fluss nicht als so bedeutend eingestuft wurde. Außerdem ist in Bezug auf die Elektrofahrräder zu beachten, dass im Szenario mit einer durchschnittlichen Lebensdauer der Autos von 14 Jahren gerechnet wurde. Vermutlich ist die reale Lebensdauer etwas kürzer, was die großen Neodym-Mengen noch kurzfristiger verfügbar machen würde.

Für die Festplatten, die als Hauptanwendung der Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten bezeichnet werden ergibt sich ein Fluss im Jahr 2011 von  $7,34^{+/-1,30}$  Tonnen Neodym, ein Lager von  $37,06^{+/-6,97} + 2,71^{+/-1,53}$  Tonnen Neodym und ein Output-Fluss von  $4,63^{+/-0,82}$  Tonnen Neodym. Im angenommenen Szenario bis 2020 liegt die Menge an recycelbarem Neodym aus den Festplatten bei 4,6 Tonnen. Im Vergleich zu den anderen Anwendungen sind die in den Festplatten gelagerten Neodym-Mengen sehr kurzfristig und in großem Ausmaß verfügbar. Für ein mögliches Recycling ist es besonders wichtig, die Festplatten ohne großen manuellen Arbeitsaufwand ausbauen zu können, um sie einer separaten Behandlung zuzuführen.

Für die Mobiltelefone ergibt sich ein Input-Fluss im Jahr 2011 von  $0,17^{+/-0,06}$  Tonnen Neodym, ein genutztes Lager von  $0,38^{+/-0,11}$  Tonnen Neodym, ein Fluss vom genutzten ins ungenutzte Lager von  $0,17^{+/-0,06}$  Tonnen Neodym und ein Output-Fluss zum Prozess Abfallwirtschaft von  $0,01^{+/-0,00}$  Tonnen Neodym. Das Ungenutzte Lager an Mobiltelefonen beläuft sich auf  $0,42^{+/-0,15} + 0,16^{+/-0,06}$  Tonnen Neodym. Im angenommenen Szenario liegt die Menge an recycelbaren Neodym aus Mobiltelefonen konstant bei 165 kg. Dies entspricht den in diesem Jahr aus der Nutzung scheidenden

Mobiltelefonen. Würde die Sammelquote für Mobiltelefone weiterhin nur im Bereich von 5 % liegen, könnten nur 8 kg des Neodyms daraus gewonnen werden. Die Mobiltelefone werden, bedingt durch ihre Handlichkeit und da sie oft trotz Funktionstüchtigkeit durch ein neues Modell ersetzt werden, häufig in Schubladen in den Haushalten gelagert, im Restmüll entsorgt oder an Freunde und Bekannte weitergegeben. Hier ist es wohl erforderlich, dass in Zukunft die Bevölkerung besser informiert wird, dass ihre Alt-Geräte ein großes Recyclingpotential aufweisen. Für Neodym sind die Mobiltelefone keine essentielle, sekundäre Rohstoffquelle, da die Neodym-Mengen schlicht zu gering sind. Jedoch enthalten die Geräte zahlreiche andere Elemente, wie Platin, Gold und Kupfer, die durch eine effiziente Sammlung und typgerechtes Recycling einer erneuten Verwendung zugeführt werden könnten.

Für die DVD-Player und –Laufwerke ergibt sich ein Fluss im Jahr 2011 von  $2,33^{+/- 0,70}$  Tonnen Neodym, ein Lager von  $13,59^{+/- 4,11} + 0,24^{+/- 0,98}$  Tonnen Neodym und ein Output-Fluss zur Abfallwirtschaft von  $2,09^{+/- 0,68}$  Tonnen Neodym. Die DVD-Player haben sich als relativ großes Lager und somit als potentielle Neodym-Quelle erwiesen. Leider konnte nur eine Quelle gefunden werden, die die Neodym-Menge in einem DVD-Player / -Laufwerk angibt. Dies könnte bedeuten, dass Neodym in diesem Produkt noch nicht wirklich als potentielles sekundäres Recyclingpotential wahrgenommen wurde. Auch für die DVD Player gilt, dass die Sammelquote hoch sein muss, damit das Potential auch dementsprechend genutzt werden kann. Auch die DVD-Player könnten wie die Mobiltelefone zu Hause gelagert werden oder im Restmüll entsorgt werden, anstatt einer geregelten Entsorgung zugeführt zu werden.

Für die Lautsprecher in Stereoanlagen ergibt sich ein geschätztes Lager von  $67,19^{+/- 25,19}$  Tonnen Neodym und ein Input-Fluss und Output-Fluss von  $5,60^{+/- 2,21}$  Tonnen Neodym. Das Lager ist mit einer großen Unsicherheit behaftet, da die Angaben zur Neodym-Menge in Lautsprechern auf das Gesamtgewicht des Lautsprechers (0,75 kg) bezogen sind. Zu den Lautsprechern in den Österreichischen Haushalten sind jedoch keine genauen statistischen Informationen vorhanden, lediglich die Stückzahl konnte über die Ausstattungsstatistik der Haushalte geschätzt werden. Nichtsdestotrotz handelt es sich bei den Lautsprechern um eine potentielle Neodym-Quelle, da sie auf alle Fälle Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten enthalten. Da die verwendete Quelle angibt, dass in einem 0,75 kg schweren Lautsprecher 50 g Neodym-Eisen-Bor Magnet verbaut sind, handelt es sich dabei vermutlich auch um Mengen, die sich für ein Recyceln lohnen und relativ leicht ausgebaut werden könnten. Wieder hat es oberste Priorität in der Bevölkerung das Bewusstsein zu schaffen, dass in ihren Geräten wertvolle Bestandteile vorhanden sind, die sich für eine weitere Verwendung eignen und in den entsprechenden Sammelstellen abgegeben werden müssen.

Für den Prozess Abfallwirtschaft ergibt sich ein Input-Fluss von 13 <sup>+/- 14%</sup> Tonnen Neodym aus dem Prozess Private Haushalte. Da keine genauen Informationen zu den gesammelten Stückzahlen der einzelnen Produkte vorliegen, wurden die Anfallpotentiale der einzelnen Lager im Subprozess Private Haushalte geschätzt. Lediglich für die Mobiltelefone wurde angenommen, dass wie in Deutschland 5 % des Anfallpotentials ordentlich gesammelt werden. Da aus momentaner Sicht kein Recycling von Neodym durchgeführt wird, da es wirtschaftlich und energetisch aufwendig ist dieses Element aus dem Abfall zu extrahieren, wird angenommen, dass diese genannte Neodym-Menge auf der Deponie und somit im Lager des Subprozesses Abfallwirtschaft landet. Da auch keine Informationen zu möglichen Abfallexporten der einzelnen Produkte vorliegen, kann auch dies hier nicht einbezogen werden. Basierend auf den Szenarien könnte das recycelbare Neodym bis ins Jahr 2033 auf 36 Tonnen ansteigen und sich damit mehr als verdoppeln.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass es einige Flüsse und Lager in Österreich gibt, die sich für ein Recycling eignen würden. Im nächsten Schritt wäre es essentiell ein System zu entwickeln, das es ermöglicht diese Produkte, vor allem aus den Privaten Haushalten, nach Beendigung ihrer Lebensdauer zu sammeln und möglichst effizient einem Recycling zuführen zu können. Auch technologisch müssten Methoden etabliert werden, die es wirtschaftlich möglich machen, Neodym aus den ausgeschiedenen Produkten zu extrahieren. Des Weiteren wäre es auch von Vorteil, wenn die Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten mit geringem manuellem Aufwand aus den einzelnen Produkten entfernt werden könnten, um das Recycling zu erleichtern.

## 5.2 Datenlage

Ein gesondertes Diskussionskapitel wird an dieser Stelle noch der Datenlage gewidmet. Das Hauptaugenmerk lag in dieser Arbeit auf der Erstellung eines Stoffflusssystems für Neodym in Österreich, um einen ersten Eindruck zu gewinnen, wo und in welchen Mengen Neodym in unserer Gesellschaft verborgen ist. Die drohenden Versorgungsengpässe durch mögliche Exportrestriktionen Chinas lassen viele Regierungen Europas und die Europäische Union intensiv nach Alternativen Rohstoffquellen suchen. Diese können jedoch nur genutzt werden, wenn sie bekannt sind und wenn die Infrastruktur und das notwendige Know-How vorhanden sind, um die Rohstoffe wieder verwenden zu können.

Für die Erstellung der Stoffflussanalyse wurde versucht die Rohstoffimporte an Neodym für Österreich zu quantifizieren. Dies war jedoch nicht möglich, da die Nutzung von Neodym im

Wesentlichen auf eine einzige Firma begrenzt ist und die Firma Treibacher aus Datenschutz-Gründen keine Angaben dazu machen wollte. Zusätzlich fügte die Auskunftsperson jedoch hinzu, dass die produzierten Mengen nicht relevant seien, da keine Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten hergestellt würden. Dennoch wäre es für die Erstellung einer Neodym-Stoffflussanalyse wichtig zu wissen, welche Neodym-Mengen als Rohstoff importiert werden. Des Weiteren konnten keine Angaben gemacht werden, welche Mengen an Neodym-Verbindungen hergestellt werden, welche Firmen diese weiterverwenden und wie viel davon exportiert wird. Somit ist hier ein ganzer Prozess als großes Fragezeichen darzustellen, ebenso ein damit verbundenes, mögliches Recyclingpotential, das sich in diesem verbirgt. Hier ist zu überlegen was zukünftig wichtiger ist: die betriebswirtschaftliche oder die volkswirtschaftliche Sicht.

Für die einzelnen Güter des Prozesses Private Haushalte existieren bereits einige Berichte, vor allem vom Öko-Institut in Deutschland, die sich mit der Thematik der Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten in diesen Anwendungen beschäftigen. Es lassen sich vereinzelt Datenquellen zu den Mengen an Neodym bzw. Magnet in den einzelnen Produkten finden, die eine Quantifizierung der Flüsse und Lager ermöglichen. Jedoch ist es teilweise schwierig die Stückzahl der Produkte in den Flüssen und Lagern abzuschätzen, da die statistischen Daten nicht ausreichend genau sind. Für Elektroautos, Hybridautos und Elektrofahrräder existieren sehr exakte Zulassungsdaten und Verkaufszahlen, für viele andere Produkte jedoch nicht. Für Mobiltelefone, DVD-Player, Festplatten und Lautsprecher musste die Ausstattungstatistik der Österreichischen Haushalte und Deutsche Verkaufszahlen herangezogen werden. Hier wäre es nützlich, wenn von österreichischer Seite genauere Angaben verfügbar wären. Bezüglich der Lebensdauern der einzelnen Produkte wurden einige Informationen gefunden, jedoch nicht zu den Sammelquoten. Für eine genauere Erstellung einer Stoffflussanalyse zu diesem Thema sollten die gesammelten Elektrogeräte eventuell stückweise registriert werden, um die anfallenden Neodym-Mengen genauer quantifizieren zu können.

Im Prozess Windkraft war es zwar möglich die Lager und Flüsse abzuschätzen, jedoch wäre es auch hier zielführend, wenn genauere statistische Daten zu Neodym in Windkraftanlagen gesammelt würden. Die Thematik dürfte auch für einige Anlagenhersteller noch nicht von allzu großer Brisanz sein, da viele auf den übermittelten Fragebogen nicht zu antworten vermochten. Nur wenige der Hersteller waren hier löbliche Ausnahmen.

Für den Prozess Abfallwirtschaft gilt, dass hier Informationen über den Verbleib der Altwaren notwendig wären. Wie viele der einzelnen Produkte werden einer geordneten Abfallsammlung übergeben? Was passiert mit den verbleibenden Geräten? Wie viel wird exportiert? Wie viel wird recycelt? Aus der Bundesrepublik Deutschland existieren z.B. einige Berichte über den Verbleib der

Mobiltelefone, die sich im ungenutzten Lager der Privaten Haushalte befinden. Für Österreich konnten solche Informationen nicht gefunden werden, obwohl sie essentiell sind, um Verbesserungsvorschläge zur effizienteren Sammlung der Geräte machen zu können.

Abschließend ist hier festzuhalten, dass es zwar den Schein erweckt, dass die Allgemeinheit großes Interesse an der Nutzung sekundärer Ressourcen zeigt, jedoch ist es hier auch notwendig ein System zu entwickeln, dass dieses auch ermöglicht. Und das ist nur möglich, wenn die notwendigen Informationen zur Erstellung einer Stoffflussanalyse von den betroffenen Firmen und Institutionen auch zur Verfügung gestellt werden bzw. vielleicht auch zur Verfügung gestellt werden müssen.

Denn nur durch ausreichende Informationen über den Verbleib und die Menge der Produkte kann ein System entwickelt werden, das die notwendige Infrastruktur, technische und organisatorische Abwicklung einer Sammlung und Verwertung der Alt-Produkte bereitstellt.

## 6. Quellen und Verzeichnisse

### Literaturverzeichnis

- Achzet, B.; Reller, A.; Zepf, V. (2011): Materials critical to the energy industry. An introduction. In: *ON Communication*, zuletzt geprüft am 18.04.2012.
- Angerer, Gerhard; Erdmann, Lorenz; Marscheider-Weidemann, Frank; Scharp, Michael; Lüllmann, Arne; Handke, Volker; Marwede, Max (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. In: *Fraunhofer-ISI "Innovationspotenziale"*, zuletzt geprüft am 12.04.2012.
- BDI, Bundesverband der deutschen Industrie (2007): Rohstoffsicherheit - Anforderungen an Industrie und Politik, zuletzt geprüft am 08.05.2012.
- BGS, British Geological Survey (2011): Rare Earth Elements Profile, zuletzt geprüft am 11.05.2012.
- BITKOM (2011a): Presseinformation - Tablet Computer erobern den Massenmarkt, zuletzt geprüft am 14.06.2012.
- BITKOM (2011b): Presseinformation - 83 Millionen Alt-Handys, zuletzt geprüft am 18.06.2012.
- BITKOM (2010): Die Zukunft der digitalen Consumer Electronics - 2010, zuletzt geprüft am 25.06.2012.
- bmvit (2010): Strategie und Instrumente sowie prioritäre Anwender- und Einsatzbereiche für den Nationalen Einführungsplan Elektromobilität., zuletzt geprüft am 21.07.2012.
- Bradsher, Keith (2010): After China's Rare Earth Embargo, a New Calculus. In: *The New York Times* 2010, 29.10.2010.
- Brunner, Paul H.; Rechberger, Helmut (2004): Practical handbook of material flow analysis. Boca Raton, FL: CRC/Lewis.
- Bryce, Robert (2010): The Lanthanides, China, and High-Tech Autos. (Actually High-Tech Everything), zuletzt geprüft am 04.06.2012.
- Buchert, Matthias; Jenseit, Wolfgang; Dittrich, Stefanie; Hacker, Florian (2011): Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität, zuletzt geprüft am 30.05.2012.
- Buchert, Matthias; Manhart, Andreas; Bleher, Daniel; Pingel, Detlef (2012): Recycling critical raw materials from waste electronic equipment, zuletzt geprüft am 05.06.2012.
- Buckley, Chris (2010): China's dream for rare earths rests on grim costs. Hg. v. Reuters.
- Bundesministerium für Gesundheit (2009): Gesundheit und Krankheit in Österreich. Gesundheitsbericht Österreich 2009, zuletzt geprüft am 06.06.2012.
- Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend (2010): Österreichisches Montan-Handbuch 2010. Bergbau-Rohstoffe-Grundstoffe-Energie, zuletzt geprüft am 12.04.2012.
- Castor, Stephen B.; Hedrick, James B. (2006): Rare Earth Elements. In: *Industrial Minerals and Rocks*, zuletzt geprüft am 10.05.2012.
- Department of Mining and Tunnelling, University of Leoben (2004): Minerals Planning Policies and Supply Practices in Europe, zuletzt geprüft am 08.05.2012.

- D'Souza et al. (2011): Life Cycle Assessment of Electricity Production from a Vestas V112 Turbine Wind Plant, zuletzt geprüft am 20.06.2012.
- Du, Xiaoyue; Graedel, T. E. (2011a): Global In-Use Stocks of the Rare Earth Elements: A First Estimate. In: *Environ. Sci. Technol*, S. 4096–4101, zuletzt geprüft am 12.04.2012.
- Du, Xiaoyue; Graedel, T. E. (2011b): Global Rare Earth In-Use Stocks in NdFeB Permanent Magnets. In: *Journal of Industrial Ecology* 15 (6), S. 836–843, zuletzt geprüft am 12.04.2012.
- Elsner, Harald (2011): Kritische Versorgungslage mit schweren Seltenen Erden ... Entwicklung "Grüner Technologien" gefährdet?, zuletzt geprüft am 12.04.2012.
- Emsley, John (2001): Nature's building blocks. An A-Z guide to the elements. Oxford ;, New York: Oxford University Press.
- Erdmann, Lorenz; Graedel, Thomas E. (2011): Criticality of Non-Fuel Minerals: A Review of Major Approaches and Analyses. In: *Environ. Sci. Technol* 45 (18), S. 7620–7630, zuletzt geprüft am 12.04.2012.
- European Commission (2008): The raw materials initiative - meeting our critical needs for growth and jobs in Europe, zuletzt geprüft am 08.05.2012.
- European Commission (2010): Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, zuletzt geprüft am 12.04.2012.
- Eurostat (2010): External Trade.
- finanzen.net (2012): Rohstoff Charts.
- Goedkoop, Mark et al (2009): ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, zuletzt aktualisiert am 26.02.2009, zuletzt geprüft am 22.05.2012.
- Graedel, T. E.; Nassar, Nedal T.; Barr, Rachel; Browning, Matthew; Diao, Zhouwei; Friedlander, Elizabeth et al. (2011): Criticality of the Geological Copper Family. In: *Environ. Sci. Technol* 46 (2), S. 1071–1078, zuletzt geprüft am 22.05.2012.
- Graedel, T.E (2010): Metal Stocks in Society. UNEP Report, zuletzt geprüft am 12.04.2012.
- Graedel, T.E (2011): On the Future Availability of the Energy Metals. In: *Annu. Rev. Mater. Res* 41 (1), S. 323–335, zuletzt geprüft am 12.04.2012.
- Greve, B.; Raulin, C. (2011): Der Nd:YAG-Laser im Wandel der (Impuls-) Zeiten - Einsatzgebiete in der Dermatologie, zuletzt geprüft am 06.06.2012.
- Gutfleisch, Oliver; Willard, Matthew A.; Brück, Ekkes; Chen, Christina H.; Sankar, S. G.; Liu, J. Ping (2011): Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient. In: *Adv. Mater* 23 (7), S. 821–842, zuletzt geprüft am 31.05.2012.
- Hamor, Tamas (2004): Sustainable Mining in the European Union: The Legislative Aspect. In: *Environmental Management* 33 (2), S. 252–261, zuletzt geprüft am 08.05.2012.
- Haring, Tapio; Forsman, Kimmo; Huhtanen, Tero; Zawadzki, Mark (2003): Direct drive - Opening a new era in many applications, zuletzt geprüft am 30.05.2012.
- Hausmann, Markus (2005): Potential thermischer Verfahren zur stofflichen Abfallverwertung, zuletzt geprüft am 22.06.2012.
- Hornak, Joseph (2011): The Basics of MRI.
- IG Windkraft (2011): Windkraft in Österreich. Die Energie des 21. Jahrhunderts, zuletzt geprüft am 31.05.2012.
- Johannes Heinritzi (2008): Seltene Substanzen vor Nachfrageboom. Hg. v. Focus.

Kara, Hüdayi; Chapman, Adrian; Crichton, Trevor; Willis, Peter; Morley, Nick (2010): Lanthanide Resources and Alternatives. Sustainable products and services, Clean technologies, Resource efficiency, zuletzt geprüft am 18.04.2012.

Kasap, S. O. (2001): Optoelectronics and photonics. Principles and practices. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. Online verfügbar unter <http://www.worldcat.org/oclc/45103073>.

Konsument.at (2012): Handys- Schlacht der Giganten.

Kooroshy, Jaakko; Meindersma, Christa; Podkolinski, Richard; Rademaker, Michel; Sweijts, Tim; Diederens, André et al. (2009): Scarcity of Minerals. A strategic security issue, zuletzt geprüft am 18.04.2012.

Laner, D. Cencic O. Rechberger H. (2011): Materialstrombasierte Optimierung von Verfahrensketten (MoveRec) - Bericht zum Fallbeispiel „Modellierung unterschiedlicher Recyclingketten für die Aufbereitung von Alt-PCs“. Studie im Auftrag der KERP Engineering GmbH, Wien.

Lee, Felix (2011): Abhängig von China. Mit dem Quasimonopol über Seltene Erden hat China ein machtvolleres Instrument entdeckt. das Ziel: Weltmarktführer im Hochtechnologiesektor werden. In: *Die Zeit*, zuletzt geprüft am 12.04.2012.

Leoni (2005): Leoni in Team. Automotive & Standard Cables (4), zuletzt geprüft am 04.06.2012.

Liu, Ran; Buchert, Matthias; Dittrich, Stefanie; Manhart, Andreas; Merz, Cornelia; Schüler, Doris (2011): Application of rare earths in consumer electronics and challenges for recycling, zuletzt geprüft am 05.06.2012.

Lo, Yang (2007): Current Status and Future Development of the Magnetic Materials Industry in China, zuletzt geprüft am 05.06.2012.

Major, R.H (Hg.) (1938): Santorio Santorio.

Mehl, Daniel (2004): Seltene Erden Metalle. Von der Lagerstätte bis zu Verwendung, zuletzt geprüft am 10.05.2012.

Meyer, Gerd (2001): Die (ungleichen) Didymium-Zwillinge: Praseodym und Neodym. In: *Chemie in unserer Zeit* 35 (2), zuletzt geprüft am 10.05.2012.

MMA, Mobile Marketing Association (2011): Mobile Werbung wird zunehmend beliebter. MMA Austria publiziert den Leitfaden mobiler Trends im "Mobile Communications Report 2011", zuletzt geprüft am 11.06.2012.

Molycorp (2012): Molycorp Mountain Pass.

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, zuletzt geprüft am 29.05.2012.

MREL (2012): Metall Rare Earth Limited.

MRT open (2012).

Murphy&Spitz Research (2011): Position zu Neodym und Windkraftanlagen. Stand Juni 2011, zuletzt geprüft am 31.05.2012.

Nassar, Nedal T.; Barr, Rachel; Browning, Matthew; Diao, Zhouwei; Friedlander, Elizabeth; Harper, E. M. et al. (2012): Criticality of the Geological Copper Family. In: *Environ. Sci. Technol* 46 (2), S. 1071–1078, zuletzt geprüft am 12.04.2012.

NDT Resource Centre (2012).

Neue Zürcher Zeitung NZZ Online (2011): Rohstoff für High-Tech-Geräte wird künstlich verknappt. China will in Zukunft weniger seltene Erden exportieren.

Nicole Weinhold (2010): Mit oder ohne? An der Frage, ob in einer Windenergieanlage ein Getriebe gehört, scheiden sich die Geister. Noch nie fand die getriebelose Technik so viele Anhänger wie derzeit. Müssen wir uns vom Getriebe verabschieden?, zuletzt geprüft am 31.05.2012.

NRC, National Research Council (2008): Minerals, critical minerals, and the U.S. economy. Washington, D.C: National Academies Press.

Oakdene Hollins, Research &. Consulting (2010): Lanthanide Resources and Alternatives, zuletzt geprüft am 10.05.2012.

Öko-Institut e.V. (2011): Study on Rare Earths and Their Recycling. Final Report for The Greens/EFA Group in the European Parliament, zuletzt geprüft am 10.04.2012.

ORF (2012): Die Ö3-Wundertüte: Rekordbilanz 2011.

Palisade Corporation (2012): Software @ risk Version 5.7.

Panorama (2011): Das schmutzige Geheimnis sauberer Windräder (Panorama). Das Erste, 2011.

Pötscher, Friedrich; Winter, Ralf; Lichtblau, Günther (2010): Elektromobilität in Österreich. Szenario 2020 und 2050. Umweltbundesamt Österreich. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0257.pdf>, zuletzt aktualisiert am 27.04.2010, zuletzt geprüft am 16.04.2012.

Rechberger, Helmut (2005): Zukunft Ressourcenmanagement. In: *Österr Wasser- und Abfallw* 57 (7-8), S. a11.

Reischl, Gerald (2012): 3,3 Millionen Handys in einem Jahr. [futurzone.at](http://www.futurzone.at).

Rodewald, Werner; Katter, Matthias; Reppel, Georg Werner (2003): Fortschritte bei pulvermetallurgisch hergestellten Neodym-Eisen-Bor-Magneten, zuletzt geprüft am 06.06.2012.

Ruhkamp, Christoph (2011): Seltene Erden - Aus Salz wurde Gold, 07.10.2011.

Runge, Antonia (2010): Modellierung der Lebensdauer von Systemen, zuletzt geprüft am 29.07.2012.

Rutherford (2006): Lexikon der Elemente. Häufigkeit der Elemente. Online verfügbar unter <http://www.uniterra.de/rutherford/>.

Schittl, Gernot (2012): Recyclingpotenzial von kritischen Rohstoffen in Technologien zur Energieumwandlung, zuletzt geprüft am 11.06.2012.

Schlosser, G.; Gattringer, C. (2012): Kritische Rohstoffe für Hochtechnologieanwendungen in Österreich. Zwischenbericht.

Statistik Austria (2011a): Fahrzeug-Bestand am 31.12.2011, zuletzt geprüft am 05.06.2012.

Statistik Austria (2011b): Haushalte mit Computer 2011, zuletzt geprüft am 11.06.2012.

Statistik Austria (2011c): Ausstattungsgrad der privaten Haushalte - Zeitvergleich, zuletzt geprüft am 11.06.2012.

Statistik Austria (2012): Kfz-Neuzulassungen 2011, zuletzt geprüft am 04.06.2012.

Stosch, H. -G (2000): Geochemie der nicht so Seltenen Erden, zuletzt geprüft am 11.05.2012.

Swiss Metal Assets S.A. (2012).

[thewindpower.net](http://www.thewindpower.net) (2012).

Tiess, Guenter (2010): Minerals policy in Europe: Some recent developments. In: *Resources Policy* 35 (3), S. 190–198, zuletzt geprüft am 12.04.2012.

Treibacher Industrie AG (2012).

USGS National Minerals Information Center (2012): Mineral Commodity Summaries 2012, zuletzt geprüft am 15.05.2012.

USGS National Minerals Information Center (2012): Rare earths, zuletzt geprüft am 10.05.2012.

VCÖ (2011): Boom bei Elektrofahrräder und Elektro-Mopeds in Österreich (2011-051).

Vidal, Bernard (1998): Histoire de la chimie. 2. Aufl. Paris: Presses Universitaires de France.

Wäger, Patrick A.; Lang, Daniel J. (2010): Seltene Metalle. Rohstoffe für Zukunftstechnologien. In: *Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften*, zuletzt geprüft am 12.04.2012.

Weber, L.; Zsak, G.; Reichl, C.; Schatz, M. (2011): World-Mining-Data. Welt-Bergbau-Daten (26), zuletzt geprüft am 19.04.2012.

Weber, L.; Zsak, G.; Reichl, C.; Schatz, M. (2012): World-Mining-Data (27), zuletzt geprüft am 10.05.2012.

Wimmer, Harald (2012): Einflussfaktoren auf die Akzeptanz von Hybridautos. Zusammenfassung, zuletzt geprüft am 04.06.2012.

WISE-Uranium (2010). Online verfügbar unter <http://www.wise-uranium.org/mdafko.html>.

## Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: RESERVEN DER SELTENEN ERDEN OXIDE, SEO NACH LÄNDERN (USGS, 2012)	- 13 -
ABBILDUNG 2: WELTWEITE PRODUKTION AN SELTENERDOXIDEN VON 1950-2006 [IN 1000 TONNEN]	- 15 -
ABBILDUNG 3: ANTEIL EU-27 LÄNDER AN SELTENEN ERDEN IMPORTEN (EUROSTAT, 2010)	- 16 -
ABBILDUNG 4: ABFALLSEE BEI BAYAN OBO MINE IN BAOTOU, CHINA; SATELLITENAUFNAHME (BRADSHER, 2010)	- 17 -
ABBILDUNG 5: METALLISCHES NEODYM MIT OXIDSCHICHT (SWISS METAL ASSETS, 2012).	- 19 -
ABBILDUNG 6: WELTWEITE VERWENDUNG VON NEODYM IM JAHR 2010 (BUCHERT ET AL., 2011).	- 20 -
ABBILDUNG 7: ANWENDUNGEN DER NDFEB MAGNETE 2009 (MOSS ET AL., 2011).	- 21 -
ABBILDUNG 8: DARSTELLUNG DES VERSORGUNGS-RISIKOS AUSGEWÄHLTER ROHSTOFFE GEGEN DIE WIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG FÜR DIE EUROPÄISCHE UNION	- 23 -
ABBILDUNG 9: QUALITATIVES STOFFFLUSSSYSTEM FÜR NEODYM IN ÖSTERREICH IM JAHR 2011.	- 35 -
ABBILDUNG 10: HYSTERESE-KURVE EINES PERMANENT MAGNETISIERTEN STOFFES (NDT RESOURCE CENTRE, 2012).	- 37 -
ABBILDUNG 11: ZEITLICHE ENTWICKLUNG DER PERMANENTMAGNETE GEGEN DIE ENERGIEDICHTE (GUTFLEISCH ET AL., 2011).	- 38 -
ABBILDUNG 12: INSTALLIERTE LEISTUNG NACH HERSTELLERN, STAND DEZEMBER 2011 (IG WINDKRAFT, 2011).	- 41 -
ABBILDUNG 13: LEBENSZYKLUS EINER WINDTURBINE (D'SOUZA ET AL., 2011).	- 43 -
ABBILDUNG 14: SCHEMEN FÜR ABSORPTION UND EMISSION (KASAP, 2001).	- 45 -
ABBILDUNG 15: MAGNETOM C! 0.35T (QUELLE: SIEMENS HEALTHCARE)	- 48 -
ABBILDUNG 16: ILLUSTRATION DES TOYOTA PRIUS, DARGESTELLT INKLUSIVE ELEKTROMOTOR UND BATTERIE (WIMMER, 2012).	- 50 -
ABBILDUNG 17: VERGLEICH ERGEBNISSE KRITIKALITÄT FÜR DIE EU UND ÖSTERREICH (SCHLOSSER; GATTRINGER, 2012).	- 65 -
ABBILDUNG 18: STOFFFLUSSBILD FÜR NEODYM IN ÖSTERREICH 2011, STOFFEBENE, EINHEIT TONNEN.	- 67 -
ABBILDUNG 19: WEIBULL FUNKTION ZUR LEBENSDAUER EINES WINDKRAFTWERKS.	- 70 -
ABBILDUNG 20: ANFALLENDE NEODYM-MENGEN PRO JAHR IM SZENARIO WINDKRAFT BIS 2020.	- 72 -
ABBILDUNG 21: SUBPROZESS PRIVATE HAUSHALTE IM SYSTEM "NEODYM IN ÖSTERREICH 2011" - STOFFEBENE – EINHEIT: TONNEN.	- 75 -
ABBILDUNG 22: WEIBULL-VERTEILUNG FÜR ELEKTROFAHRZEUGE.	- 77 -
ABBILDUNG 23: RECYCLINGPOTENTIAL DER ELEKTROAUTOS IM "SZENARIO REALISTISCH".	- 79 -
ABBILDUNG 24: RECYCLINGPOTENTIAL ELEKTROAUTOS IM "WORST-CASE SZENARIO" BIS 2020.	- 80 -
ABBILDUNG 25: RECYCLINGPOTENTIAL HYBRIDAUTOS IM "REALISTISCHEN SZENARIO"(BLAU) UND IM „WORST-CASE SZENARIO“ (ROT).	- 82 -
ABBILDUNG 26: RECYCLINGPOTENTIAL DER ELEKTROFAHRRÄDER IM SZENARIO BIS 2020.	- 84 -

ABBILDUNG 27: WEIBULL-DICHTEFUNKTION FÜR ELEKTRONISCHE GERÄTE (Z.B FESTPLATTEN).	- 86 -
ABBILDUNG 28: RECYCLINGPOTENTIAL DER FESTPLATTEN BEI KONSTANTEN FLÜSSEN BIS 2020.	- 87 -
ABBILDUNG 29: WEIBULL-DICHTEFUNKTION FÜR MOBILTELEFONE	- 88 -
ABBILDUNG 30: RECYCLINGPOTENTIAL FÜR MOBILTELEFONE IM KONSTANTEN SZENARIO BIS 2020.	- 89 -
ABBILDUNG 31: SUBSYSTEM „ABFALLWIRTSCHAFT“ IM SYSTEM "NEODYM IN ÖSTERREICH 2011" – STOFFEBENE-NEODYM.	- 92 -
ABBILDUNG 32: DARSTELLUNG DES ZUKÜNFTIGEN RECYCLINGPOTENTIALS ALLER DARGESTELLTEN SZENARIEN.	- 95 -
ABBILDUNG 33: SYSTEMBILD "NEODYM IN ÖSTERREICH 2011" – STOFFEBENE.	- 115 -

## Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: KRITISCHE ROHSTOFFE EU (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2010) UND DEREN HÄUFIGKEIT IN DER ERDKRUSTE (RUTHERFORD, 2006)	- 9 -
TABELLE 2: VERWENDUNG VON SE IN DEN USA 2011 (USGS, 2012)	- 18 -
TABELLE 3: AUFLISTUNG KRITISCHER ROHSTOFFE FÜR DIE EUROPÄISCHE UNION	- 23 -
TABELLE 4: SCHWANKUNGSBEREICHE NACH KATEGORIEN UND DAZUGEHÖRIGE BERECHNUNG DER STANDARDABWEICHUNG	- 33 -
TABELLE 5: MOLMASSENKONZENTRATION NDFEB PERMANENTMAGNETE (INKL. QUELLENANGABE).	- 39 -
TABELLE 6: HERSTELLER IN ÖSTERREICH INSTALLIERTER WKAS INKL. MARKANTEIL UND BERECHNETER MW	- 41 -
TABELLE 7: ABSCHÄTZUNG DES MAGNETBEDARFS FÜR PERMANENTMAGNET-GENERATOREN IN WKAS (T/MW)-	42 -
TABELLE 8: RECHERCHIERTE INFORMATION ZUR VERWENDUNG VON NDFEB PERMANENTMAGNETEN VERSCHIEDENER HERSTELLER	- 42 -
TABELLE 9: BEHANDLUNG DER EINZELNEN KOMPONENTEN EINER WKA NACH DER DEMONTIERUNG (D'SOUZA ET AL., 2011).	- 44 -
TABELLE 10: PROJEKTION DES GLOBALEN ROHSTOFFVERBRAUCHS FÜR DIE HERSTELLUNG VON ND:YAG KRISTALLEN ZUR LASER-MATERIALVERARBEITUNG (ANGERER ET AL., 2009).	- 46 -
TABELLE 11: DER LITERATUR ENTNOMMENE SCHÄTZUNGEN ZU DEN NEODYM-GEHALTEN DER HYBRID-FAHRZEUGE	- 50 -
TABELLE 12: VERKAUFZAHLEN ELEKTROFAHRRÄDER IN ÖSTERREICH NACH JAHREN (VCÖ, 2011).	- 51 -
TABELLE 13: MAGNETGEHALTE FÜR FESTPLATTEN	- 52 -
TABELLE 14: GESCHÄTZTE NEODYM-MENGEN EINES SMARTPHONES (BUCHERT ET AL., 2012).	- 54 -
TABELLE 15: PERZENTILWERTE ZUR ABBILDUNG DER LEBENSDAUER VERSCHIEDENER PRODUKTGRUPPEN ALS GRUNDLAGE ZUR ERMITTLUNG DER ENTSPRECHENDEN WEIBULL-VERTEILUNGEN	- 64 -
TABELLE 16: ERGEBNISSE PROZESS WINDKRAFT - STOFFEBENE NEODYM	- 69 -
TABELLE 17: SZENARIO "WINDKRAFT MIT NDFEB-PERMANENTMAGNET"; NEUINSTALLATIONEN IN MEGAWATT BIS 2020.	- 71 -
TABELLE 18: FLÜSSE UND LAGER DER ELEKTROAUTOS IM SUBPROZESS PRIVATE HAUSHALTE IM SYSTEM "NEODYM IN ÖSTERREICH 2011".	- 76 -
TABELLE 19: ANGENOMMENE LAGERENTWICKLUNG ELEKTROAUTOS IM "SZENARIO REALISTISCH" UND „WORST-CASE SZENARIO“.	- 78 -
TABELLE 20: FLÜSSE UND LAGER FÜR HYBRIDAUTOS IM SUBPROZESS PRIVATE HAUSHALTE IM SYSTEM "NEODYM IN ÖSTERREICH 2011".	- 80 -
TABELLE 21: ANGENOMMENE ENTWICKLUNG DES HYBRIDAUTO-LAGERS BIS 2020 IM "REALISTISCHEN SZENARIO" UND „WORST-CASE SZENARIO“.	- 81 -

TABELLE 22: FLÜSSE UND LAGER DER ELEKTROFAHRRÄDER IM SUBPROZESS PRIVATE HAUSHALTE IM SYSTEM "NEODYM IN ÖSTERREICH 2011".	- 83 -
TABELLE 23: ANGENOMMENES SZENARIO UND ENTWICKLUNG DER JÄHRLICHEN FLÜSSE AN ELEKTROFAHRRÄDERN BIS INS JAHR 2020.	- 84 -
TABELLE 24: BERECHNETE FLÜSSE UND LAGER FÜR FESTPLATTEN IM SUBPROZESS PRIVATE HAUSHALTE IM SYSTEM "NEODYM IN ÖSTERREICH 2011".	- 85 -
TABELLE 25: FLÜSSE UND LAGER DER MOBILTELEFONE IM SUBPROZESS PRIVATE HAUSHALTE IM SYSTEM "NEODYM IN ÖSTERREICH 2011".	- 88 -
TABELLE 26: FLÜSSE UND LAGER DVD-PLAYER UND -LAUFWERKE IM SUBPROZESS PRIVATE HAUSHALTE IM SYSTEM "NEODYM IN ÖSTERREICH 2011".	- 90 -
TABELLE 27: FLÜSSE UND LAGER FÜR LAUTSPRECHER IM SUBPROZESS PRIVATE HAUSHALTE IM SYSTEM "NEODYM IN ÖSTERREICH 2011".	- 91 -
TABELLE 28: GESCHÄTZTE ABFALLMENGEN PRO PRODUKTGRUPPE IM PROZESS ABFALLWIRTSCHAFT, GESCHÄTZT ÜBER DAS ANFALLPOTENTIAL IM SYSTEM "NEODYM IN ÖSTERREICH 2011".	- 93 -
TABELLE 29: RECYCLINGPOTENTIAL FÜR NEODYM IN EINIGEN PRODUKTEN AUS DEM PROZESS PRIVATE HAUSHALTE NACH JAHREN (EINHEIT: TONNEN).	- 94 -
TABELLE 30: ERMITTELTE HHI-WERTE FÜR KRITIKALITÄTSBESTIMMUNG.	- 113 -
TABELLE 31: ERMITTELTE WERTE FÜR DIE WIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG FÜR DIE KRITIKALITÄTSBESTIMMUNG.	- 114 -

## Formelverzeichnis

FORMEL 1: BERECHNUNG DER WIRTSCHAFTLICHEN BEDEUTUNG EINES ROHSTOFFS	- 24 -
FORMEL 2: BERECHNUNG DES HERFINDAHL-HIRSCHMANN-INDEX HHI	- 25 -
FORMEL 3: BERECHNUNG DIE ERSETZBARKEIT EINES ROHSTOFFS IN EINER ANWENDUNG	- 25 -
FORMEL 4: BERECHNUNG DES VERSORGUNGS-RISIKOS	- 26 -
FORMEL 5: BERECHNUNG DES ENVIRONMENTAL COUNTRY INDEX EMI	- 26 -
FORMEL 6: BERECHNUNG VON HHIEPI	- 26 -
FORMEL 7: ERMITTLUNG DER NATIONALEN VERWUNDBARKEIT	- 28 -
FORMEL 8: ERMITTLUNG DER „OVERALL CRITICALITY C“	- 29 -

## Anhang

### Anhang A – Daten Kritikalitätsbestimmung

Tabelle 30: ermittelte HHI-Werte für Kritikalitätsbestimmung.

Rohstoff	HHI wgi	HHI epi
Seltene Erden	5,8	4,9
Platin	2,6	3,1
Palladium	1,9	1,6
Rhodium	3,1	3,7
Cobalt	2,9	1,6
Antimon	5,1	4,3
Fluorit	2	1,7
Gallium	2,4	2
Germanium	2,7	2,2
Graphit	3,4	2,9
Tantal	4,3	3,1
Niob	4,3	3,1
Wolfram	3,9	3,3
Magnesium	2,4	2
Indium/Zink	0,65	0,56

Tabelle 31: ermittelte Werte für die wirtschaftliche Bedeutung für die Kritikalitätsbestimmung.

<b>Economic Importance</b>	
<b>Rohstoff</b>	<b>Economic Importance</b>
Beryllium	0
CaF2	0
Kohlenstoff	0
Magnesium	0
Wolfram	0
PGM-Platin	0,018
Antimon	0,019
PGM-Ruthenium	0,020
Gallium	0,021
Kobalt	0,023
Indium	0,023
Germanium	0,023
PGM-Palladium	0,024
Tantal	0,024
PGM-Rhodium	0,024
Seltene Erden	0,025
PGMs	0,025
PGM-Iridium	0,028
PGM-Osmium	0,036
Niob	0,051

## Anhang B – Daten Stoffflussanalyse

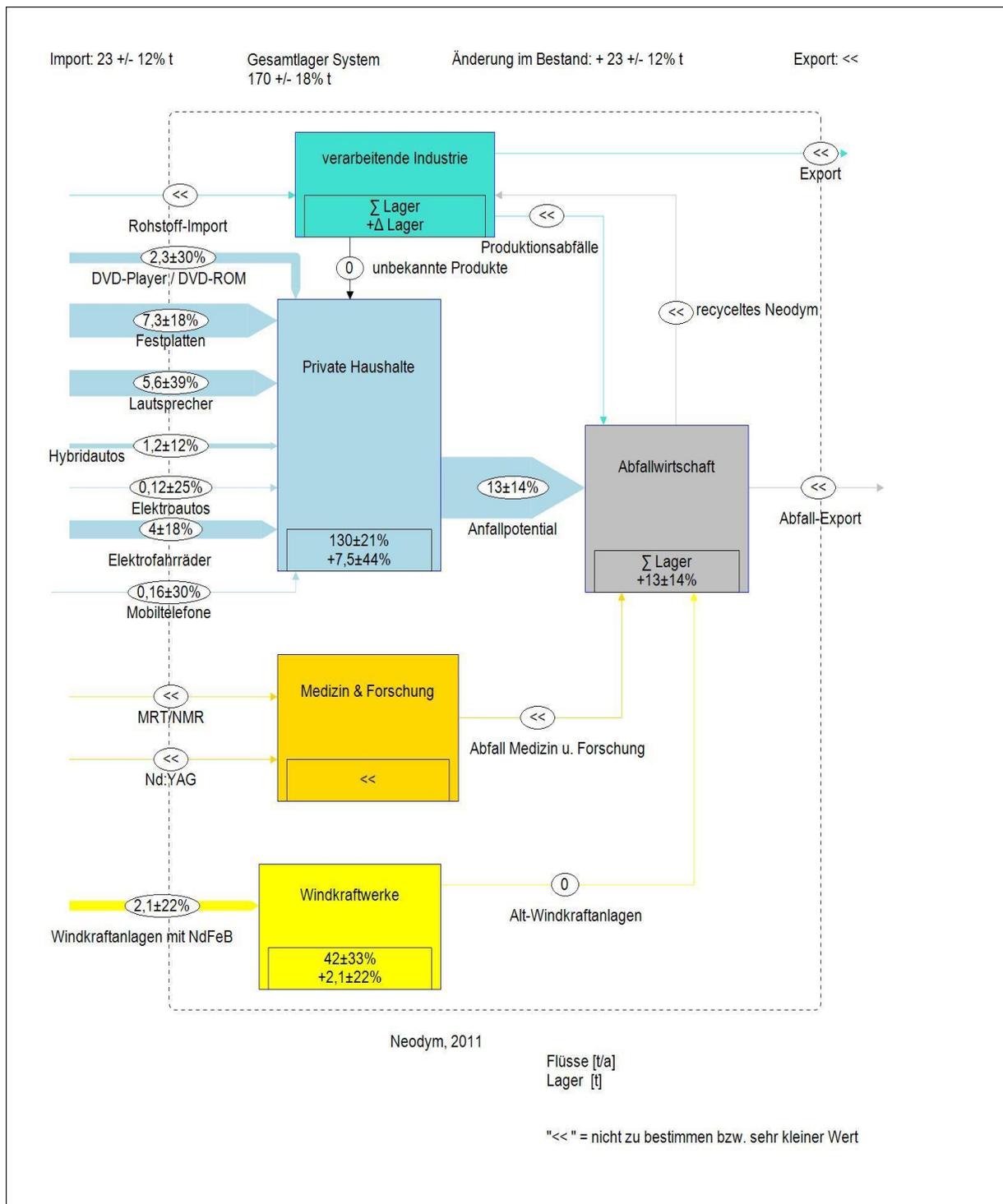


Abbildung 33: Systembild "Neodym in Österreich 2011" – Stoffebene.

