Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft
Technische Universität Wien

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

Kritische Rohstoffe für die Hochtechnologie-anwendung in Österreich

Projekt ROHkrit

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

Kritische Rohstoffe für die Hochtechnologieanwendung in Österreich

Gesamtwirtschaftliche Stoffflussanalysen ausgewählter kritischer Rohstoffe (AP 7)

Endbericht

Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft
Technische Universität Wien

Gunilla Schlosser
Claudia Gattringer
David Laner
Helmut Rechberger

Wien, Jänner 2013

Projektleitung
Helmut Rechberger

Projektbearbeitung
Gunilla Schlosser
Claudia Gattringer
David Laner

Grafische Gestaltung und Layout
Inge Hengl

Impressum
Technische Universität Wien
Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft
A-1040 Wien, Karlsplatz 13/226
Tel.: +43 1 58 801 226 41 (Sekretariat)
Fax.: +43 1 58 801 22697
E-Mail: helmut.rechberger@tuwien.ac.at
http://iwr.tuwien.ac.at/ressourcen/

Kurzfassung

Die vorliegende Studie geht von der Annahme aus, dass für eine effektive Bewirtschaftung von insbesondere kritischen Rohstoffen eine systematische Erfassung und Dokumentation (Stoffbuchhaltung) der volkswirtschaftlichen Materialflüsse und Lager (Bestände) notwendig ist. Dies dient dazu, erstens die Nutzung dieser Rohstoffe in der Volkswirtschaft besser zu verstehen und damit Ineffizienzen zu erkennen und zu beheben und zweitens Potenziale für zukünftiges Recycling zu bestimmen. Um zu prüfen, inwieweit eine derartige Dokumentation heute möglich ist, wurden für drei ausgewählte kritische Rohstoffe Stoffflussanalysen gemäß ÖNORM S2096 für Österreich und das Jahr 2011 durchgeführt.

Bei der Auswahl der Rohstoffe wurde die von der Ad-hoc-Arbeitsgruppe der EU entwickelte Methode auf Österreich angewendet, woraus sich folgende drei relevante Stoffe ergeben: Neodym (Nd) als Vertreter der Seltenen Erden, Palladium (Pd) als Vertreter der Platingruppenmetalle und Niob (Nb) als Rohstoff mit dem höchsten Indikatorwert in Bezug auf die Relevanz für die österreichische Wirtschaft. Die Stoffbilanzen wurden mittels der an der TU Wien entwickelten Spezialsoftware STAN erstellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass für keinen der drei Stoffe eine befriedigende Bilanz erstellt werden kann, da die Datenlage ungenügend ist. Dies liegt einerseits daran, dass oft keine belastbaren Angaben zu den in Nutzung befindlichen Produkten und auch zu den insgesamt anfallenden Mengen am Ende der Nutzungsdauer verfügbar sind und andererseits, dass große Unsicherheiten in Bezug auf die mittleren Stoffkonzentrationen in einzelnen Produktgruppen bestehen. Doch auch wo statistische Daten vorhanden sind, gibt es Schwierigkeiten, da bspw. in den Produktionsstatistiken Neodym gemeinsam mit allen anderen Seltenen Erden, Palladium mit den Platingruppenmetallen und auch Niob gemeinsam mit Tantal ausgewiesen werden. Verbrauchs- und Produktionszahlen der Industrie sind oft aus Gründen des Datenschutzes nicht zugänglich. Diese Datenlücken verhindern die Überprüfung der „Bottom-up“-Schätzungen (Hochrechnen der Gesamtmengen anhand der Mengen in einzelnen Produktgruppen) durch „Top-down“-Ansätze (Aufgliedern der Gesamtmengen auf Anwendungsbereiche) und auch die Anwendung der Datenausgleichsrechnung mittels STAN. Die unzureichende Datenlage ist demnach eine Mischung aus nicht existierenden Daten, unzureichend erhobenen Daten und vorhandenen, jedoch nicht verfügbaren Daten. Eine gezielte Analyse der Datendefizite konnte im Rahmen dieses Projektes nicht geleistet werden und stellt daher zukünftigen Forschungsbedarf dar.

Ein weiteres Ergebnis ist, dass die drei Stoffe sehr unterschiedlich genutzt werden und daher stoffspezifische Ansätze zur Hebung der Ressourceneffizienz notwendig sind. So wird bspw. Neodym in einer Reihe von Anwendungen und Produkten eingesetzt, Niob dagegen hauptsächlich als Stahlveredler und Palladium, obwohl mit zahlreichen Anwendungsbereichen, hauptsächlich in Autokatalysatoren. Die Rückgewinnung dieser Stoffe ist daher an sehr unterschiedliche Anforderungen geknüpft.

Folgende Empfehlungen können aus den Stoffbilanzen abgeleitet werden:

- Die Ergebnisse der drei Stoffflussanalysen sollten herangezogen werden, um die Datenlage zur Erstellung der jeweiligen Rohstoffhaushalte zu verbessern und eine verlässlichere Basis für die Identifikation und Nutzung vorhandener Sekundärrohstoffpotentiale zu schaffen. Dies bedarf der Zusammenführung aller dafür notwendigen und verantwortlichen Akteure (Industrie, Kammern, Statistik Austria, Fachministerien, Wissenschaft).
- Die getrennte Sammlung bestimmter Produktgruppen wäre zu forcieren, um ein gezieltes Recycling der enthaltenen Wertstoffe zu ermöglichen.
    - In Bezug auf Neodym trifft das vor allem auf Permanentmagneten in unterschiedlichen Anwendungen zu (derzeit: v.a. Festplatten und Lautsprecher; zukünftig: Windkraftanlagen und Elektro- bzw. Hybridfahrzeuge).
    - In Bezug auf Niob könnten geschlossene Recycling-Systeme für spezielle Anwendung der Niob-haltigen Stähle etabliert werden (z.B. Pipelines).
    - In Bezug auf Palladium wären in erster Linie Maßnahmen betreffend der Katalysatoren in Alt-Kfz (a. Exporte von nicht funktionstüchtigen Alt-Fahrzeugen unterbinden; b. effiziente Recyclingnetzwerke in und mit den jeweiligen Zielregionen der exportierten Alt-Fahrzeuge aufbauen) und der Elektroaltgeräte (möglichst vollständige Erfassung, getrennte Sammlung und gezielte Behandlung) zu setzen.
- Ein besseres Verständnis der Abfallwirtschaftssysteme in Bezug auf Hochtechnologierohstoffe ist als Voraussetzung für ein verstärktes Recycling unumgänglich.
    - Dazu sind Daten zu den anfallenden Mengen, den Sammel-, Verwertungs- bzw. Entsorgungswegen, den Stoffgehalten in Alt-Produkten und ausgewählten Abfallströmen sowie Prozessdaten zu unterschiedlichen Aufbereitungstechnologien zu erheben bzw. zu generieren.
- Generell, wären dynamische Stoffflussanalysen (Betrachtung der Systeme über einen längeren Zeitraum in Form einer systematischen Stoffbuchhaltung) notwendig, um die bestehenden Lager zuverlässig zu charakterisieren und zukünftig verfügbare Rohstoffpotenziale zu bestimmen. Die dafür notwendigen Werkzeuge sind vorhanden, die Umsetzung scheitert aber bisher am Datenbedarf.

Aus den obigen Empfehlungen lassen sich zahlreiche Maßnahmen (z.B. Steigerung der Sammelmengen von EAG, Weiterentwicklung von Recyclingtechnologien, Optimierung des Designs der Geräte für das Recycling usw.) identifizieren, die zu einer verstärkten Nutzung der vorhandenen Sekundärrohstoffpotentiale beitragen können. Es lässt sich auch festhalten, dass ein verbessertes Systemverständnis notwendig ist, um solche Maßnahmen zielorientiert zu setzen. Diese Basis für eine optimierte Bewirtschaftung wäre in Zukunft anhand belastbarer Stoffflussanalysen zu legen. Die groben Rohstoff-Bilanzen, die in dieser Studie für Neodym, Niob und Palladium erstellt wurden, stellen einen ersten Schritt in diese Richtung dar, sind jedoch keineswegs ausreichend. Letztendlich sei gesagt, dass Information/Daten eine unserer wesentlichsten Ressourcen ist.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 6

1.1 Hintergrund 6

1.2 Ziele und Fragestellungen 7

2 Methoden 8

2.1 Auswahl der Stoffe 8

2.2 Stoffflussanalyse (SFA) 16

3 SFA für Nd 20

3.1 Windkraftwerke 24

3.2 Medizin & Forschung 29

3.3 Private Haushalte 33

3.4 Verarbeitende Industrie 43

3.5 Abfallwirtschaft 45

3.6 Ergebnisse 47

3.7 Diskussion und Nd-Rohstoffpotentiale 52

4 SFA für Nb 60

4.1 Industrie & Gewerbe 62

4.2 Private Haushalte & Infrastruktur 75

4.3 Abfallwirtschaft 78

4.4 Ergebnisse 79

4.5 Diskussion und Nb-Rohstoffpotentiale 83

5 SFA für Pd 86

5.1 Private Haushalte 88

5.2 Industrie & Gewerbe 108

5.3 Abfallwirtschaft 110

5.4 Ergebnisse 112

5.5 Diskussion und Palladium-Rohstoffpotentiale 116

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 119

6.1 Stoffflussanalysen für Neodym, Niob und Palladium 120

6.2 Datenlage und Datenunsicherheiten 123

6.3 Empfehlungen und Ausblick 124

7 Literatur, Tabellen- und Abbildungsverzeichnis 126

7.1 Literaturverzeichnis 126

7.2 Tabellenverzeichnis 134

7.3 Abbildungsverzeichnis 137

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Eine von der Europäischen Kommission im Zuge der Rohstoffinitiative der EU (COM (2008) 699) veröffentlichte Studie (Europäische Kommission 2010) stuft den zukünftigen Zugang der EU zu verschiedenen metallischen, aber auch mineralischen Rohstoffen als potenziell kritisch ein. Insgesamt wurden 35 Rohstoffe als kritisch eingestuft, da sie aufgrund ihrer vielseitigen Einsatzbereiche eine sehr hohe wirtschaftliche Bedeutung bei gleichzeitig limitierter Verfügbarkeit im Vergleich zur Nachfrage besitzen. Durch die Konzentration der Produktion in einem oder wenigen (nicht-EU) Land/Ländern, politisch-wirtschaftliche Instabilität des/der wichtigsten Lieferanten, schwierige Substituierbarkeit des Rohstoffes und niedrige Recyclingquoten wird die Kritikalität oft noch erhöht. Zu diesen sogenannten kritischen Rohstoffen gehören die Seltenen Erden (17 Elemente) sowie 13 weitere Grundstoffe (Antimon, Beryllium, Kobalt, Flussspat, Gallium, Germanium, Graphit, Indium, Magnesium, Niob, Platingruppenmetalle (6 Elemente), Tantal und Wolfram).

Als mögliche Strategien zur Abwendung von Versorgungsengpässen werden neben der Erschließung außereuropäischer Rohstoffe insbesondere die Förderung einer Versorgung aus EU-internen Quellen, ein effizienterer Umgang mit Ressourcen und ein verstärktes Recycling betrachtet.

Material- und Stoffflussanalysen stellen ein geeignetes Werkzeug zur Untersuchung potentieller Sekundärrohstoffmengen in anthropogenen Systemen dar und wurden in der Vergangenheit sowohl auf nationaler (z.B. Daxbeck et al. 2003; Döberl et al. 2004; Mattenberger et al. 2008; Schöller et al. 2006) als auch auf internationaler Ebene (z.B. Gerst und Graedel 2008; Graedel et al. 2002; Reck et al. 2008; Wang et al. 2007) zur Bearbeitung solcher Fragestellungen angewendet. Allerdings gibt es bisher nur wenige systematische Analysen, die im Zuge von Zukunftstechnologien bzw. Hochtechnologieanwendungen verwendete Rohstoffe (z.B. seltene Erden, Platingruppen-Metalle, Gallium, Indium etc.) untersucht haben. Dementsprechend stellen Schüler et al. (2011) in einer Studie über die Verwendung und das Recycling von Seltenen Erden in Europa fest, dass die Erstellung von Materialflussanalysen eine notwendige Grundlage für die optimierte Bewirtschaftung dieser Rohstoffe darstellt. Während auf globaler Ebene bereits erste, grobe Abschätzungen zu den anthropogenen Lagern (in Produkten) von Seltenen Erden vorliegen (vgl. Du und Graedel 2011), gibt es weder auf europäischer Ebene noch für Österreich entsprechende Untersuchungen (vgl. Europäische Kommission 2010). Neuere Arbeiten deuten aber darauf hin, dass die Potenziale an Hochtechnologierohstoffen in anthropogenen Lagern (vgl. Du und Graedel 2011) und bestimmten Abfallströmen (z.B. Elektroaltgeräte, siehe Chancerel et al. (2009) oder Oguchi et al. (2011)) beträchtlich sein können. Diese Rohstoffpotentiale wurden bisher kaum erforscht, weswegen ein gezieltes Recycling für viele Rohstoffe (z.B. Seltene Erden) praktisch nicht stattfindet (vgl. Graedel 2011).

1.2 Ziele und Fragestellungen

Die Erstellung von Stoffflussanalysen für kritische Rohstoffe in Bezug auf Hochtechnologienanwendungen in Österreich stellt eine Grundlage für die Abschätzung vorhandener Sekundärrohstoffpotentiale und für die Entwicklung gezielter Recyclingstrategien zur Nutzung dieser Rohstoffpotentiale dar. Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine konsistente Auswertung vorhandener Daten zum österreichischen Haushalt dreier ausgewählter kritischer Rohstoffe anhand von Stoffflussanalysen (SFA) durchzuführen. Und basierend darauf Sekundärrohstoffpotentiale (gegenwärtig und in Zukunft) abzuschätzen.

Wesentliche Fragestellungen in diesem Zusammenhang sind:

- Welche drei Rohstoffe sind für die Grob-Stoffflussanalysen auszuwählen? Wie kann bei der Auswahl vorgegangen werden?
- In welchen Anwendungen werden die ausgewählten Rohstoffe eingesetzt?
- Welches sind die wesentlichen Prozesse und Güterflüsse der jeweiligen Stoffhaushalte in Österreich? Wie ist die Datenlage, um die relevanten Flüsse zu beschreiben?
- Wie können die Unsicherheiten der Daten bzw. des Stoffflussmodells bewertet werden?
- Können, ausgehend von den erstellten Stoffflussanalysen, Empfehlungen für die Bewirtschaftung der Sekundärrohstoffpotentiale abgegeben werden?
- Welche Lager und Flüsse stellen die größten Potentiale für die Nutzung als Sekundärrohstoffquellen dar?

Zur Beantwortung der Fragestellungen werden zunächst 3 systemrelevante Rohstoffe anhand der für Österreich adaptierten EU-Methode zur Beurteilung der Rohstoffkritikalität bestimmt. Basierend auf der Identifikation der drei Rohstoffe werden Grob-Stoffflussanalysen zur Abschätzung vorhandener (und zukünftig zu erwartender) Sekundärrohstoffpotentiale erstellt. Unsicherheiten werden im Rahmen der Bilanzen entsprechend der Verfügbarkeit und Qualität der Daten berücksichtigt. Die Datenlage wird abschließend im Hinblick auf die Funktion von Stoffflussanalysen als Instrument eines integrierten Ressourcenmanagements diskutiert. Außerdem wird notwendiger Forschungsbedarf zur Reduktion vorhandener Unsicherheiten und für eine effizientere Nutzung identifizierter Sekundärrohstoffpotentiale dargestellt.

2 Methoden

2.1 Auswahl der Stoffe

Ziel des Arbeitspaketes 7 ist es, eine konsistente Auswertung vorhandener Daten zum österreichischen Haushalt dreier ausgewählter kritischer Rohstoffe anhand von Stoffflussanalysen (SFA) durchzuführen.
Als Grundlage für die Stoffauswahl wird die Methode zur Kritikalitätsbeurteilung der Ad-hoc Working Group der Europäischen Kommission verwendet, die im Folgenden näher erläutert werden soll.

2.1.1 Kritikalitätsbewertung nach einer Methode der Ad-hoc Arbeitsgruppe der Europäischen Kommission (Untergruppe der Rohstoffversorgungsgruppe) (2010)

Im Zuge der Rohstoffinitiative („Sicherung der Versorgung Europas mit den für Wachstum und Beschäftigung notwendigen Gütern“) veröffentlichte die Ad-hoc Working Group (Untergruppe der Rohstoffversorgungsgruppe) im Juli 2010 einen Bericht zur Definition kritischer Rohstoffe („Critical raw materials for the EU“).
Da Zahlen zur globalen Reserve an Rohstoffen keine verlässlichen Indikatoren für Langzeitverfügbarkeit sind, gehen die Autoren davon aus, dass die geologische Knappheit im betrachteten Zeitraum (von z.B. einem Jahrzehnt) keine Auswirkungen auf die geologische Verfügbarkeit hat und damit nicht relevant ist für die Bestimmung der Kritikalität von Rohstoffen. Als relevant hingegen werden Veränderungen der geopolitisch-ökonomischen Rahmenbedingungen eingeschätzt, die starke Auswirkungen auf die Versorgung und die Nachfrage nach Rohstoffen haben.
Ein Rohstoff wird als *kritisch* bezeichnet, wenn das Risiko für Versorgungsengpässe und deren Auswirkungen auf die Wirtschaft größer sind als bei den meisten anderen Rohstoffen. Es handelt sich hier also um ein relatives Konzept der Kritikalität.
Es werden 2 Arten von Risiken berücksichtigt:

- Das Versorgungsrisiko (supply risk)
  berücksichtigt die politisch-ökonomische Stabilität der produzierenden (abbauenden) Länder, das Ausmaß der Konzentration der Produktion, das Substitutionspotential und die Recyclingrate eines Rohstoffes.
- Das umweltpolitische Risiko (environmental country risk)
  bewertet das Risiko, dass ein produzierendes Land Maßnahmen zum Umweltschutz ergreift (ergreifen muss) und somit die weltweite Versorgung mit einem Rohstoff gefährden kann.

Abbildung 1 zeigt das von der Ad-hoc Arbeitsgruppe erstellte Diagramm, in dem 41 Rohstoffe bzw. Rohstoffgruppen nach ihrer wirtschaftlichen Bedeutung (Abszisse) für die Europäische Union und ihrem Versorgungsrisiko (Ordinate) aufgetragen und zu Clustern zusammengefasst werden.

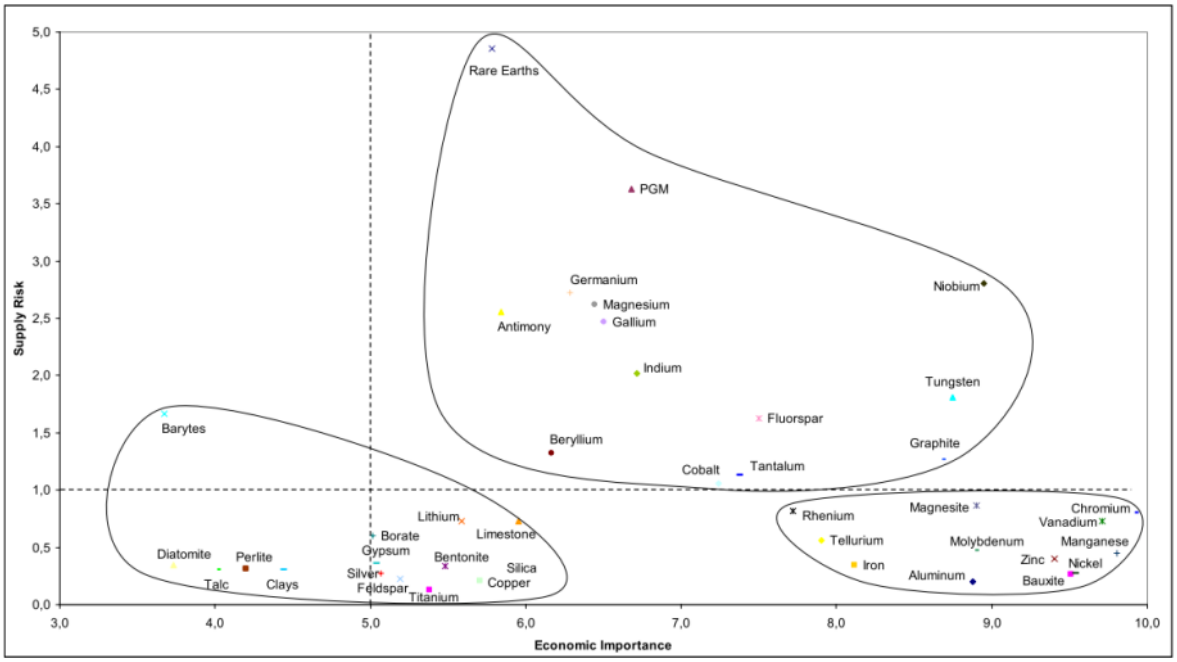

Abbildung 1 Darstellung der wirtschaftlichen Bedeutung und des Versorgungsrisikos kritischer Elemente für die EU (Abbildung aus Critical raw materials for the EU (Europäische Kommission 2010))

Die 14 Rohstoffe/Rohstoffgruppen im Cluster rechts oben (wirtschaftliche Bedeutung > 5, Versorgungsrisiko > 1) werden als kritisch eingestuft. Der Faktor umweltpolitisches Risiko ändert die Liste der kritischen Rohstoffe hier nicht und wird deshalb auch nicht extra dargestellt.

Antimon	Sb	Indium	In
Beryllium	Be	Magnesium	Mg
Kobalt	Co	Niob	Nb
Flussspat	CaF_2	Platingruppenmetalle	Ru, Rh, Pd; Os, Ir, Pt
Gallium	Ga	Seltenerdmetalle	Sc, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu; Y, Gd, Tb, Dy Ho, Er, Tm Yb, Lu
Germanium	Ge	Tantal	Ta
Graphit	C	Wolfram	W

Tabelle 1 Auflistung der kritischen Rohstoffe auf EU-Ebene (in alphabetischer Reihenfolge)

Wie Tabelle 1 zu entnehmen ist, handelt es sich bei den Platingruppenmetallen und bei den Seltenerdmetallen jeweils um Rohstoffgruppen.

Die Platingruppenmetalle umfassen 6 Elemente:

Leichte Platinmetalle:	Ruthenium	Schwere Platinmetalle:	Osmium
	Rhodium		Iridium
	Palladium		Platin

Zu den 17 Metallen der Seltenen Erden gehören:

Leichte Seltenerdmetalle (8):	Scandium	Schwere Seltenerdmetalle (9):	Yttrium
	Lanthan		Gadolinium
	Cer		Terbium
	Praseodym		Dysprosium
	Neodym		Holmium
	Promethium		Erbium
	Samarium		Thulium
	Europium		Ytterbium
			Lutetium

Da dieses Modell der Ad-hoc Arbeitsgruppe der EU auch auf das System Österreich angewendet wird (siehe Kapitel 2.1.2), wird die Methodik zur Bestimmung der Kritikalität von Rohstoffen im Folgenden näher erläutert.

Ermittlung der wirtschaftlichen Bedeutung

Die wirtschaftliche Bedeutung eines Rohstoffes wird bestimmt, indem zunächst die Hauptanwendungsbereiche ermittelt werden. Diese Bereiche werden nun zu Wirtschaftssektoren, sogenannten „Megasektoren", zusammengefasst und als (Brutto)Wertschöpfung im Verhältnis zum Bruttoinlandsprodukt ausgedrückt. Die bei dieser Methode verwendeten Wertschöpfungsketten („Megasektoren") bestehen aus wirtschaftlichen Bereichen, die voneinander abhängen, und beschreiben, wie sich Versorgungsengpässe auf die Wirtschaft auswirken.

Ein Beispiel für einen Megasektor ist der Sektor „Metalle", der aus den Bereichen „Elementare Metalle", „Gefertigte Metalle" und „Recyclierte Metalle" besteht und in der EU im Jahr 2006 11 % der Produktionswertschöpfung darstellte.

Gleichung 1 zeigt die Berechnung der wirtschaftlichen Bedeutung (Economic Importance EI) für einen Rohstoff i. A_{is} entspricht dem Anteil einer bestimmten Verwendung des Rohstoffes i im Megasektor s und wird gewichtet nach der Wertschöpfung dieses Megasektors Q_s. Die Summe aller gewichteten Verwendungen eines Rohstoffes wird auf das Bruttoinlandsprodukt (BIP) bezogen und ergibt die wirtschaftliche Bedeutung EI.

$$EI_i = \frac{1}{BIP} \sum A_{is}\, Q_s$$

Gleichung 1 Berechnung der wirtschaftlichen Bedeutung EI_i eines Rohstoffes i

Ermittlung des Versorgungsrisikos

Das Versorgungsrisiko hängt von mehreren Faktoren ab: von der politischen Stabilität der abbauenden Länder, vom Grad der Konzentration des Rohstoffabbaus (in wie vielen Ländern wird der Rohstoff i produziert?), von der Substituierbarkeit des Rohstoffes i und von seiner Recyclingquote.

Die ersten beiden Faktoren, die politische Stabilität und das Ausmaß der Konzentration der Produktion werden durch den Herfindahl-Hirschmann-Index HHI ausgedrückt.

$$HHI_{WGI} = \sum_{c} (S_{ic})^2 \; WGI_c$$

Gleichung 2 Berechnung des Herfindahl-Hirschmann-Index HHI_{WGI}

Der Herfindahl-Hirschmann-Index HHI_{WGI} in Gleichung 1 setzt sich zusammen aus S_{ic}, dem Anteil des Landes c an der Weltproduktion (Daten aus der World Mining Data (Weber et al. 2011)), und dem Worldwide Governance Indicator WGI_c des Landes c als Maß für die Stabilität eines Landes (Daten von der Weltbank auf http://info.worldbank.org/governance/wgi/sc_country.asp). Die Summe über alle produzierenden Länder ergibt den Herfindahl-Hirschmann-Index HHI_{WGI}.

Die Werte für WGI_c von der Weltbank variieren von -2,5 bis +2,5, wobei hohe Werte für ein stabiles politisches System stehen. In der Berechnung der ad-hoc Arbeitsgruppe der EU werden die Werte für WGI_c von 0 bis 10 neu skaliert und invertiert, sodass ein hoher Wert für WGI_c auf eine geringe Stabilität des Landes c schließen lässt.

Ein weiterer Faktor, der auf das Versorgungsrisiko Einfluss nimmt, ist die Möglichkeit, einen Rohstoff durch einen anderen, idealerweise leichter verfügbaren, zu ersetzen. Die Gesamt-Substituierbarkeit σ_i eines Rohstoffes i wird beschrieben durch die Substituierbarkeit σ_{is} eines Rohstoffes i im Megasektor s gewichtet nach A_{is}, dem Anteil am Verbrauch des Rohstoffes i im Megasektor s. Da die Substitution eines Rohstoffes nur anwendungsbezogen erfolgen kann, werden die einzelnen Substitutierbarkeiten σ_{is} eines Rohstoffes i in den Megasektoren s zur Gesamt-Substituierbarkeit σ_i des Rohstoffes i summiert.

$$\sigma_i = \sum_{s} A_{is} \, \sigma_{is}$$

Gleichung 3 Berechnung der Substituierbarkeit σ_i

Die Substituierbarkeit σ_{is} kann folgende Werte annehmen:

0.0 leicht und vollständig zu ersetzen ohne zusätzliche Kosten
0.3 ersetzbar verbunden mit niedrigen Kosten
0.7 ersetzbar verbunden mit hohen Kosten und/oder Leistungseinbußen
1.0 nicht ersetzbar

Der Faktor Recycling fließt als Recyclingrate ρ_i ein und entspricht dem Verhältnis von recyceltem Material („Sekundärrohstoff“) zum Verbrauch an primärem Rohstoff.

Die 3 Parameter HHI_{WGI}, σ_i und ρ_i werden im Versorgungsrisiko SR_i zusammengeführt.

$$SR_i = \sigma_i \, (1 - \rho_i) \, HHI_{WGI}$$

Gleichung 4 Berechnung des Versorgungsrisikos SR_i

Diese Gleichung verdeutlicht, dass das Versorgungsrisiko besonders groß wird, wenn die produzierenden Länder politisch instabil sind und einen hohen Anteil an der weltweiten Produktion

eines Rohstoffes liefern (Stichwort Konzentration) und sowohl die Ersetzbarkeit als auch die Recyclingrate gering sind.

Ermittlung des umweltpolitischen Risikos (environmental country risk)

Um das umweltpolitische Risiko abzuschätzen, wird ein Environmental Country Index (EM_i) eingeführt, der die Risiken darstellen soll, die aus umweltpolitischen Gründen entstehen können. Dieser Index wird analog zum Versorgungsrisiko berechnet mit dem Unterschied, dass anstatt des Parameters HHI_{WGI} hier der Environmental Performance Index HHI_{EPI} verwendet wird.

$$EM_i = \sigma_i \, (1 - \rho_i) \, HHI_{EPI}$$

Gleichung 5 Berechnung des umweltpolitischen Risikos EM_i

Der Herfindahl-Hirschmann-Index HHI_{EPI} wird analog zum HHI_{WGI} (Gleichung 2) berechnet.

$$HHI_{EPI} = \sum_c (S_{ic})^2 \; EPI_c$$

Gleichung 6 Berechnung des Herfindahl-Hirschmann-Index HHI_{EPI}

S_{ic} entspricht hier wieder dem Anteil des Landes c an der Weltproduktion (Daten aus der World Mining Data (Weber et al. 2011)), EPI_c ist der Environmental Performance Index des Landes c (Daten auf http://epi.yale.edu/). Die Summe über alle produzierenden Länder ergibt den Herfindahl-Hirschmann-Index HHI_{EPI}. Der EPI_c reiht Länder nach Leistungsindikatoren (performance indicators) auf der Basis von Richtlinien, die sowohl Umwelt- und Gesundheitswesen als auch die Vitalität des Ökosystems berücksichtigen, und stellt so eine Skala dar, wie nahe Länder an der Erfüllung von weltweit etablierten umweltpolitischen Zielen sind. (Österreich wurde 2012 beispielsweise als 7. Land gereiht [hinter CH, LV, NOR, L, CR und F].)

Wie beim Versorgungsrisiko werden in der Berechnung der Ad-hoc Arbeitsgruppe der EU die Werte für EPI_c von 0 bis 10 neu skaliert und invertiert, sodass ein hoher Wert für EPI_c auf ein hohes umweltpolitisches Risiko des Landes c schließen lässt.

2.1.2 Kritikalitätsbeurteilung für Österreich und Auswahl der Stoffe für die Stoffflussanalysen (SFA)

Als Grundlage für die Stoffauswahl wird die Methode zur Kritikalitätsbeurteilung der Ad-hoc Working Group der Europäischen Kommission (Kapitel 2.1.1) verwendet. Dazu wird die Zuordnung der 14 kritischen Rohstoffe bzw. Rohstoffgruppen (die für die EU identifiziert wurden) zu den verschiedenen Megasektoren auch für Österreich angewendet, um die Kritikalität der einzelnen Rohstoffe in Österreich mit der Europäischen Union vergleichen zu können und so aus der EU-Liste besonders relevante Stoffe für Österreich zu identifizieren.

Die Kritikalität setzt sich aus 2 Komponenten zusammen, der wirtschaftlichen Bedeutung EI_i des Rohstoffs für eine Volkswirtschaft (in Abbildung 2 auf der Abszisse aufgetragen) und dem Versorgungsrisiko SR_i, mit dem dieser Rohstoff behaftet ist (auf der Ordinate in Abbildung 2).

Die wirtschaftliche Bedeutung EI_i wird auf das österreichische BIP 2011 bezogen und nach *Gleichung 1* berechnet. Welche Produktionszweige zu Megasektoren zusammengefasst werden, wird im EU-ad-hoc-Bericht durch NACE-Codes beschrieben. Als Äquivalent für Österreich werden hier die ÖNACE-2008-Codes verwendet. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den EU-Daten und den Daten für Österreich herzustellen, muss die Auswertung – anstatt wie im EU-Ad-hoc-Bericht auf monetärer Basis – auf prozentueller Basis erfolgen. Das heißt das Verhältnis „Bruttowertschöpfung zu Faktorkosten“ in €uro (im EU-Ad-hoc-Bericht wird dieser Wert als „Wertschöpfung“ bezeichnet) wird in Prozent ausgedrückt.

Das Versorgungsrisiko SR_i wird nach Gleichung 4 bzw. Gleichung 2 für HHI_{WGI} berechnet. Recyclingquoten und eventuelle Substituierbarkeiten der einzelnen Rohstoffe (ob und wie ein Rohstoff gegebenenfalls ersetzbar wäre, variiert von Anwendung zu Anwendung) könnten das jeweilige Versorgungsrisiko verringern, werden hier aber wegen der schlechten Datenlage für eine erste Abschätzung nicht berücksichtigt.

Sowohl bei der wirtschaftlichen Bedeutung als auch beim Versorgungsrisiko ist zu beachten, dass es sich hierbei um relative Werte handelt. Das Versorgungsrisiko der einzelnen Elemente wie in Abbildung 2 dargestellt weicht von dem im Bericht der EU Ad-hoc Working Group errechneten Versorgungsrisiko (nach oben) ab, da Recyclingquoten und Substituierbarkeiten – wie schon erwähnt – hier nicht berücksichtigt werden.

Eine Abschätzung der Kritikalität wird für folgende Rohstoffe vorgenommen:

Seltenerdmetalle, 3 Vertreter der Platingruppenmetalle (Palladium, Platin und Rhodium), Niob, Tantal, Gallium, Germanium, Indium, Antimon und Kobalt.

Für Beryllium, Flussspat, Graphit, Magnesium, Wolfram, und die 3 Platingruppenmetalle Iridium, Osmium und Ruthenium finden sich in den verwendeten Quellen Angerer et al. (2009) und Weber et al. (2011) keine Daten, daher sind sie in Abbildung 2 nicht inkludiert.

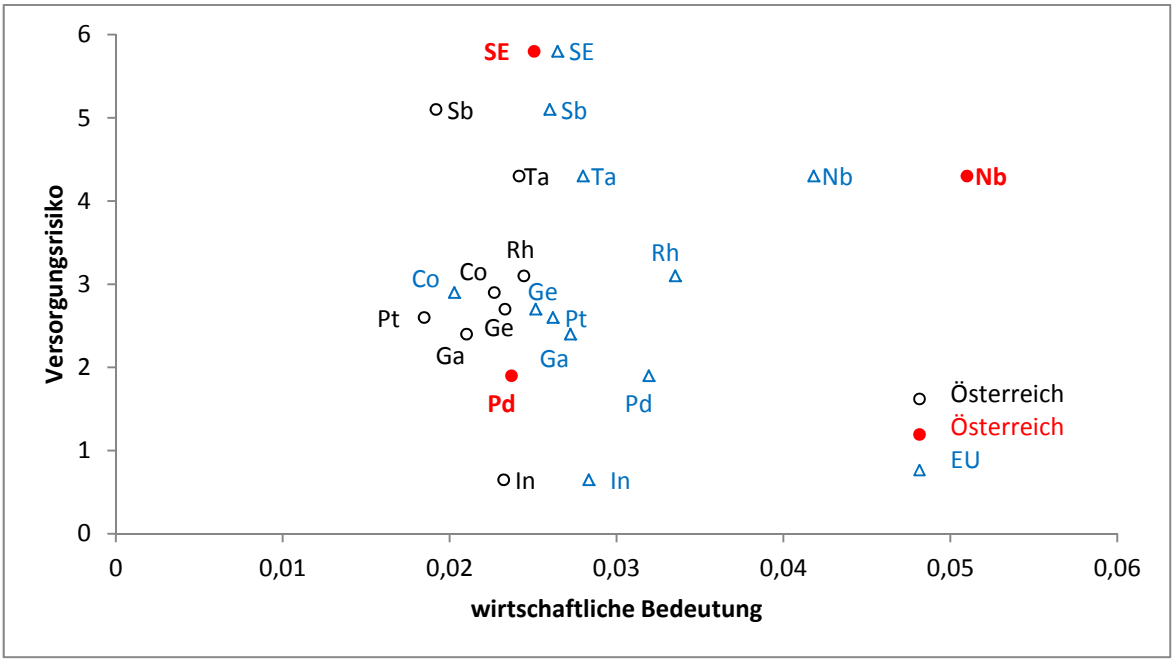

Abbildung 2 *Darstellung der wirtschaftlichen Bedeutung und des Versorgungsrisikos kritischer Elemente für Österreich und die EU (Abbildung auf Grundlage von Daten aus Angerer et al. (2009) und Weber et al. (2011).*
Die Rohstoffe Nb und Pd und die Rohstoffgruppe Seltene Erden (mit Nd), die für die SFA ausgewählt wurden, sind rot mit gefüllten Markierungen hervorgehoben.

Das Versorgungsrisiko, das von der Anzahl an Ländern, die diesen Rohstoff produzieren, und deren politischer Stabilität abhängt, ist für die Seltenerdmetalle am größten, da derzeit > 97 % der weltweit gehandelten Seltenen Erden in China abgebaut werden.

Niob ist nach Abbildung 2 Darstellung der wirtschaftlichen Bedeutung und des Versorgungsrisikos kritischer Elemente für Österreich und die EU (Abbildung auf Grundlage von Daten aus Angerer et al. (2009) und Weber et al. (2011).in Österreich das Element mit der größten wirtschaftlichen Bedeutung, da der Metallsektor, in dem Nb zu > 95 % Verwendung findet, in Österreich wichtiger ist als im EU-Durchschnitt, d.h. der Metallsektor hat in Österreich einen höheren Anteil an der Brutto-Wertschöpfung als in der EU.

Die meisten Elemente in Abbildung 1 (alle außer Nb und Co) finden zu großen Teilen in den Megasektoren „Elektronik & Informations- und Kommunikationstechnologie“, „Straßenverkehr“ oder „Chemikalien“ Verwendung, die eine deutlich niedrigere Wertschöpfung haben als die Megasektoren „Metalle“ und „Maschinelle Ausrüstung“. – In Österreich dominieren diese beiden Megasektoren stärker über die anderen genannten Megasektoren als im EU-Durchschnitt, daher ist die wirtschaftliche Bedeutung bei allen Elementen außer Nb und Co in Österreich geringer als in der EU. Kobalt wird zu 1/3 im Megasektor „Maschinelle Ausrüstung“ verwendet, dessen prozentuelle Brutto-Wertschöpfung in Österreich ebenfalls über dem EU-Durchschnitt liegt.

In Ergänzung zu den Ergebnissen der Kritikalitätsbewertung auf nationaler Ebene anhand der EU-Methodik (vgl. Abbildung 2), werden die Ergebnisse aus den Gesprächen der Montanuniversität

Leoben mit den Industriepartnern berücksichtigt. Dadurch wird auch die Einschätzung ausgewählter Hochtechnologieunternehmen bei der Stoffauswahl miteinbezogen.

Schließlich werden folgende Stoffe für die SFA ausgewählt:

- Neodym (Nd) als Vertreter der Seltenen Erden
- Palladium (Pd) als Vertreter der Platingruppenelemente und
- Niob (Nb)

2.2 Stoffflussanalyse (SFA)

Die Methode der SFA nach Baccini & Brunner (1991) und Brunner & Rechberger (2004) ist ein geeignetes Werkzeug zur Beschreibung und Analyse beliebig komplizierter Systeme. Gemäß ÖNORM S 2096 (Anwendung in der Abfallwirtschaft – Teil 1: Begriffe; Teil 2: Methodik (2005a und 2005b)) dient die SFA zur Identifizierung und Quantifizierung aller relevanten Flüsse von Stoffen in einem zeitlich und räumlich exakt abgegrenzten System und erlaubt eine Bilanzierung der Stoffe innerhalb dieses Systems. Die Grundlage für die SFA bildet das Massenwirkungsgesetz: Über eine einfache Massenbilanz werden alle Input- und Output-Flüsse sowie die Lager und deren Änderungen verglichen und bilanziert. Der Vorteil der SFA ist, dass ein komplexes System auf die für eine Fragestellung relevanten Stoffe/Güter und Prozesse reduziert und auf anschauliche Weise dargestellt werden kann. Durch die Kenntnis der Stoffströme können Systeme so gestaltet werden, dass Stoffe optimal verwendet, verwertet, rezykliert oder abgelagert werden können. Auch zielgerichtete Maßnahmen und Szenarien zur Optimierung können aus einer SFA abgeleitet werden. Besonders relevant ist, dass die Potentiale sekundärer Rohstoffe in anthropogenen Systemen aufgezeigt werden können – Stichwort „urban mining“.

Als System können z.B. Betriebe, private Haushalte, Städte oder Regionen definiert und modelliert werden.

Um mit SFAs arbeiten zu können, müssen zunächst die wichtigsten Begriffe definiert werden (Brunner und Rechberger 2012):

Ein *Stoff* besteht aus identischen Einzelteilen (Atomen oder Molekülen) und ist entweder ein chemisches Element oder eine chemische Verbindung in reiner Form.

Ein *Gut* besteht aus einem oder mehreren Stoffen und ist handelbar – es kann sowohl positiven als auch negativen Wert haben.

Material ist ein allgemeiner Begriff, der sowohl Güter als auch Stoffe umfassen kann und damit Rohmaterialien (geogene Materien) sowie alle bereits vom Menschen durch physikalische oder chemische Prozesse veränderten Stoffe (anthropogene Materialien) einschließt.

Ein *Prozess* beschreibt die Umformung, den Transport oder die Lagerung von Gütern und Stoffen. Ein Prozess wird oft als Black Box definiert. Sollen die Vorgänge innerhalb des Prozesses näher untersucht werden, kann der Prozess in *Subprozesse* gesplittet werden.

Im Rahmen der SFA bezeichnet man die Elemente eines Systems als *Prozesse* und *Flüsse* (Güter-, Stoff- bzw. Materialflüsse). *Systemgrenzen* definieren die zeitliche und räumliche Abgrenzung des zu

untersuchenden Systems. Materialflüsse in ein System hinein werden als *Importe*, solche aus dem System hinaus als *Exporte* bezeichnet, wobei immer gilt: Input = Output +/- Lageränderung.

Als *Fluss* wird die pro Zeiteinheit zwischen 2 Prozessen bewegte Masse an Gütern bzw. Stoffen bezeichnet (Einheit Masse/Zeit).

Ein *Lager* wird definiert als der Bestand von Gütern oder Stoffen innerhalb eines Prozesses.

Die allen SFAs gemeinsame, einheitliche Sprache erleichtert es, Systeme sowohl horizontal als auch vertikal miteinander zu verknüpfen. (Eine horizontale Verknüpfung wäre z.B. die Verbindung von Stoffflüssen zw. 2 Nachbarregionen, eine vertikale Verknüpfung bspw. eine Integration der Stoffflüsse eines Unternehmens in die Gesamtflüsse der das Unternehmen umgebenden Region).

SFAs werden nicht linear, sondern vielmehr iterativ erstellt. Der Ablauf der einzelnen aufeinander aufbauenden Arbeitsschritte ist im Regelblatt 514 des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes detailliert beschrieben (ÖWAV 2003) sowie in der bereits erwähnten ÖNORM S 2096, Teil 1 und Teil 2 (ÖNORM 2005a, 2005b) normativ geregelt.

Bedingt durch ihr einfaches Prinzip haben SFAs einen breiten Anwendungsbereich vom Ressourcenmanagement bis zur Abfallwirtschaft.

Um die SFAs anhand von Daten und Abschätzungen zu quantifizieren, wurden Daten zu den Hauptanwendungen der Stoffe, den jeweiligen Konzentrationen in Produkten und Produktmengen als auch statistische Daten zu Produktionsmengen, Import und Export sowie dem Inlandsverbrauch der Rohstoffe gesammelt. Die Daten stammen aus Literaturquellen, von statistischen bzw. geologischen Diensten und von Firmen in den betroffenen Branchen (durch direkte Anfragen). Die kontinuierliche Verdichtung der vorhandenen Daten bedingt in der Regel auch eine Anpassung des Stoffflusssystems, damit eine Quantifizierung der Flüsse und Lager möglich ist.

Für die 3 SFAs für Neodym (Nd), Niob (Nb) und Palladium (Pd) werden einheitliche Systemgrenzen definiert: Die räumliche Grenze der Systeme ist jeweils die österreichische Staatsgrenze, da alle Stoffflüsse innerhalb Österreichs betrachtet werden sollten. Alle Stoffflüsse, die von außen in das System Österreich hinein fließen, sind somit Importe, alle Flüsse aus Österreich hinaus Exporte.

Die zeitliche Grenze der Systeme ist jeweils das Kalenderjahr 2011.

Ziel der SFAs ist es, die wesentlichen Flüsse und Lager für Neodym, Niob und Palladium in Österreich zu identifizieren und durch anschließende Recherche – so weit wie möglich – zu quantifizieren. Als Informationsquellen dienen v.a. öffentliche Statistiken, wissenschaftliche Berichte und Anfragen bei relevanten Unternehmen und Institutionen.

Aufgrund der unsicheren Datenlage wird bei der Erstellung der SFAs ein Bottom-up-Approach gewählt und teilweise mit einem Top-down-Ansatz kombiniert. Das heißt, dass die Güter, in denen der jeweilige Rohstoff (Nd, Nb oder Pd) Verwendung findet, ermittelt und diese dann Prozessen zugeordnet werden. Die Prozesse werden durch Flüsse miteinander verbunden und es wird versucht, sowohl die Flüsse als auch die Lager innerhalb der Prozesse zu quantifizieren, um das anfangs approximative System zu präzisieren. Die Stoffflüsse im System werden dann den Bilanzdaten auf nationaler oder übergeordneter Ebene (z.B. Gesamtproduktion eines bestimmten Gutes, gesamte importierte Menge eines Rohstoffes usw.) gegenüber gestellt bzw. mit diesen ergänzt. Diese

Vorgehensweise erlaubt trotz teilweise gravierender Datenlücken bzw. hoher Unsicherheiten (zumindest indirekt) Schlüsse zur Plausibilität der Stoffbilanzen zu ziehen.

STAN®

Für die ausgewählten Stoffe Nd, Nb und Pd werden zunächst qualitative Stoffhaushaltsysteme mittels STAN®, einer an der TU Wien entwickelten Spezialsoftware für SFA, erstellt.

STAN (kurz für STofffluss ANalyse) 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. Neben der Modellierung der eingegebenen Daten ermöglicht STAN auch eine grafische Darstellung der SFA-Ergebnisse in Form eines Sankey-Diagramms.

Mittels STAN ist basierend auf der Berücksichtigung von Unsicherheiten der Inputdaten eine Fehlerfortpflanzungsrechnung möglich, wodurch eine Beurteilung der Aussagekraft der SFA-Ergebnisse erleichtert wird. Außerdem können die Flüsse oder Lager mit den größten Unsicherheiten identifiziert und entsprechender Forschungsbedarf abgeleitet werden.

STAN geht von der Annahme aus, dass die eingegebenen, unsicheren Daten normalverteilt sind und durch ihren Mittelwert und ihre Standardabweichung ausreichend beschrieben werden können. Wenn mehr Daten im System gegeben sind, als für die Berechnung von eventuellen Unbekannten notwendig sind (überbestimmtes Gleichungssystem), führt das Programm eine Ausgleichsrechnung durch. Dadurch werden die mit Unsicherheiten versehenen Werte derart verändert, dass die Unsicherheiten möglichst klein und eventuelle Widersprüche beseitigt werden. Der Datenausgleichsrechnung liegt die Methode der kleinsten Fehlerquadrate zugrunde, die es auch ermöglicht, unbekannte Größen und deren Unsicherheitsbereiche zu bestimmen.

Unsicherheiten

Da aufgrund vorhandener Datenlücken und großer Schwankungsbreiten zahlreiche Schätzungen für eine Bilanzierung der Systeme notwendig sind, kommt der Berücksichtigung von Unsicherheiten eine besondere Bedeutung bei der Erstellung der SFAs zu (vgl. Hedbrandt und Sörme 2001).

Den einzelnen (empirisch ermittelten) Daten werden Unsicherheitsklassen zugeordnet. Die im Rahmen von Literaturrecherchen ermittelten Daten werden 3 Kategorien zugeordnet: sichere Datenlage, mittlere Datenlage und unsichere Datenlage. Der recherchierte Wert wird als Mittelwert angenommen. Jedem Wert wird ein Schwankungsbereich zugeordnet, der wiederum dem 95 % Konfidenzintervall 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. Das mittlere Unsicherheitsniveau wird Werten, die in nur einem Bericht aufzufinden waren, die sich auf ein abweichendes Referenzjahr beziehen oder die evtl. nur bedingt übertragbar sind, zugeordnet. Eigene Schätzungen bzw. nicht belegte Literaturangaben werden mit hohen Datenunsicherheiten versehen.

Kategorie	95 % Konfidenzintervall	Standardabweichung
geringe Datenunsicherheit	+/- 25 % von X	$\sigma = X + 1/8$
mittlere Datenunsicherheit	+/- 50 % von X	$\sigma = X + ¼$
hohe Datenunsicherheit	+/- 90 % von X	$\sigma = X + 9/20$

Tabelle 2 Schwankungsbereiche nach Kategorien und Berechnung der jeweiligen Standardabweichung

3 SFA für Nd

Allgemeines über Nd

Neodym ist ein chemisches Element mit dem Elementsymbol Nd und der Ordnungszahl 60. Im Periodensystem steht es in der Gruppe der Lanthanoide und zählt damit auch zu den Metallen der Seltenen Erden. Die Elementbezeichnung leitet sich von den griechischen Worten neos „neu“ und didymos „Zwilling“ (als Zwilling von Lanthan) ab.

Neodym wurde 1885 zusammen mit Praseodym aus Didym isoliert. Reines metallisches Neodym wurde erst 1925 dargestellt.

Neodym kommt in natürlicher Form nur in chemischen Verbindungen vergesellschaftet mit anderen Lanthanoiden, vorzugsweise Mineralien, in Monazit, Bastnäsit und Cer-Mischmetall (enthält bis zu 18 % Nd) vor.

Das silbrigweiß glänzende Metall gehört zu den Lanthanoiden und Metallen der Seltenen Erden.

Es ist an der Luft etwas korrosionsbeständiger als Europium, Lanthan, Cer oder Praseodym, bildet aber leicht eine rosaviolette Oxid-Schicht aus, welche an der Luft abblättern kann.

Produktion (2005)	19.555 t Nd-Oxid Nd_2O_3
Reserven	88 – 110 Mio. t Seltenerdoxide
Ressourcen	150 Mio. t Seltenerdoxid
Statische Reservenreichweite	715 Jahre für Seltenerdoxide
Statische Ressourcenreichweite	1.220 Jahre für Seltenerdoxide
Regionale Konzentration der Produktion	China: > 95 % bzw. 97 %
Regionale Konzentration der Reserven	China: 48 % GUS: 17 % USA: 12 % (Top 3: 77 %)

Tabelle 3 Produktionsdaten von Neodym (Quellen: Angerer et al. 2009, Lutz 2010; USGS 2012)

Hauptanwendungen von Nd

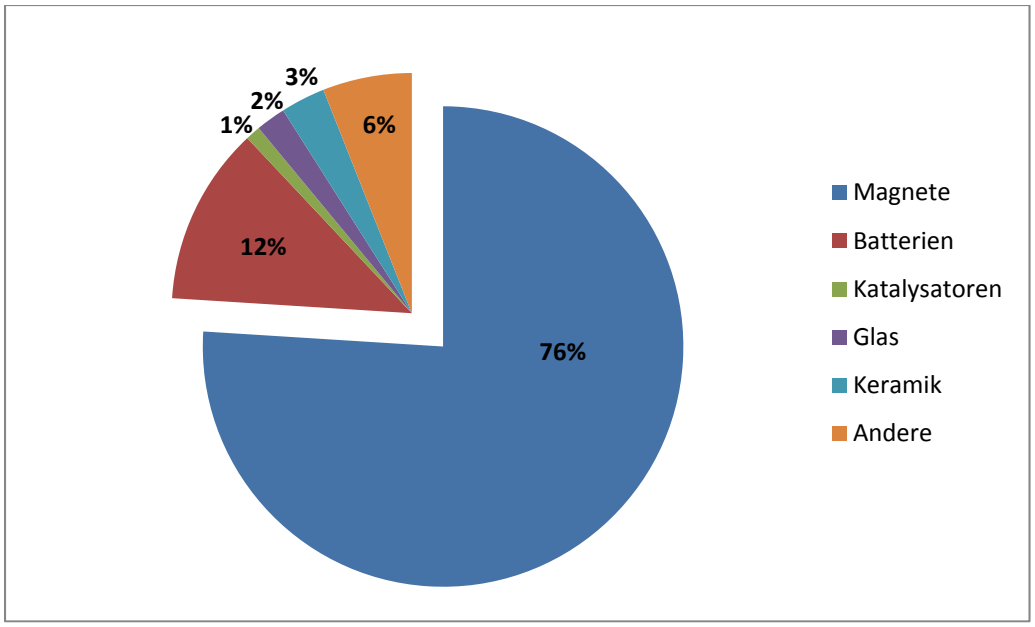

Abbildung 3 Globale Verwendung von Neodym im Jahr 2010 (Buchert et al. 2011)

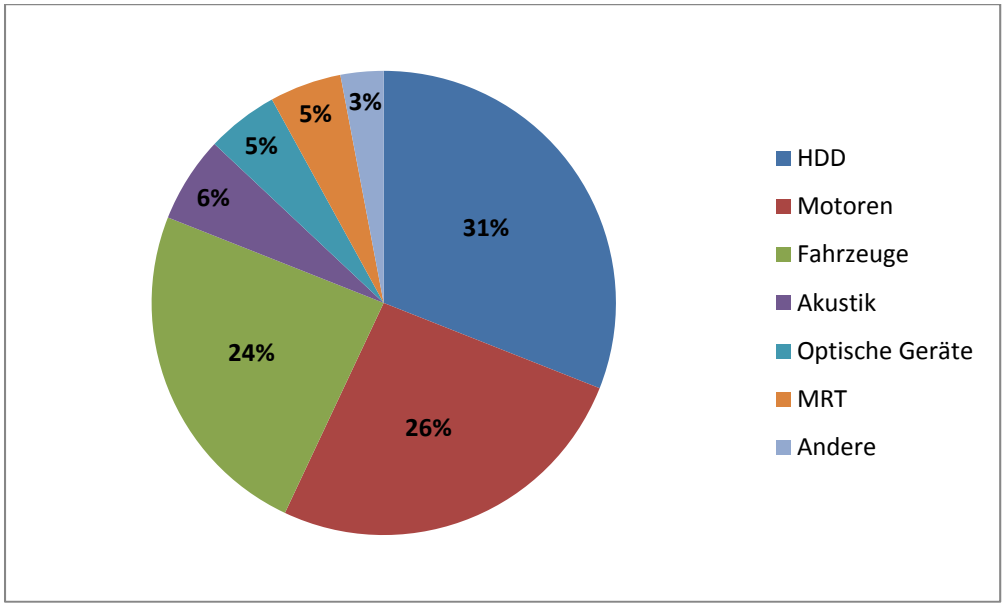

Abbildung 4 Anwendungen der NdFeB-Magnete 2009 (Moss et al. 2011)

Da Neodym in beinahe allen Anwendungsgebieten als Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnet verwendet wird, soll dieser vorab genauer beschrieben werden.

Hochleistungs-Permanentmagnete $Nd_2Fe_{14}B$

Laut Buchert et al. (2011) wurden 2010 76 % des verfügbaren Neodyms zur Herstellung von Permanentmagneten verwendet.

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). 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 der magnetische Fluss 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.

Materialien, die sich zur Verwendung als Permanentmagneten eignen, sind z.B. Hartferriten, Seltene-Erden-Magneten (NdFeB oder SmCo) oder Aluminium-Nickel-Kobalt-(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^3 (Haring et al. 2003). Rodewald et al. (2002) sprechen sogar von Energiedichten bis 420 kJ/m^3.

Neodym-Eisen-Bor-(NdFeB)-Permanentmagnete sind zwar stärker als Samarium-Kobalt-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 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: 72,3 % Eisen, 26,7 % Neodym und 1 % Bor (Angerer et al., 2009).

Abbildung 5 Zeitliche Entwicklung der Permanentmagnete gegen die Energiedichte (Gutfleisch et al. 2011) zeigt die zeitliche Entwicklung der Permanentmagnete 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.

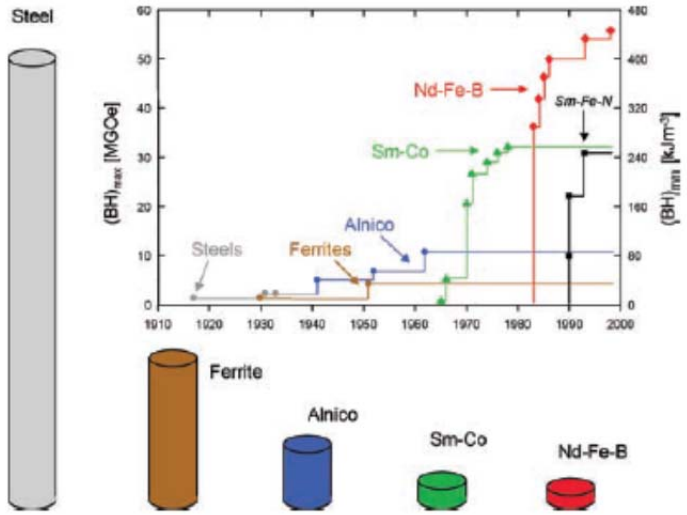

Abbildung 5 Zeitliche Entwicklung der Permanentmagnete gegen die Energiedichte (Gutfleisch et al. 2011)

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 Erstellung der Stoffflussanalyse von Neodym ist es von grundlegender Bedeutung, dass die Molmassenkonzentration von Neodym in Permanentmagneten bekannt ist. Tabelle 4 zeigt die der Literatur entnommenen Molmassenkonzentrationen für Neodym, Dysprosium, Eisen und Bor.

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%[1]	3 wt%	-	-
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%	-	-	-

Tabelle 4 Molmassenkonzentration NdFeB in Permanentmagneten

[1] Neodym/Praseodym Gemisch, von Öko Institut 2011 angenommen

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.

Prozesse der SFA

Die SFA für Neodym in Österreich (2011) wurde in folgende Prozesse gegliedert:

- Verarbeitende Industrie
- Private Haushalte
- Medizin & Forschung
- Windkraftwerke
- Abfallwirtschaft

3.1 Windkraftwerke

3.1.1 Nd-Fe-B-Permanentmagnete in (getriebelosen) Windkraftanlagen

Neodym wird in Form von Neodym-Eisen-Bor(NdFeB)-Permanentmagneten in getriebelosen Windkraftanlagen (WKA) verbaut.

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).

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 1.084 MW im Jahr 2011 (IG Windkraft, 2011). Die Einsatzdauer einer Windkraftanlage wird auf 20 Jahre geschätzt (Schittl 2012; Du und 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.

Eine klassische Windkraftanlage besteht aus 3 Teilen (Murphy&Spitz Research 2011): Rotor, Getriebe und Generator. Im Falle der getriebelosen Windkraftanlagen WKA mit Direktantrieb fällt das Getriebe weg, diese bestehen folglich nur aus Rotor und Generator. WKA mit Direktantrieb werden entweder mit kupferhaltigen Elektromagneten oder mit starken Permanentmagneten betrieben (Murphy&Spitz Research 2011). Einige Vorteile der WKA mit Direktantrieb sind, dass sie wartungsfrei bzw. -arm sind

und dass die Betriebskosten, bedingt durch die Einsparung des Schmieröls für das Getriebe, niedriger sind (Nicole Weinhold 2010).

Das deutsche 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 zur Verwendung von Permanentmagneten in ihren Produkten befragt. Da diese Befragung nicht alle notwendigen Informationen lieferte, wurde zusätzlich versucht, durch Internetrecherche bei den Unternehmen Informationen zu finden und dadurch auf die Verwendung von Nd-Fe-B-Permanentmagneten schließen zu können.
Laut IG Windkraft lag 2011 der Anteil der Windenergie am Energieverbrauch bei 3,6 % und die Prognose für 2012 bei 4,9 %. Insgesamt lag die in Österreich installierte Leistung Ende 2011 bei 1084 MW, wobei davon 73 MW im Jahr 2011 errichtet wurden (IG Windkraft 2011). Die IG Windkraft (2011) beziffert die durchschnittliche Anlagengröße, die 2011 errichtet wurde, mit 2,2 MW. Wie in Abbildung 6 ersichtlich, teilen sich die 1084 MW installierte Leistung auf einige verschiedene Hersteller auf, wobei Enercon und Vestas gemeinsam 82 % der Marktanteile halten.

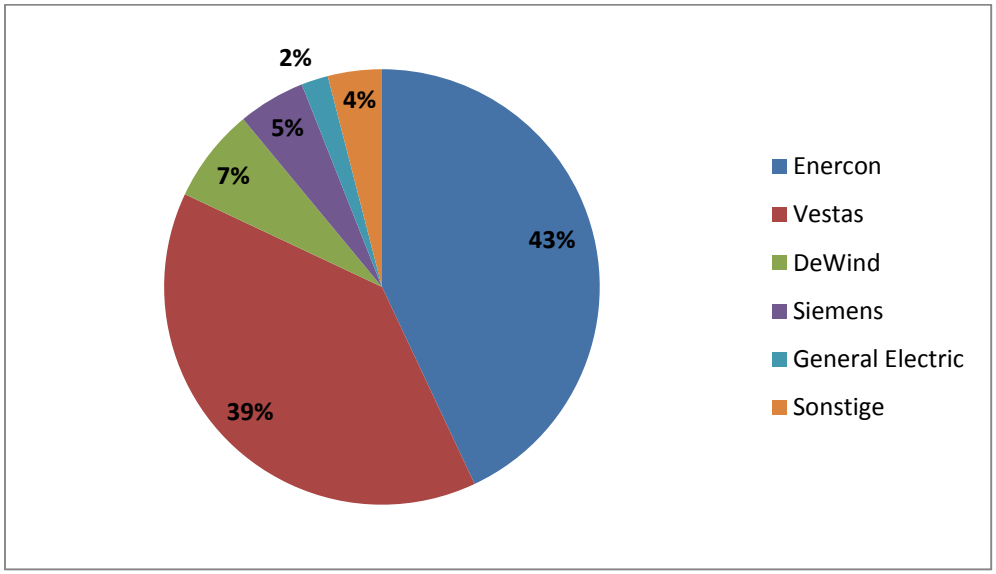

Abbildung 6 Installierte Leistung Windkraft in Österreich nach Herstellern, Stand Dezember 2011 (IG Windkraft, 2011).

Da die Schätzungen der NdFeB-Magnete pro MW angegeben werden, wurden die von der IG Windkraft (2011) bezogenen Marktanteile in die installierten Megawatt pro Hersteller umgerechnet (siehe Tabelle 5). 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.

Hersteller	Anteil [%]	Leistung [MW]
Enercon	43	466,12
Vestas	39	422,76
DeWind	7	75,88
Siemens	5	54,20
General Electric	2	21,68
Repower	1,1	11,92
Nordex	0,14	1,52
Windtec	0,2	2,17
Fuhrländer	0,2	2,17
Leitwind	0,3	3,25
Lagerwey	0,6	6,50
Seewind	0,7	7,59
Summe	99,2	1.076

Tabelle 5 Hersteller in Österreich installierter WKA inkl. Marktanteil und berechneter Leistung

Die in den Windkraftanlagen enthaltenen Permanentmagneten werden in Tonnen/Megawatt [t/MW] angegeben. Tabelle 6 zeigt die in der Literatur dargestellten Schätzungen für die eingesetzten Mengen [t/MW] an Permanentmagneten in Windkraftanlagen.

		Magnetbedarf [t/MW]		
Quelle		Min.	Max.	Mittelwert
Gutfleisch et al. 2011		-	-	0,5
Moss et al. 2011	General Electric	0,5	0,75	0,63
	Technology Metals Research	0,67	0,67	0,67
	Avalon Rare Metals	0,6	1	0,8
	Jack Lifton Report	0,7	1	0,85

Tabelle 6 Abschätzung des Magnetbedarfs für Permanentmagnet-Generatoren in WKA

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. Es wurde der Ansatz gewählt, die Recherche auf Herstellerebene durchzuführen, da die IG Windkraft die notwendigen Informationen nicht zur Verfügung stellen konnte. Es wurde ein Fragebogen erstellt und den Herstellern der in Österreich installierten Windkraftanlagen zugesandt. 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 8 kontaktierten WKA-Herstellern wurde von 3 Firmen eine Rückmeldung erhalten.

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

Tabelle 7 Recherchierte Information zur Verwendung von NdFeB-Permanentmagneten verschiedener Hersteller

Da bei 5 von 8 WKA-Herstellern keine Rückmeldung erhalten wurde, wurden Informationen von der Plattform thewindpower.net, die von der Europäischen Interessensvertretung für Windkraft unterstützt wird, herangezogen. Auf dieser Internetplattform finden sich alle in Österreich errichteten Windfarmen, die dazugehörigen Hersteller und in den meisten Fällen auch die Anlagentypen aufgelistet.

Aufgrund der ermittelten und erhaltenen Informationen kann angenommen werden, dass die Firmen Vestas, Leitwind und Lagerwey Windkraftanlagen mit Neodym-Magneten in Österreich installiert haben. Es wird geschätzt, dass insgesamt 214 MW NdFeB enthaltende WKA in Österreich in Betrieb sind.

Die Lebensdauer der installierten Windkraftanlagen wird auf 20 Jahre geschätzt (Schittl, 2012; Du und Graedel, 2011 b). Abbildung 7 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).

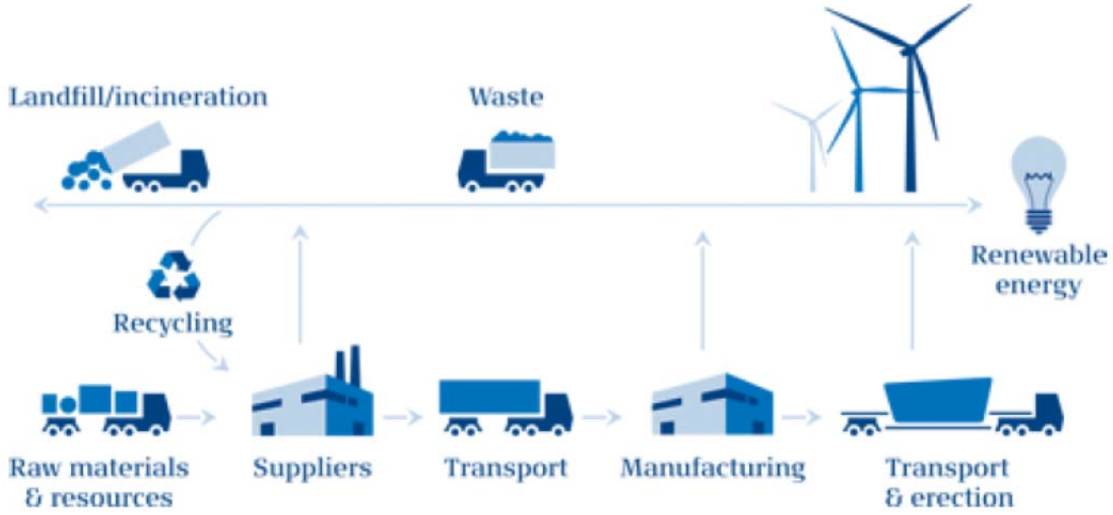

Abbildung 7 Lebenszyklus einer Windturbine (D'Souza et al. 2011)

Da es sich bei der Windenergie um eine erst relativ kurz 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 8 Behandlung der einzelnen Komponenten einer WKA nach der Demontierung (D'Souza et al 2011)).

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

Tabelle 8 Behandlung der einzelnen Komponenten einer WKA nach der Demontierung (D'Souza et al 2011)

Die Neodym-Eisen-Bor Permanentmagnete 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 WKA zu erhalten, wurde im Rahmen des an die Hersteller gerichteten Fragebogens auch eine Frage zu diesem Thema gestellt. Einzig 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 NdFeB-Permanentmagneten), 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.

In der Berechnung wurde von einem durchschnittlichen Magnetbedarf der getriebelosen Windkraftanlagen von 710 $^{+/- 90}$ 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 10,2 $^{+/- 2,6}$ MW dieses Typs.
Das Lager wurde nach eigener Recherche auf insgesamt 214 MW geschätzt, abzüglich des Input-Flusses im Jahr 2011 ergibt das 204 $^{+/- 51}$ MW in Österreich installierte Leistung.
Der Güterfluss des Neodym-Eisen-Bor Magneten in den Prozess Windkraft beläuft sicher daher auf 7,3 $^{+/- 2,0}$ t, das Lager bevor der Fluss zugeführt wird auf 145 $^{+/- 40}$ 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 9 stellt diese dar, 2011 befanden sich 42 $^{+/- 33\%}$ Tonnen Neodym im Prozess Windkraft, der Zuwachs beträgt + 2,1 $^{+/- 22\%}$ Tonnen.

Windkraftwerke		**Neodym [t]**
Windkraftanlagen mit NdFeB	Input-Fluss	2,1 $^{+/- 0,46}$
Lager	Lager	42 $^{+/ 14}$ + 2,1 $^{+/- 0,46}$

Tabelle 9 Quantifizierte Flüsse und Lager im Prozess Windkraftwerke im System Neodym in Österreich (2011)

3.2 Medizin & Forschung

3.2.1 Nd:YAG-Laser

LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) sind ein unverzichtbares Werkzeug sowohl in Bereichen der Wissenschaft und Forschung als auch der Medizin und Materialbearbeitung.
Das Prinzip des Lasers basiert auf dem Effekt der stimulierten Emission von Strahlung. Diese Stimulation kann optisch (Einstrahlung von Licht) oder elektrisch (z.B. Gasentladung) erfolgen. Zunächst werden Atome im Lasermedium durch die eingespeiste Leistung vom Ruhezustand in einen metastabilen, angeregten Zustand versetzt. Nach diesem Absorptionsvorgang („angeregtes Atom") fällt das Elektron durch die Anregung eines einfallenden Photons mit der auszustrahlenden Energie wieder zurück in den Grundzustand und sendet dabei ein Photon identischer Energie (d.h. identischer Wellenlänge und Frequenz) aus wie das stimulierende Photon. Das „neu entstandene"

Photon kann dann seinerseits andere angeregte Atome zur Ausstrahlung stimulieren. All diese Photonen bewegen sich in die gleiche Richtung, es entsteht monochromatisches Licht.
Bei Licht, das durch Verwendung einer Glühbirne entsteht, fällt das Elektron nach dem Absorptionsprozess vom Grundzustand in den angeregten Zustand („angeregtes Atom“) spontan in den Grundzustand zurück. Es wird polychromatisches Licht in alle Richtungen des Raumes emittiert.
Neodym-Yttrium-Aluminium-Granat (Nd:YAG) gehört zur Gruppe der Festkörperlasermaterialien (im Gegensatz zu gasförmigen oder flüssigen Lasermedien), die aus einem Wirtsmaterial und dem Lasermaterial bestehen. Im Fall von Nd:YAG fungiert Yttrium-Aluminium-Granat ($Y_3Al_5O_{12}$) als Wirtsmaterial und die Seltene Erde Neodym als Lasermaterial (Angerer et al. 2009), wobei Yttrium im Kristallgitter durch 0,8 – 1,1 Atom% Neodym ersetzt ist (Angerer et al. 2009). Der Bereich der Festkörperlaser wird von Nd:YAG dominiert.
Laser werden vor allem zur Bearbeitung von Materialien verwendet: Dazu gehören u.a. Schneiden und Verbinden, Oberflächenbehandlungen und Formgebung.
In der industriellen Materialbearbeitung werden vor allem 3 Lasertypen herangezogen: CO_2-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 1.064 nm als auch frequenzverdoppelt mit 532 nm (Greve; Raulin 2011).

Genaue Zahlen oder Schätzungen für die Verwendung von Nd:YAG-Lasermaterial 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 Nd:YAG-Laser lag 2006 bei 15 kg und wird laut Projektion 2030 bei 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 – 1,1 Atom% vorliegt, ist es naheliegend, diesen Materialfluss als unbedeutend zu bezeichnen. Auch ein Recycling dieser geringen Mengen und geringen Konzentrationen käme vermutlich nicht in Frage.

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

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

3.2.2 **Magnetresonanztomographie (MRT)**

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

Laut Hornak (2011) werden in MR-Tomographen hauptsächlich supraleitende Elektromagneten verwendet. In diesen Materialien wird der Effekt ausgenutzt, dass der elektrische Widerstand supraleitender Materialien bei Unterschreiten ihrer kritischen Temperatur null wird. Siehe dazu auch Kapitel 4.1.2.2

MRT-Geräte.
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 MRT-Geräte in Österreich installiert.
Einer persönlichen Mitteilung der Firma Philips Austria ist zu entnehmen, dass die Firma Philips in Österreich keine MRT-Geräte mit NdFeB-Magneten installiert hat. Es wurde von Seiten der Firma Philips betont, dass sie in ihren Geräten nur die Supraleiter-Technologie verwenden würden, da diese bei MRT „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. Der Vorteil dieses speziellen 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.

3.3 Private Haushalte

3.3.1 Elektrofahrzeuge

Seit etwa 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 kombiniert), das Elektrofahrzeug (reiner Elektroantrieb) und gasbetriebene Fahrzeuge (Angerer et al. 2009).

Das Wort Hybrid stammt vom lateinischen Wort für Mischling (Hybrida) und bezeichnet Kraftfahrzeuge, 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 Seltene-Erden-enthaltenden Elektromotoren werden in Hybrid-Fahrzeugen auch Nickel-Metall-Hydrid-Batterien verbaut, die ebenfalls Seltene Erden enthalten und durch Bremsenergie wieder aufgeladen werden können. 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 die Masse der NiMH-Batterie des Toyota Prius nach Auskunft von Toyota 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 Pkw 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 davon 62 % Toyota-Prius-Modelle und 30 % Honda-Civic-Modelle waren.

Um die Neodym-Flüsse in Österreich darstellen zu können, müssen die Neodym-Gehalte der Fahrzeuge bzw. der Motoren und der Batterien bekannt sein. Tabelle 11 zeigt die verschiedenen Literaturquellen entnommenen Informationen zum Neodym-Gehalt von Hybrid-Fahrzeugen. 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 können.

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

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

Laut Statistik Austria (2012) wurden in Österreich im Kalenderjahr 2011 356.145 Personenkraftwagen (Pkw) neu zugelassen. Davon waren 631 mit Elektro- und 1.310 mit Hybrid-Antrieb ausgestattet.
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 Pkw 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 Elektrofahrräder von bis zu 40.000 Stück voraus. Tabelle 12 zeigt die Verkaufszahlen der Elektrofahrräder nach Kalenderjahren bzw. die Prognose der Verkaufszahlen des VCÖ für das Jahr 2011. Definitiv ermittelte Verkaufszahlen für dieses Jahr konnten nicht gefunden werden.

Verkaufszahlen Elektrofahrräder (Österreich)		
2005		3.500
2008		8.000
2009		12.000
2010		20.000
2011	(Prognose des VCÖ)	30.000 – 40.000

Tabelle 12 Verkaufszahlen Elektrofahrräder in Österreich nach Jahren (VCÖ 2011)

Lo (2007) gibt an, dass im Motor eines Elektrofahrrads (36 V/180 W) 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.

3.3.1.1 Elektroautos

Aus den im Vorhergehenden dargestellten Daten ergibt sich eine durchschnittliche Neodym-Menge von 0,193 kg $^{+/- 0,048\ kg}$ pro Elektroauto.
Ebenso wurde bereits angeführt, dass in Österreich Ende 2011 989 Elektroautos zugelassen waren und dass im Jahr 2011 63 Elektroautos neu zugelassen wurden. Diese Zulassungszahlen werden zur Berechnung des Neodym-Flusses und -Lagers im Jahr 2011 für Elektroautos herangezogen.
Mit Hilfe der durchschnittlichen Lebensdauer eines Autos von 14 Jahren wird das Anfallpotential berechnet und als Abfallfluss in Richtung Prozess Abfallwirtschaft geschätzt.
Tabelle 13 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.

Elektroautos	Neodym [kg]
Input-Fluss 2011	120 $^{+/- 3}$
Lager 2011	70 $^{+/- 2}$ + 110 $^{+/- 3}$
Output-Fluss als Abfall	10 $^{+/- 0}$

Tabelle 13 Quantifizierte Flüsse und Lager der Elektroautos im Prozess Private Haushalte im System Neodym in Österreich (2011)

3.3.1.2 Hybridautos

Aus den oben angeführten Daten ergibt sich eine durchschnittliche Neodym-Menge von 0,90 $^{+/- 0,10}$ kg pro Hybridauto. Ebenso wurde dort bereits angeführt, dass im Jahr 2011 1.320 Hybridautos neu in Österreich zugelassen wurden, wodurch Ende 2011 insgesamt 6.060 Autos mit dieser Antriebstechnologie in Österreich angemeldet waren. Der Output-Fluss zum Prozess Abfallwirtschaft wird erneut über die durchschnittliche Lebensdauer geschätzt (Anfallpotential). Die Lebensdauer wird mit 14 Jahren angenommen. Tabelle 14 zeigt die geschätzten Neodym-Flüsse und -Lager für Hybridautos in Österreich im Jahr 2011.

Hybridautos	Neodym [t]
Input-Fluss 2011	1,2 $^{+/- 0,15}$
Lager 2011	4,3 $^{+/- 0,53}$ + 0,79 $^{+/- 0,18}$
Output-Fluss als Abfall	0,39 $^{+/- 0,11}$

Tabelle 14 Quantifizierte Flüsse und Lager der Hybridautos im Prozess Private Haushalte im System Neodym in Österreich (2011)

3.3.1.3 Elektrofahrräder

Die am Anfang des Kapitels angeführten Daten ergeben einen durchschnittlichen Neodym-Eisen-Bor-Magnetgehalt von 0,40 $^{+/- 0,05}$ kg pro Elektrofahrrad. Der Neodym-Gehalt der Magnete wird auf 30 $^{+/- 3}$ % geschätzt. Der Input-Fluss im Jahr 2011 wird mit 35.000 Elektrofahrrädern 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 15 zeigt die berechneten Neodym-Mengen der Flüsse und Lager der Elektrofahrräder in Österreich im Jahr 2011.

Elektrofahrräder	Neodym [t]
Input-Fluss 2011	4,01 $^{+/- 0,71}$
Lager 2011	4,98 $^{+/- 0,88}$ + 3,36 $^{+/- 0,73}$
Output-Fluss als Abfall	0,64 $^{+/- 0,20}$

Tabelle 15 Quantifizierte Flüsse und Lager der Elektrofahrräder im Prozess Private Haushalte im System Neodym in Österreich (2011)

3.3.2 Elektronik und Elektrotechnik

3.3.2.1 Festplatten (HDD)

In Festplatten, die sich in Computern befinden, werden Neodym-Eisen-Bor-Magnete 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-Permanentmagnete im Gegensatz zu den Stand-PCs auch zur Verwendung in Lautsprechern eingesetzt (Buchert et al. 2012).

Tabelle 16 zeigt die der Literatur entnommenen Gehalte an Permanentmagneten in Computer-Festplatten.

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

Tabelle 16 Magnetgehalte von Festplatten

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 2. 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 – 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 2. 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 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. Bei 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 gelegt, 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 wird, 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 rückgewonnen 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.

Aus den bereits dargestellten Daten ergibt sich, dass pro Festplatte in einem PC 19 $^{+/- 2,4}$ g Neodym-Eisen-Bor Permanentmagnet verbaut sind. Erneut wird mit einer Neodym-Konzentration von 30 $^{+/- 3}$ % 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 im Rahmen dieser Stoffflussanalyse angenommen, dass 78,1 % der österreichischen Bevölkerung einen Computer besitzen. Folglich wird bei einer Einwohnerzahl von 8,4 Millionen, von 6,56 Millionen Computern (+/- 820.000) in den österreichischen Haushalten ausgegangen.
Da keine Computer-Verkaufszahlen für Österreich im Jahr 2011 gefunden werden konnten, wird 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 hier 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 17 zeigt die berechneten Neodym-Flüsse und -Lager für Festplatten im Subprozess Private Haushalte.

Festplatten	**Neodym [t]**
Input-Fluss 2011	7,3 $^{+/- 1,3}$
Lager 2011	37 $^{+/- 7,0}$ + 2,7 $^{+/- 1,5}$
Output-Fluss als Abfall	4,6 $^{+/- 0,82}$

Tabelle 17 Quantifizierte Flüsse und Lager für Festplatten im Prozess Private Haushalte im System Neodym in Österreich (2011)

3.3.2.2 Mobiltelefone bzw. Smartphones

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

Stoffflusssystems wird Neodym auch in diesem Fall als Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnet verbaut.

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) wiegen diese Magneten 190 mg. Unter der Annahme, dass die Zusammensetzung der Magneten ähnlich denen in Laptop-Lautsprechern sein müsste, werden folgende in Tabelle 18 dargestellte Neodym-Gehalte festgelegt.

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

Tabelle 18 Geschätzte Neodym-Mengen eines Smartphones (Buchert et al. 2012).

Liu et al. (2011) geben an, dass pro Mobiltelefon 5 g Permanentmagnet verbaut wird. 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 3 – 4 Jahren zu rechnen. Hausmann (2005) gibt eine Lebensdauer der Mobiltelefone von 2,2 – 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. Den verbleibenden Mobiltelefonen widerfährt vermutlich dasselbe Schicksal wie Laptops und Flatscreens: 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 %) wird offensichtlich, dass diese erhöht werden muss, um die wertvollen Rohstoffe aus den Mobiltelefonen 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 Mobilfunkanbietern 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 Mobiletelefone 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.

Die bereits 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 7,6 Millionen $^{+/- 960.000}$ 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 $^{+/- 830.000}$ Mobiltelefone in Österreich verkauft, die den Input-Fluss in das Nutzlager darstellen. Ausgehend von der Schätzung des ungenutzten Handylagers für Deutschland (siehe Kapitel 3.3.2.2), wird für Österreich geschätzt, dass 8,3 Millionen $^{+/- 2.100.000}$ 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 3.3.2.2 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 19 Quantifizierte Flüsse und Lager der Mobiltelefone im Prozess Private Haushalte im System Neodym in Österreich (2011) zeigt die berechneten Flüsse und Lager für Neodym in Mobiltelefonen im Subprozess Private Haushalte. Trotz der großen Anzahl an Mobiltelefonen ist die darin gelagerte Neodym-Menge 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.

Mobiltelefone	**Neodym [t]**
Input-Fluss 2011	0,17 $^{+/- 0,06}$
Lager 2011	0,38 $^{+/- 0,11}$
Output-Fluss ins ungenutzte Lager	0,17 $^{+/- 0,06}$
Output-Fluss kontrolliertes Recycling zur Abfallwirtschaft	0,01 $^{+/- 0}$
Ungenutztes Lager 2011	0,41 $^{+/- 0,15}$ + 0,16 $^{+/- 0,06}$

Tabelle 19 Quantifizierte Flüsse und Lager der Mobiltelefone im Prozess Private Haushalte im System Neodym in Österreich (2011)

3.3.2.3 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. Daher können diese Flüsse hier leider 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 – unter der Annahme, dass sich pro Haushalt nur eine HiFi-Anlage befindet – mindestens 2,3 Millionen HiFi-Anlagen.
Für eine grobe Schätzung der Lautsprecher wurden 2 Stück 0,75 kg Lautsprecher pro HiFi-Anlage angenommen.
Du und Graedel (2011 b) geben die Lebensdauer von Audiosystemen mit 10 Jahren an. Hausmann (2005) gibt die Lebensdauer von Audiosystemen mit 8 – 15 Jahren an.

Im Falle der Lautsprecher für HiFi-Anlagen konnten 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 den oben angeführten Daten ergibt sich für einen 0,75 kg Lautsprecher mit 50 Watt Leistung ein Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnet-Gehalt von 50 $^{+/- 13}$ g bei erneuter Neodym-Konzentration von 30 $^{+/- 3}$ %.
Des Weiteren wird von einer Lautsprecher-Stückzahl im Lager 2011 von 4.600.000 $^{+/- 1.160.000}$ ausgegangen.
Zur Abschätzung des Output-Flusses zur Abfallwirtschaft wird eine durchschnittliche Lebensdauer von 12 $^{+/- 1,5}$ Jahren angenommen.
Tabelle 20 stellt das berechnete Neodym-Lager und den Output-Fluss zum Prozess Abfallwirtschaft dar.

Lautsprecher für HiFi-Anlagen	Neodym [t]
Input-Fluss 2011	5,6 $^{+/- 2,2}$
Lager 2011	67 $^{+/- 25}$
Output-Fluss zum Prozess Abfallwirtschaft	5,6 $^{+/- 2,2}$

Tabelle 20 Quantifizierte Flüsse und Lager für Lautsprecher im Prozess Private Haushalte im System Neodym in Österreich (2011)

3.3.2.4 DVD-Player

Wie in Festplatten sind auch in DVD-Laufwerken und DVD-Playern Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnete verbaut.
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 an DVD-Playern in Österreich bestimmt wird, andererseits 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.

Im Fall der DVD-Player bzw. DVD-Laufwerke werden alle DVD-Player und alle Computer (Annahme: alle mit DVD-Laufwerk) in die Rechnung miteinbezogen.
Wie bereits erörtert wird angenommen, dass in jedem DVD-Player/Laufwerk 5 $^{+/- 1,3}$ g Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnet verbaut sind, wieder unter der Voraussetzung, dass die Neodym-Konzentration bei 30 $^{+/- 3}$ % liegt.
Das Lager für DVD-Player und -Laufwerke (in DVD-Playern und Computern) beläuft sich 2011 auf insgesamt 9.340.000 $^{+/- 1.070.000}$ 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 $^{+/- 334.000}$ Stück.
Für DVD-Player wird zur Abschätzung des Abfallstroms eine durchschnittliche Lebensdauer von 6,5 $^{+/- 0,8}$ Jahren angenommen.
Tabelle 21 zeigt die berechneten Flüsse und Lager für Neodym in DVD-Playern und -Laufwerken im Subprozess Private Haushalte.

DVD-Player / -Laufwerke	Neodym [t]
Input- Fluss 2011	2,3 $^{+/- 0,70}$
Lager 2011	14 $^{+/- 4,1}$ + 0,24 $^{+/- 0,98}$
Output-Fluss zum Prozess Abfallwirtschaft	2,1 $^{+/- 0,68}$

Tabelle 21 Flüsse und Lager DVD-Player und -Laufwerke im Prozess Private Haushalte im System Neodym in Österreich (2011)

3.4 Verarbeitende Industrie

Der Prozess Verarbeitende Industrie bildet ab, wie und wo metallisches Neodym bzw. Neodymoxid nach dem Import nach Österreich zu weiterführenden Produkten bzw. 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 & Forschung und Abfallwirtschaft stehen.
Österreich ist maßgeblich an der Seltenen-Erden-Verarbeitung in der Europäischen Union beteiligt: 24 % der EU-Importe gehen 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 Carl Auer von Welsbach gegründet, der erstmals Didym in die Elemente Neodym und Praseodym auftrennen konnte (Treibacher Industrie AG 2012).
Da das Unternehmen mit seinem Produktangebot in Österreich Alleinstellungsmerkmal besitzt, ist es schwierig, zuverlässige Daten zu erhalten.

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 wird hauptsächlich für Gläser und Kondensatoren eingesetzt. Wird es einem Glas beigemengt, färbt es dieses je nach Dotierung von violett, rot bis grau. Wird Licht durch dieses Spezialgläser durchgestrahlt, zeigt es scharfe Absorptionsbanden (MREL 2012).
- Neodymfluorid wird wie auch Neodymchlorid hauptsächlich für Gläser und Kondensatoren eingesetzt. Des Weiteren ist es ein Rohstoff zur Weiterverarbeitung zu Neodym-Metall und Neodym-Legierungen (MREL 2012).
- 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 kommt wie Neodymchlorid, Neodymfluorid und Neodymoxid in Gläsern und Kondensatoren zum Einsatz (MREL 2012).

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

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 weiterverarbeitet. 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.

Aus Datenschutzgründen gibt es keine statistischen Informationen über die Verarbeitung von Seltenen Erden in Österreich. Dies basiert darauf, dass die Firma Treibacher diesbezüglich ein Alleinstellungsmerkmal hat und selbst keine Informationen und Daten überlieferte. Nach eigenen Angaben spielt die Firma in der Produktion von Neodym-Verbindungen eine untergeordnete Rolle.

Obwohl die Werte der einzelnen Flüsse und Lager 0 gesetzt werden, 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 wird 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. Aus dem Subprozess Nachgelagerte Industrie führt sowohl ein Export-Fluss als auch ein Abfall-Fluss der anfallenden Produktionsabfälle. Von der Abfallwirtschaft gelangt ein Fluss nach durchgeführtem Recycling erneut in 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, wäre das Ergebnis hier vermutlich ein anderes. Bei der Herstellung der Permanentmagneten fallen – wie in am Anfang von Kapitel 3 bereits dargelegt – 20 – 30 % an Produktionsabfällen an, was ein Recycling wirtschaftlich notwendig macht. Ebenso wurde bereits erwähnt, dass die Firma Treibacher 88 % der hergestellten Verbindungen ins Ausland exportiert, was vermuten lässt, dass dies auch für den Großteil der hergestellten Neodym-Verbindungen gilt.

3.5 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 durch gezieltes Recycling diese Magnete als anthropogenes Lager genutzt werden könnten. 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-Magnete 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 anschließendes erneutes 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 pro Stunde entfernen, 8 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 Materialen 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 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 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).

Zur Berechnung des Abfallflusses vom Prozess Private Haushalte zum Prozess Abfallwirtschaft werden die Anfallpotentiale der einzelnen Produkte über deren Lebensdauer geschätzt. Im Fall der Mobiltelefone wird zusätzlich die Sammelrate von 5 % in die Rechnung einbezogen.
Es 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 22 zeigt die einzelnen Abfallflüsse der Produkte des Prozesses Private Haushalte.
Insgesamt fallen im Jahr 2011 aus diesem Prozess 13 $^{+/- 14\ \%}$ Tonnen Neodym an, die wiederverwendet werden könnten.

Produkt	Neodym [t]
Elektroautos	0,014 $^{+/- 0,0049}$
Mobiltelefone	0,0095 $^{+/- 0,0027}$
Hybridautos	0,390 $^{+/- 0,11}$
Festplatten	4,6 $^{+/- 1,2}$
Elektrofahrräder	0,64 $^{+/- 0,20}$
DVD-Player	2,1 $^{+/- 0,68}$
Lautsprecher	5,6 $^{+/- 2,2}$
Summe	13 $^{+/- 2,6}$

Tabelle 22 Geschätzte Abfallmengen pro Produktgruppe im Prozess Abfallwirtschaft, geschätzt über das Anfallpotential im System Neodym in Österreich (2011)

3.6 Ergebnisse

In Abbildung 8 ist der Neodym-Haushalt für Österreich im Jahr 2011 dargestellt. Die größten Nd-Flüsse stellen die Permanentmagneten in verschiedenen Elektro- und Elektronikanwendungen dar. In diesem Zusammenhang sind v.a. die Flüsse und Lager des Prozesses „Private Haushalte“ von Bedeutung. Deshalb wurde dieser Prozess anhand eines Subsystems weiter aufgegliedert, um die Nd-Lager in unterschiedlichen Produkten zu analysieren (vgl. Abbildung 9). Aus den Stoffflussdiagrammen (Abbildung 8 und Abbildung 9) wird deutlich, dass zwar Festplatten den größten Input in die privaten Haushalte im Jahr 2011 darstellen (7,3 t/a), aber Festplatten „nur“ das zweitgrößte Lager im privaten Haushalt bilden. Das größte Nd-Lager im privaten Haushalt bilden die

Permanentmagnete in Lautsprechern (67 t). Der geringere Input an Nd in Lautsprechern (5,6 t/a) gegenüber Festplatten ist in erster Linie auf die (angenommene) weitgehende Sättigung der Haushalte in Bezug auf Lausprecher (z.B. HiFi-System) zurückzuführen. Darüber hinaus stellen auch die Nd-Mengen in DVD-Playern ein wesentliches Lager dar (14 t). Dagegen sind die Nd-Lager in verschiedenen Hybrid- und Elektrofahrzeugen noch relativ klein (insgesamt unter 10 t, vgl. Abbildung 9), v.a. in Anbetracht der großen Inputflüsse. In Zukunft ist aber durch die verstärkte Nutzung dieser Produkte, von raschen Lagerzuwächsen für diese Produkte auszugehen (siehe dazu Kapitel 3.7).

Außer der Anwendung von Permanentmagneten im privaten Haushalt, sind diese auch bei der Erzeugung von Strom aus Windenergie von großer Bedeutung. Der Nd-Input-Fluss von 2,1 t/a ergibt sich entsprechend durch die Verwendung getriebeloser Generatoren in Windkraftanlagen. In diesem Prozess hat sich auch bereits ein Lager von 42 t Neodym aufgebaut, das im Jahr 2011 um 5 % wächst (vgl. Abbildung 8). Im Zuge der verstärkten Verwendung von Windkraft als Stromquelle kann für diesen Prozess in Zukunft von einem weiter wachsenden Lager ausgegangen werden (vgl. Kapitel 3.7).

Da die Lebensdauer der Windkraftanlagen (wie bereits dargestellt) 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.

Der Prozess Verarbeitende Industrie konnte nicht bilanziert werden (siehe Abbildung 8), da die Vormachtstellung einzelner Akteure im Bereich der seltenen Erden eine Veröffentlichung von Daten zu den Importen und Exporten an Nd aus Vertraulichkeitsgründen nicht zulässt. In Absprache mit der Industrie kann aber zum Einen davon ausgegangen werden, dass Nd keine wesentliche Rolle für die Seltene-Erden-verarbeitende Industrie in Österreich spielt und zum Anderen der Großteil der hergestellten Güter wieder exportiert werden und somit ohnehin nicht von Relevanz in Bezug auf die Analyse von Nd-Rohstoffpotentialen in Österreich sind.

Der Prozess Medizin & Forschung wurde nicht bilanziert, obwohl die Anwendung von Nd in NMR- und MRT-Geräten sowie in Nd:YAG-Lasern untersucht wurde. Die Nd-Flüsse in YAG-Lasern sind als sehr klein anzusehen und werden daher vernachlässigt (in Abbildung 8 mit „<<“ versehen). Da die Permanentmagneten-Technologie für MRT-Geräte nicht dem Stand der Technik entspricht, kann auch in diesen Geräten die Nd-Menge als sehr gering angesehen werden („<<“ in Abbildung 8). Durch die niedrigen Nd-Konzentrationen in diesen Produkten, ist auch davon auszugehen, dass diese ohnehin kaum einem Recycling zuzuführen wären.

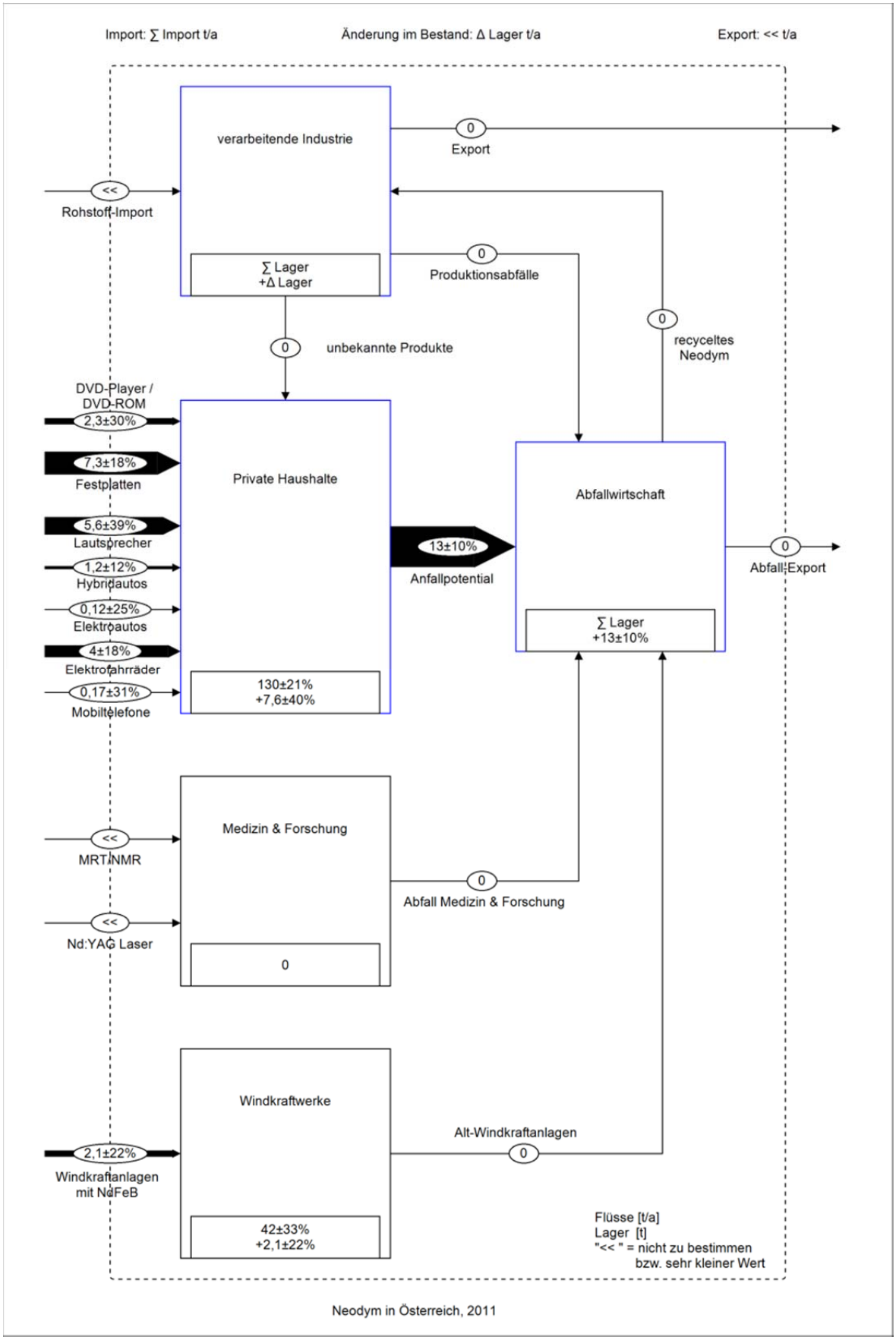

Abbildung 8 Stoffflussbild Neodym in Österreich (2011)

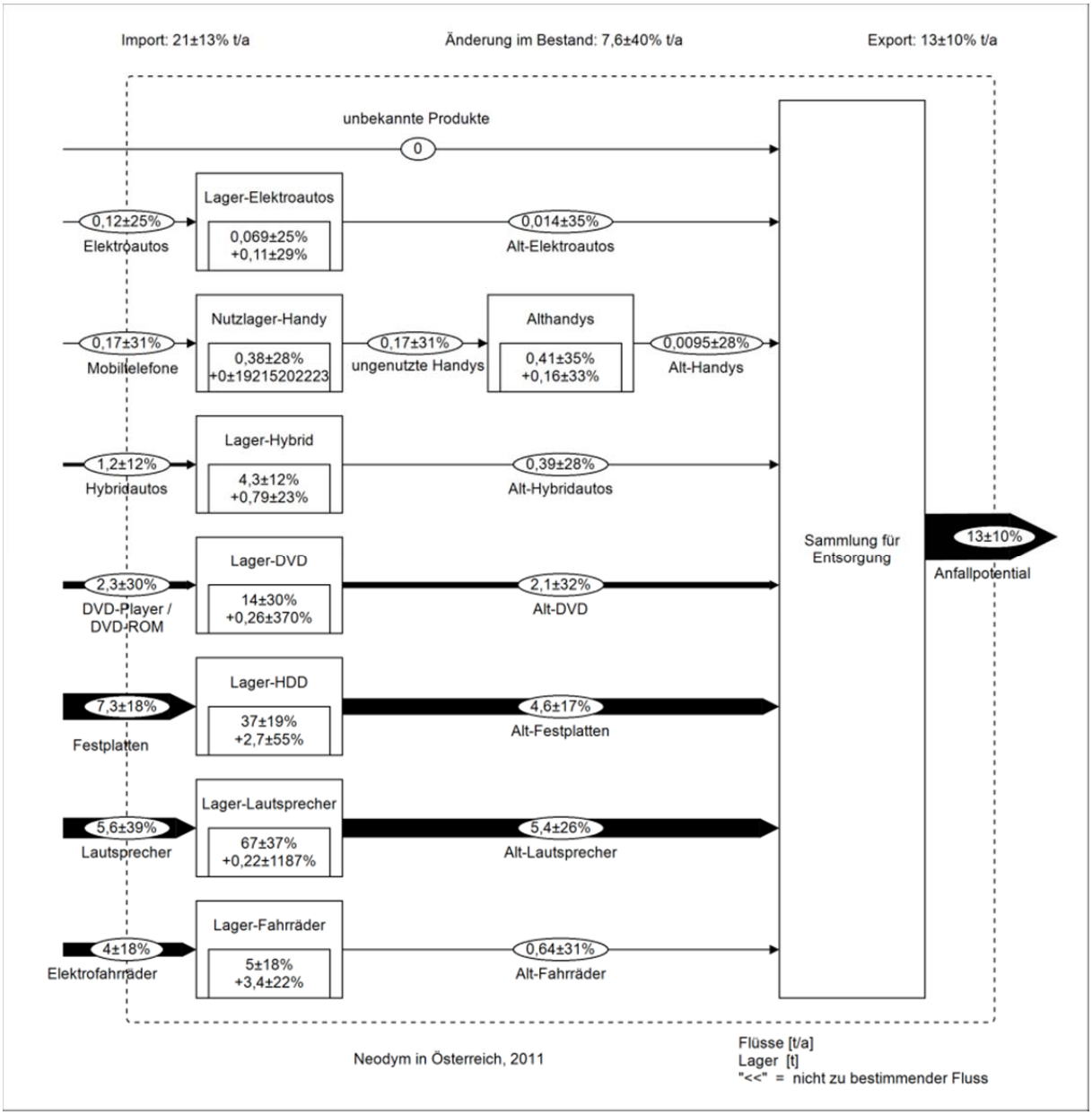

Abbildung 9 Subsystem Private Haushalte im System Neodym in Österreich (2011)

In Bezug auf den Prozess Abfallwirtschaft wird im Rahmen dieser Arbeit primär der Verbleib von Elektroaltgeräten betrachtet (diese machen derzeit mehr als 90 % des Nd in Abfällen aus privaten Haushalten aus), da alle anderen Anwendungen bzw. Produkte derzeit noch kaum in der Abfallwirtschaft angekommen sind (vgl. Abbildung 8) und somit für die bestehenden Systeme noch keine Rolle spielen (natürlich kann/wird sich das in Zukunft ändern). Eine Darstellung des Subsystems Abfallwirtschaft erfolgt in Abbildung 10. Demgemäß werden Abfallflüsse im ersten Schritt einer Sortierung unterzogen. 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. Derzeit erfolgt also keine Rückgewinnung von Neodym aus dem Abfall, da weder entsprechende Verfahren vorhanden sind noch die Konzentrationen an Neodym in den verschiedenen Abfallströmen eine Aufbereitung und Abtrennung ökonomisch attraktiv macht.

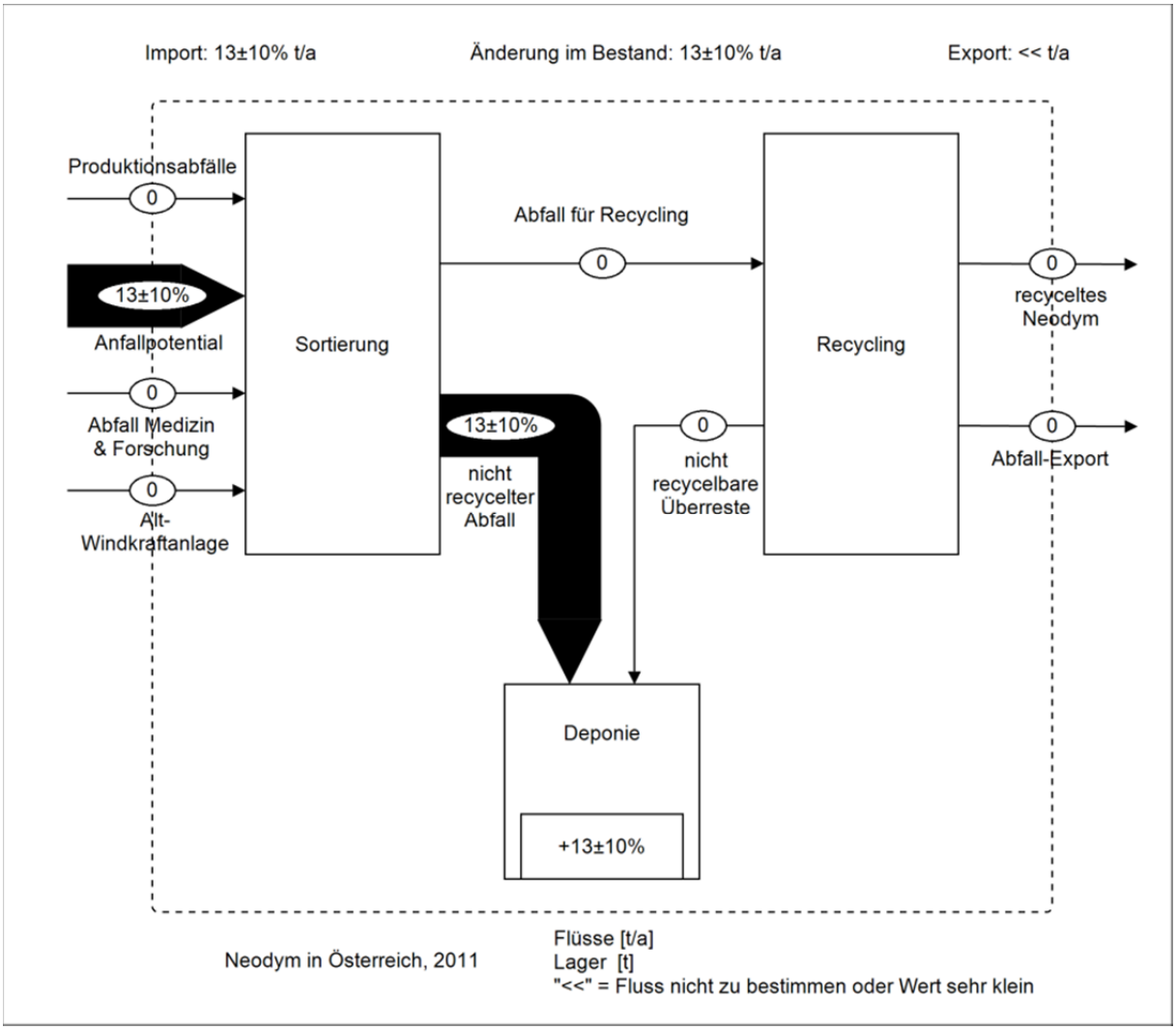

Abbildung 10 Subsystem Abfallwirtschaft im System Neodym in Österreich (2011)

Die angegebenen Unsicherheiten im Rahmen der Stoffflussanalysen sind generell für Elektro- und Elektronikprodukte am größten (teilweise Standardabweichungen von > 30 %), da oft keine belastbaren Angaben zu den in Nutzung befindlichen Produkten und auch zu den insgesamt anfallenden Mengen am Ende der Nutzungsdauer verfügbar sind. Außerdem musste auch zur Ermittlung in Verkehr gesetzter Mengen in manchen Fällen auf Zahlen für Deutschland zurückgegriffen werden (z.B. Laptops, DVD-Player), die dann auf Österreich umgelegt wurden. Da für einige Prozesse eine Bilanz aufgrund nicht vorhandener Daten nur generisch (Abfallwirtschaft) oder überhaupt nicht (z.B. verarbeitende Industrie) möglich war, gilt es neben bestehenden Unsicherheiten vor allem auch die bestehenden Datenlücken zu reduzieren. Der erstellte Nd-

Haushalt bietet hierfür eine erste Basis, anhand der Datenlücken identifiziert und die Datenlage gezielt verbessert werden kann. Auf diese Punkte wird im folgenden Abschnitt 3.7 näher eingegangen.

3.7 Diskussion und Nd-Rohstoffpotentiale

3.7.1 Abschätzung zukünftiger Nd-Recyclingpotentiale

In diesem Abschnitt werden zukünftige Recyclingpotentiale für Neodym anhand verschiedener Extrapolationsrechnungen (Szenarien) basierend auf angenommenen Lebensdauerfunktionen unterschiedlicher Produkte abgeschätzt. Wie aus der Diskussion der Stoffflussdiagramme im vorhergehenden Abschnitt bereits deutlich wurde, ist dies speziell für Anwendungen interessant, deren Lager derzeit primär im Aufbau begriffen sind (z.B. Windkraftanlagen, Elektroautos).

Da zu den meisten Gütern unzureichend Daten vorhanden sind, um die exakten Abfallflüsse aus den Lagern der privaten Haushalte (derzeit und in Zukunft) angeben zu können, musste ein anderer Ansatz gewählt werden. Zu diesem Zweck wird die Weibull-Verteilung, eine Verallgemeinerung der Exponentialverteilung, herangezogen. Diese Funktion eignet sich gut zur Beschreibung von Produktausfällen mit zeitabhängiger Ausfallrate unter Einbeziehung von Ermüdungserscheinungen und Frühfehlern (Runge 2010). Beschrieben wird die Weibull-Verteilung 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 das liefern würde. Im Anschluss werden exemplarisch die Szenarien für Elektrofahrzeuge beschrieben und die Abschätzungen zur Ermittlung der zukünftigen Abfallmengen an Alt-Hybridautos im Detail dargestellt.

3.7.1.1 Szenarien Elektrofahrzeuge – Fokus: Hybridautos

Um die zukünftig aufkommenden Abfallströme und das dadurch entstehende Recyclingpotential abschätzen zu können, wird für 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 11 zeigt die für Elektrofahrzeuge erstellte Weibull-Verteilung anhand der am Anfang des Kapitels angeführten Parameter. Für diese Dichtefunktion gibt die Software „@ risk“ die Parameter Alpha = 4,72 und Beta = 17,86 an.

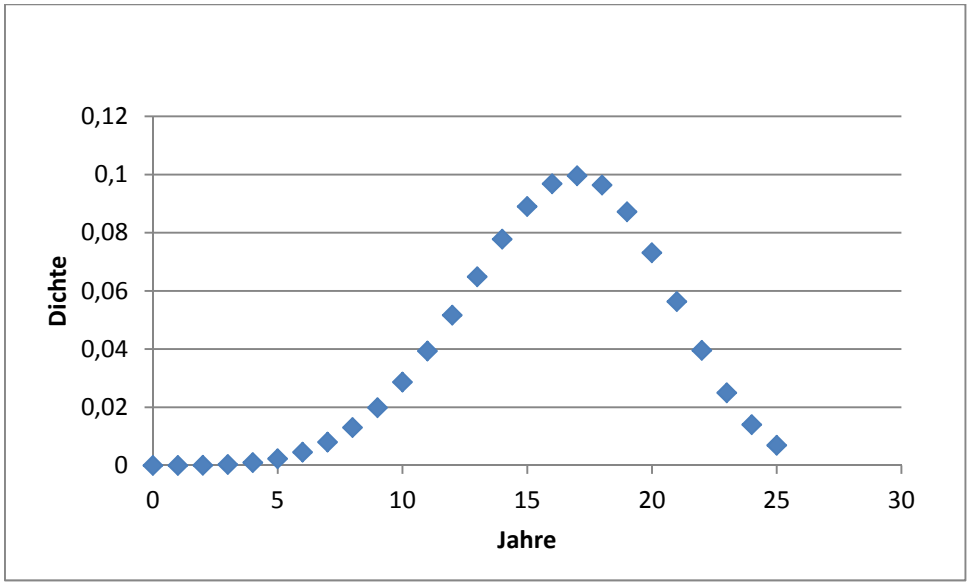

Abbildung 11 Weibull-Verteilung für Elektrofahrzeuge

Zur Abschätzung des durch Hybridautos entstehenden Recyclingpotentials wurde die Weibull-Verteilung herangezogen. Ebenso dienten die Szenarien des Bundesministeriums für Verkehr (bmvit 2010) als Grundlage für die durchgeführten Berechnungen: Im Einführungsplan für Elektromobilität (bmvit 2010) werden für Hybridautos mögliche Szenarien angeführt, wovon 2 hier näher betrachtet werden.
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 23 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.

	Hybridautos im Lager	
Jahr	**Szenario realistisch**	**Szenario worst case**
1997	200	200
1998	255	255
1999	326	326
2000	416	416
2001	530	530
2002	677	677
2003	863	863
2004	1.102	1.102
2005	1.405	1.405
2006	1.793	1.793
2007	2.287	2.287
2008	2.918	2.918
2009	3.732	3.732
2010	4.792	4.792
2011	6.060	6.060
2012	163.390	23.670
2013	266.486	35.648
2014	369.582	47.627
2015	472.678	59.605
2016	575.774	71.584
2017	678.870	83.562
2018	781.966	95.540
2019	885.062	107.519
2020	992.874	120.066

Tabelle 23 Angenommene Entwicklung des Hybridauto-Lagers bis 2020 im „realistischen Szenario“ und im „Worst-case-Szenario“

Abbildung 12 zeigt das entstehende Recyclingpotential, das von den 992.874 Hybridautos im „Szenario realistisch“, die sich bis 2020 auf Österreichs Straßen befinden sollen, ausgeht. Es 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. Blieben die Input-Flüsse ab 2020 gleich, würde sich ein Plateau einstellen und die anfallende Neodym-Menge pro Jahr bliebe konstant. Weiters wird hier nicht davon ausgegangen, dass Neodym in den Anwendungen substituiert wird oder technologische Erneuerungen den Markt beeinflussen. Das Maximum an anfallendem Neodym durch Alt-Hybridautos liegt im Jahr 2033 mit 72 Tonnen, die einem möglichen Recycling als sekundärer Rohstoff zur Verfügung stünden.

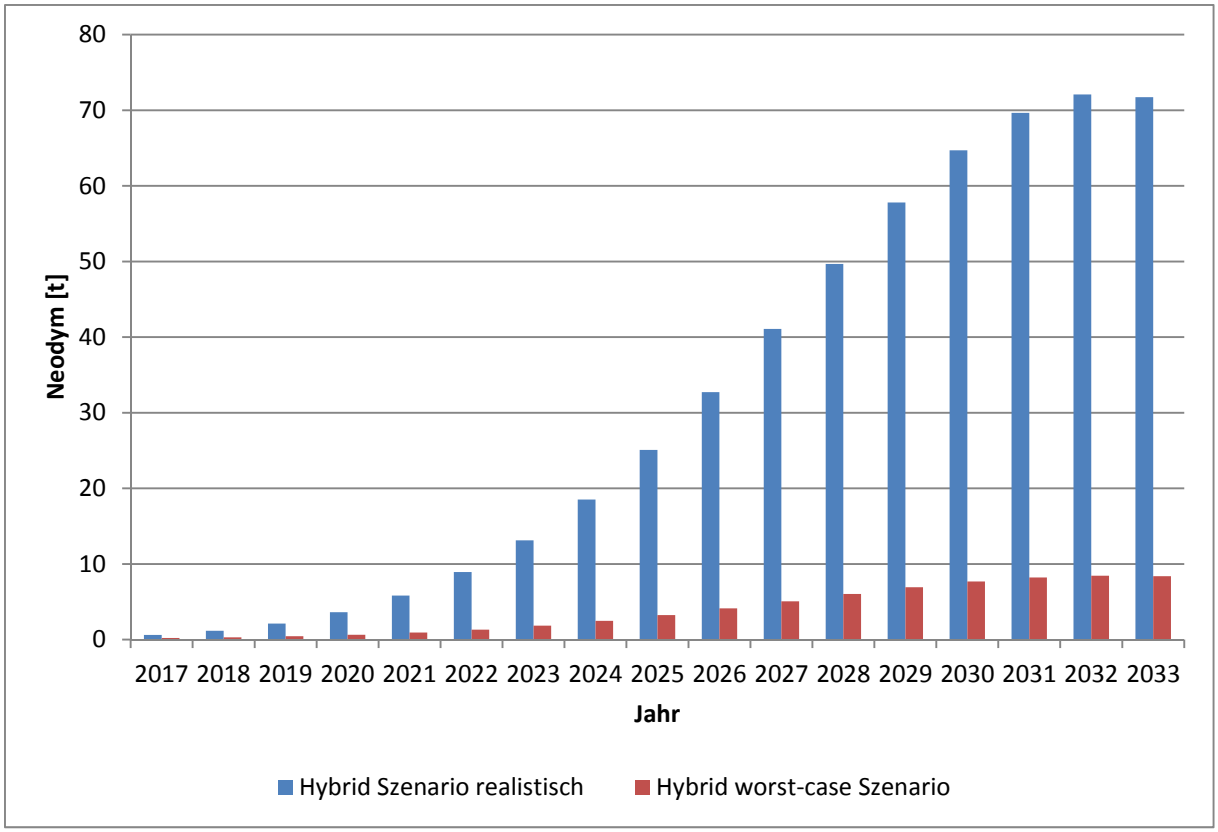

Abbildung 12 Recyclingpotential Hybridautos im „realistischen Szenario“ (blau) und im „Worst-case-Szenario“ (rot)

Als zweites Szenario wird das sogenannte „Worst-case-Szenario“ betrachtet. Es geht von einem Wachstum des Hybridauto-Lagers auf 120.066 Stück bis 2020 aus. Wieder wird ein lineares Wachstum von 2010 bis 2020 angenommen (siehe Tabelle 23). Durch Verknüpfung des Szenarios mit der Weibull-Verteilung für Elektrofahrzeuge wird das in Abbildung 12 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 klar, dass auch im Falle eines moderaten Wachstums der Hybridfahrzeuge in Österreich das korrekte Recycling dieser Fahrzeuge ein großes sekundäres Rohstoffpotential birgt.

In Ermangelung anderweitiger Informationen wird hier mit der durchschnittlichen Lebensdauer von Hybridautos gerechnet. Sollte die tatsächliche Lebensdauer kürzer sein, wäre diese Rohstoffquelle kurzfristiger einem Recycling zugänglich.

3.7.1.2 Recyclingpotentiale der betrachteten Produktgruppten

Insgesamt wurden für Windkraftanlagen, Elektroautos, Hybridautos, Elektrofahrräder, Festplatten und Mobiltelefone Szenarien erstellt, um zukünftig anfallende Neodym-Mengen, die potentiell als sekundäre Ressourcen genutzt werden können, abschätzen zu können. Einige Perzentilwerte der jeweiligen Lebensdauerfunktionen sind in Tabelle 24 dargestellt.

	Zeitraum, nach dem X % der Produkte zu Abfall werden		
	5 %	**50 %**	**95 %**
Windkraft	10 Jahre	20 Jahre	30 Jahre
Elektrofahrzeuge	7 Jahre	14 Jahre	20 Jahre
Elektronische Geräte	2 Jahre	5 Jahre	9 Jahre
Mobiltelefone	1 Jahr	3 Jahre	6 Jahre

Tabelle 24 Perzentilwerte zur Abbildung der Lebensdauer verschiedener Produktgruppen als Grundlage zur Ermittlung der entsprechenden Weibull-Verteilungen

Tabelle 25 und Abbildung 13 stellen die jährlich anfallenden Neodym-Mengen dar basierend auf den jeweiligen Szenarien (Gattringer 2012). Das Maximum an anfallendem Neodym läge im Jahr 2033 bei 36 Tonnen. Hier ist zu unterstreichen, dass nur die Flüsse bis 2020 in die Rechnung einbezogen wurden und dass das reale Recyclingpotential noch höher liegen würde (auch nach 2020 ist von einem Nd-Input in das System auszugehen). Im Jahr 2011 wird ein Anfallpotential für alle Produkte der privaten Haushalte, die Neodym enthalten, von ungefähr 13 Tonnen geschätzt. Die in Abbildung 13 dargestellten Neodym-Mengen sind inklusive Windkraftanlagen und exklusive Lautsprecher und DVD-Player zu verstehen. Dennoch ist offensichtlich, dass sich die anfallenden Neodym-Mengen bis ins Jahr 2033 beinahe verdreifachen werden und somit großes Potential für ein Recycling dieser Produkte besteht.

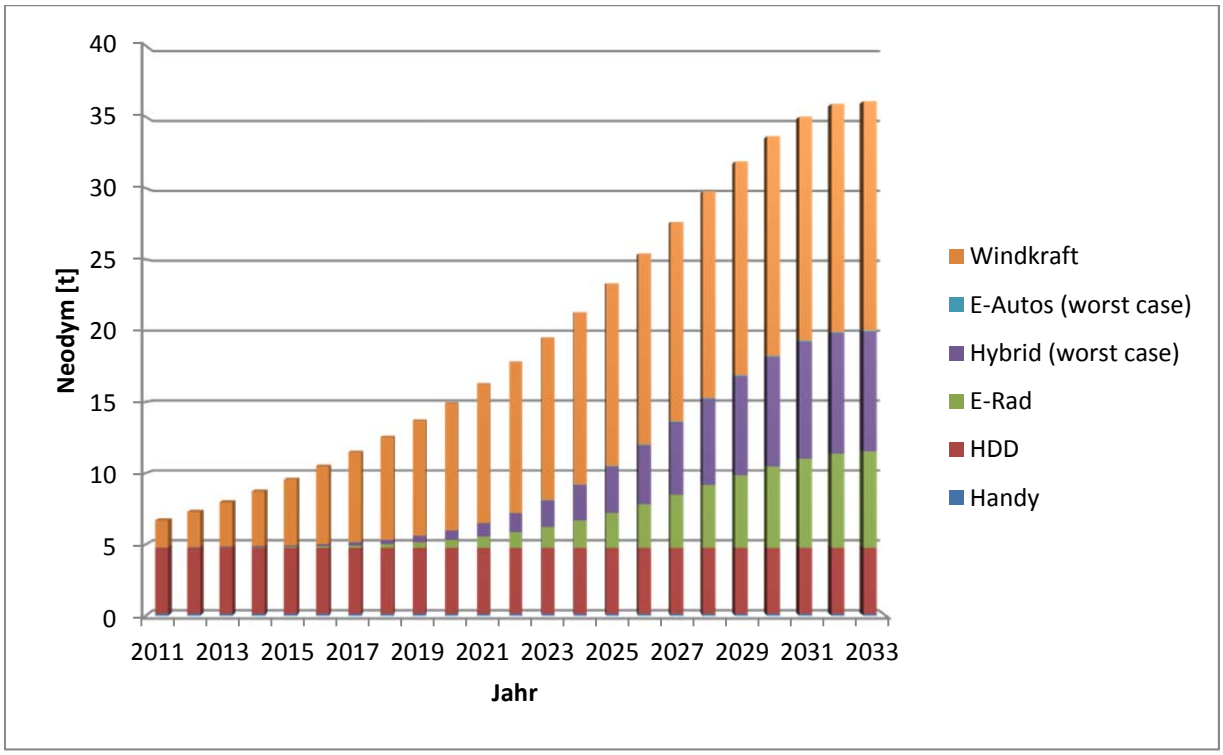

Abbildung 13 Darstellung des zukünftigen Recyclingpotentials aller erstellten Szenarien

Neodym [t]							
Jahr	**Handy**	**HDD**	**E-Rad**	**Hybrid (worst case)**	**E-Autos (worst case)**	**Windkraft**	**gesamt**
2011	0,165	4,61	0,006	0,036	0	1,88	6,70
2012	pro	pro	0,012	0,048	0	2,46	7,30
2013	Jahr	Jahr	0,023	0,062	0	3,11	8,00
2014			0,040	0,081	0	3,84	8,74
2015			0,067	0,107	0	4,62	9,60
2016			0,119	0,146	0,001	5,45	10,5
2017			0,172	0,206	0,002	6,32	11,5
2018			0,263	0,299	0,003	7,19	12,5
2019			0,391	0,439	0,005	8,07	13,7
2020			0,565	0,644	0,008	8,93	14,9
2021			0,795	0,933	0,011	9,77	16,3
2022			1,09	1,33	0,016	10,6	17,8
2023			1,47	1,84	0,023	11,4	19,5
2024			1,92	2,48	0,030	12,1	21,3
2025			2,45	3,25	0,039	12,8	23,3
2026			3,06	4,12	0,048	13,4	25,4
2027			3,72	5,07	0,057	14,0	27,6
2028			4,40	6,03	0,066	14,5	29,8
2029			5,08	6,93	0,074	15,0	31,8
2030			5,70	7,68	0,080	15,4	33,6
2031			6,23	8,21	0,083	15,7	35,0
2032			6,59	8,45	0,083	16,0	35,9
2033			6,76	8,38	0,081	16,1	36,1

Tabelle 25 Recyclingpotential für Neodym im Prozess Windkraft und in einigen Produkten aus dem Prozess Private Haushalte nach Jahren

Abbildung 13 zeigt das Recyclingpotential der einzelnen, in Szenarien betrachteten Produkte aus dem Prozess Private Haushalte und dem Prozess Windkraft (siehe Kapitel 3.3 und 3.1). Bedingt durch das herangezogene Anfallpotential (es wird von einem stationären Zustand ausgegangen: das Lager wächst nicht mehr, da ein Sättigungszustand erreicht ist) der Festplatten und der Mobiltelefone bleiben die rezyklierbaren 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. Entsprechend der getroffenen Annahmen und berechneten Szenarien, würden sich von ca. 36 t Neodym/a etwa 45 % in Alt-Windkraftanlagen, 42 % in Alt-Elektro-und Alt-

Hybridfahrzeugen und 13 % in den betrachteten Elektroaltgeräten (Handys und Festplatten) befinden. Damit bestätigt sich, dass v.a. die Lager, die derzeit stark anwachsen (vgl. Abbildung 8), in Zukunft mit entsprechenden Abfallströmen verbunden sind, die große Recyclingpotentiale für Neodym aufweisen.

3.7.2 Datenlage für die Erstellung des österreichischen Nd-Haushaltes

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 beschränkt ist und die Firma Treibacher aus Datenschutzgründen keine Angaben dazu machen wollte. Obwohl die Fa. Treibacher angab, dass die produzierten Mengen nicht relevant seien, da keine Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnete hergestellt würden, 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 nicht quantifizierbar. Dies trifft auch auf damit verbundene mögliche Recyclingpotentiale zu, die auf diese Weise nicht erkannt werden könnten.

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-Permanentmagnete 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 Stückzahlen 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 mussten die Ausstattungsstatistik der österreichischen Haushalte und deutsche Verkaufszahlen herangezogen werden. Hier wäre es nützlich, wenn von österreichischer Seite genauere Angaben verfügbar wären. Bezüglich der Lebensdauer 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 Nd-Recycling-Thematik dürfte aber für die Anlagenhersteller derzeit von untergeordneter Bedeutung sein, da von den meisten Herstellern keine Rückmeldungen auf die gestellten Anfragen erhalten wurden.

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.

4 SFA für Nb

Allgemeines über Nb

Niob (nach Niobe, der Tochter des Tantalos) ist ein chemisches Element mit dem Elementsymbol Nb und der Ordnungszahl 41. Es zählt zu den Übergangsmetallen und steht im Periodensystem in der 5. Periode sowie der 5. Nebengruppe (Vanadiumgruppe). Im englischsprachigen Raum werden auch heute noch die schon länger veraltete Bezeichnung Columbium und das Kurzzeichen Cb verwendet.

Niob wurde 1801 in Columbit-Erz entdeckt, woher auch die Bezeichnung Columbium stammt. Zunächst ging man davon aus, dass es sich bei Columbium und dem 1802 entdeckten Tantal um dasselbe Element handelt, da sie in Mineralen fast immer zusammen auftreten. Erst Mitte des 19. Jahrhunderts konnte zwischen Niob und Tantal unterschieden werden. Das neue Element wurde aufgrund dessen Ähnlichkeit mit Tantal nach Niobe, der Tochter des Tantalus, benannt.

Niob kann aus den Mineralen Columbit, Coltan (Columbit-Tantalit) und Loparit gewonnen werden.

Niob ist ein grau glänzendes, duktiles Schwermetall. Das chemische Verhalten des Niobs ist fast identisch mit dem des Tantals, das im Periodensystem direkt unter Niob steht.

Infolge der Ausbildung einer Passivschicht (Schutzschicht) ist Niob an der Luft sehr beständig. Es widersteht allen Säuren außer Flusssäure und wird auch nur von Alkalischmelzen angegriffen, da sie die Passivschicht auflösen. Bei Temperaturen oberhalb von 200 °C beginnt es in Gegenwart von Sauerstoff zu oxidieren. Eine schweißtechnische Bearbeitung von Niob muss wegen seiner Unbeständigkeit an der Luft unter Schutzgasatmosphäre ablaufen.

Niob gehört zur Gruppe der Refraktärmetalle. Das sind hochschmelzenden Metalle, die einen höheren Schmelzpunkt als Platin haben (1.772 °C).

Niob hat mit 9,25 K (-263,9 °C) die höchste Sprungtemperatur von allen Elementen, unterhalb derer es supraleitend ist.

Produktion 2009	62.000 t
Reserven (2009)	2,9 Mio. t
Statische Reservenreichweite	45 Jahre
Regionale Konzentration der Produktion (2008)	Brasilien: 95 % Kanada: 5 % (Top 2: 100 %)
Regionale Konzentration der Reserven (2008)	Brasilien: 96 % Kanada: 2 % Australien: 1 % (Top 3: 99 %)
Unternehmerische Konzentration (2010)	CBMM (Brasilien) Anglo American (Großbritannien) Iamgold Corp (USA) (Top 3: 85 %)

Tabelle 26 Produktionsdaten von Niob (Quelle: Lutz 2010)

Hauptanwendungen von Nb

- Stahlveredler ~ 90 – 95 % (mind. 75 %)
  - Hochfeste und leichte Stähle
    z.B. für die Automobilindustrie, Schienen, Pipelines, Werkzeuge, Schiffbau, Gebäude, Brücken
  - Laut Angerer et al. (2009) findet Nb (in den USA) zu > 95 % in der Stahlindustrie Verwendung.
  - Laut Gille und Meier (2012) entfielen in Deutschland im Jahr 2011 90 % des verbrauchten Niobs auf HSLA-Stähle.
  - Laut USGS (2012) sind es 75 % des Nb, die als Ferro-Nb in die Stahlindustrie gehen.

Weitere Anwendungen:

- Supraleiter
- Münzmetall
- Superlegierungen
- Elektrolytkondensatoren
- Schmuckherstellung

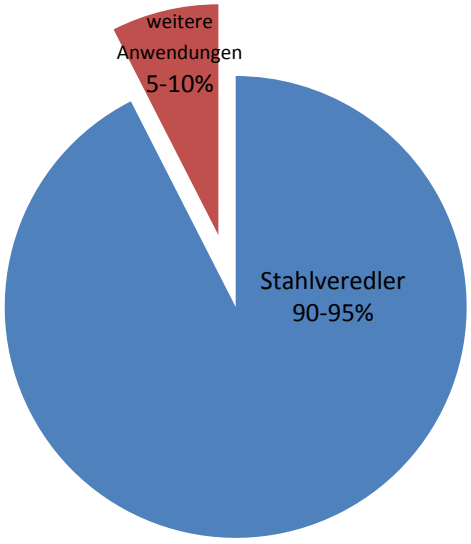

Abbildung 14 Verwendung von Niob (Angerer et al. 2009; Gille und Maier 2012)

Prozesse der SFA

Die SFA für Niob in Österreich (2011) wurde in folgende Prozesse gegliedert:

- Industrie & Gewerbe
- Private Haushalte & Infrastruktur
- Abfallwirtschaft

4.1 Industrie & Gewerbe

4.1.1 Stahl

Seine Hauptanwendung findet Niob eindeutig als Stahlveredler in der Stahlindustrie, wo es vor allem in Form von Ferroniob eingesetzt wird. Laut Angerer et al. (2009) beträgt dieser Anteil in den USA sogar über 95 %, das U.S. Geological Survey (2012) schätzt den Anteil an Niob, der in die Stahlindustrie geht, auf „nur" 75 %. Laut Gille und Meier (2012) entfielen in Deutschland im Jahr 2011 90 % des verbrauchten Niobs auf HSLA-Stähle.

HSLA-Stähle – high strength low alloy Stähle – sind hochfeste, niedrig legierte Stähle (kein Legierungselement überschreitet einen mittleren Gehalt von 5 m%), die besseren mechanischen Eigenschaften oder bessere Korrosionsbeständigkeit als unlegierte Stähle zeigen. Der Kohlenstoffgehalt liegt zwischen 0,05 – 0,25 %, um Formbarkeit und Schweißbarkeit beizubehalten. Weitere Legierungselemente sind bis zu 2 % Mangan und geringe Mengen an Kupfer, Nickel, Niob, Stickstoff, Vanadium, Chrom, Molybdän, Titan, Calcium, Elemente der Seltenen Erden oder Zirkon. Kupfer, Titan, Vanadium und Niob werden zur Verstärkung zugesetzt, sie erhöhen die Festigkeit durch Verfeinerung der Korngröße.

Typische Anwendungsgebiete für HSLA-Stähle sind Automobile und Lastkraftwagen, Kräne, Brücken, Achterbahnen – im Allgemeinen Bauwerke, bei denen ein gutes Festigkeits-Gewichts-Verhältnis eine große Rolle spielt. Einer umfangreichen Datenbank für Metalle, „Key to metals" (www.keytometals.com), ist zu entnehmen, dass z.B. Autokarosserien aus bis zu 40 % HSLA-Stählen bestehen. In hochfesten Sonderbaustählen findet Niob z.B. Verwendung in aufwendigen Baukonstruktionen wie Hochhäusern, Brücken, Sportstadien usw. oder im Pipeline-Bau, wo dadurch immer größere Rohrdurchmesser und Wandstärken erzielt werden können. In rost- und säurebeständigen Stählen wird Niob v.a. in der chemischen Industrie, z.B. in der Molkerei- und Nahrungsmittelindustrie, eingesetzt.

Ein weiterer Grund, warum Niob als Zusatz für Edelstähle, Sonderedelstähle und Nickelbasislegierungen verwendet wird, ist, dass Niob die Schweißbarkeit erhöht. In dieser Eigenschaft findet es auch Verwendung in Niob-stabilisierten Schweißelektroden.

Dem österreichischen Fachverband Bergbau-Stahl gehören folgende Unternehmen der Stahlindustrie an:

- Ari-Baustahl GmbH
- Böhler Bleche GmbH, Böhler Edelstahl GmbH, Böhler Schmiedetechnik GmbH&CoKG, Böhler Ybbstalwerke GmbH, Böhler-Ybbstal Profil GmbH
- Breitenfeld Edelstahl AG, Sonderstahlwerk Breitenfeld GmbH
- Maschinenfabrik Liezen und Gießerei GmbH
- Martin Miller GmbH

- Schöller-Bleckmann Edelstahlrohr GmbH, Schöller-Bleckmann Technisches Service GmbH&CoKG
- Stahl Judenburg GmbH
- Stahl- und Walzwerk Marienhütte GmbH
- Voestalpine Austria Draht GmbH, Voestalpine Bahnsysteme GmbH&CoKG, VoestalpineGießerei Traisen GmbH, Voestalpine Krems GmbH, Voestalpine Schienen GmbH, Voestalpine Stahl Donawitz GmbH, Voestalpine Stahl GmbH, Voestalpine Tubulars GmbH&CoKG

Leider konnten von keinem dieser Unternehmen verwertbare Daten über den Niobverbrauch in der Stahlerzeugung erhalten werden. Die Firma Böhler stellt im Internet (und auch auf persönliche Nachfrage) Produktkataloge zur Verfügung, in denen einige ihrer Stahlsorten charakterisiert und auch in ihrer elementaren Zusammensetzung dargestellt sind, welche Mengen davon aber produziert werden, bleibt – wie bei anderen Stahlerzeugern – ein Betriebsgeheimnis.

Von übergeordneten Organisationen wie der World Steel Association (http://www.worldsteel.org/) hieß es, sie hätten keinerlei Daten über Niob (Kontakt mit Phil Norris, Leiter der Abteilung für Stahlindustrie-Statistiken der World Steel Association).

Jose Isildo de Vargas vom Tantalum-Niobium International Study Center (TIC) konnte zwar durchschnittliche Niobgehalte von verschiedenen Stahlsorten nach ihren Anwendungsgebieten angeben (siehe Tabelle 27), hatte aber ebenso keine Informationen über die verbrauchten bzw. produzierten Mengen dieser Niob-hältigen Stähle.

	Niobgehalt [%]
Automobilsektor	0,03
Konstruktionssektor	0,03
Pipelines im Öl- und Gasbereich ohne Vanadium	0,10
Pipelines im Öl- und Gasbereich mit 0,04 – 0,08 % Vanadium	0,04
Pipelines im Öl- und Gasbereich aus nichtrostenden Stählen	0,5
Ferritische nichtrostende Stähle	0,5

Tabelle 27 Niobgehalte von Niob-hältigen Stahlsorten nach ihrer Verwendung nach Auskünften von Isildo Vargas vom Tantalum-Niobium International Study Center (TIC)

Die European Mineral Statistics 2006–2010 (Brown et al. 2012a) und die World Mineral Production 2006–2010 (Brown et al. 2012b) vom British Geological Survey beinhalten Daten für die Jahre 2005 – 2010. Angaben zur Rohstahlproduktion 2011 für ganz Österreich finden sich allerdings im Statistics archive der World Steel Association. Die gesamte in Österreich 2011 hergestellte Rohstahlmenge belief sich auf 7.474.000 Tonnen. Nach Angaben der Voestalpine belief sich deren Rohstahlproduktion im Jahr 2011 auf 5.239.924 Tonnen (Auskunft von Martina Poppenwimmer aus der F&E-Abteilung der Voestalpine). Das heißt, dass die Voestalpine 2011 70 % der in Österreich produzierten Stähle hergestellt hat.

Eine Mitarbeiterin der Voestalpine gab mündlich Auskunft, dass der Bedarf der Voestalpine an Ferroniob (40 % Fe, 60 % Nb) ca. 900 Tonnen jährlich sei, was einer Niobmenge von ca. 540 Tonnen entspricht. Rechnet man nun den Anteil der Rohstahlproduktion der Voestalpine auf ganz Österreich hoch, erhält man so einen Niobbedarf von etwa 770 Tonnen für ganz Österreich für das Jahr 2011.

	Voestalpine	Österreich gesamt
Rohstahlproduktion 2011	5,240 Mio. t	7,474 Mio. t
Ferroniob-Bedarf 2011	900 t	1284 t
Niob-Bedarf 2011	540 t	770 t

Tabelle 28 Rohstahlproduktion, Ferroniob- und Niob-Bedarf in der Voestalpine und in ganz Österreich im Jahr 2011

In Übereinstimmung mit der Literatur (Angerer et al. 2009, USGS 2012, Gille und Meier 2012) findet Niob auch in Österreich zum größten Teil in der Stahlindustrie seine Verwendung, wobei die Datenlage aufgrund fehlender Informationen sehr schlecht ist.
Auf der Homepage der Voestalpine ist ihr Umsatz nach Regionen aufgeteilt zu finden. Demnach erzielt die Voestalpine 90 % ihres Umsatzes durch Exporte – 62 % in die EU, jeweils 8 % nach Asien und Nordamerika und jeweils 4 % nach Brasilien, ins übrige Europa und in die übrige Welt. Im Geschäftsbericht der Voestalpine vom Geschäftsjahr 2011/2012 (Voestalpine 2012) finden sich die Märkte heruntergebrochen auf die Division Stahl der Voest mit folgenden Umsatzzahlen: 80 % werden exportiert – 67 % in die EU, 6 % nach Asien, 4 % ins übrige Europa und 3 % in die übrige Welt. Rechnet man die Exportquote der Division Stahl der Voest auf alle österreichischen Stahlproduzenten hoch und überträgt sie – mangels genauerer Daten – auf Niob in der Stahlindustrie, so erhält man folgende Ergebnisse (Tabelle 29).

	Österreich gesamt
Rohstahlproduktion 2011	7,474 Mio. t
Ferroniobbedarf 2011	1284 t
Niobbedarf 2011	770 t
Export von Niob in Stählen 2011	616 t
Verbleib von Niob in Stählen in Ö 2011	154 t

Tabelle 29 Zahlen zu Rohstahlproduktion, Ferroniob und Niob in der Stahlindustrie in ganz Österreich im Jahr 2011

Entsprechend den Hauptanwendungen von HSLA-Stählen bzw. Niob-hältigen Stählen im Allgemeinen wurden die in Österreich produzierten Mengen auf die entsprechenden Industriezweige aufgeteilt.
Nach einer Publikation des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung (DIW) (Eggert 2012) werden die mikrolegierten, Niob-hältigen HSLA-Stähle zu 25 % als Pipelinestähle, zu 24 % als Baustähle und zu 23 % in der Automobilindustrie eingesetzt. Die anderen Niob-hältigen Stahlqualitäten (außer den

mikrolegierten HSLA-Stählen) verteilen sich zu 13 % auf rostfreie Stähle, zu 8 % auf IF-(interstitial free)-Stähle für die Automobilindustrie und zu 7 % auf Werkzeug-, Feder- und Schienenstähle. Insgesamt kommt man zu folgender Aufteilung Niob-hältiger Stähle:

- 31 % Automobilindustrie (inkl. IF-Stählen)
- 25 % Pipelinestähle
- 24 % Baustähle
- 13 % rostfreie Stähle
- 7 % Werkzeug-, Feder- und Schienenstähle

Da die Werkzeug-, Feder- und Schienenstähle nicht eindeutig einer Wirtschaftsbranche zuordenbar sind, werden sie auf die anderen Branchen aufgeteilt, was folgende prozentuelle Verteilung ergibt:

- 33 % Automobilindustrie, was in Österreich der Produktion von Autoteilen entspricht
- 27 % Pipelinestähle
- 26 % Baustähle
- 14 % rostfreie Stähle, die anzunehmender Weise hauptsächlich im Sektor chemische, Molkerei- und Nahrungsmittelindustrie Verwendung finden.

Bei den in Österreich (aus österreichischem Stahl) produzierten Autoteilen wird vereinfachend angenommen, dass sie zur Gänze exportiert werden (und zum Teil zur Montage von Autos in Österreich wieder importiert werden). Die Prozesse Bauwerke (entspricht dem Output der Bauindustrie) und Pipelines werden als Infrastruktur dem Prozess Private Haushalte & Infrastruktur zugeordnet.

Stahl		**Niob [t]**
Ferro-Niob	Input-Fluss	770 $^{+/- 121}$
Stähle (Export)	Output-Fluss	616 $^{+/- 121}$
Stähle Ö Industrie	Fluss innerhalb I&G	154 $^{+/- 16}$
Stähle für Infrastruktur	Output zu PHH&I	81 $^{+/- 11}$
Stähle für Autoteile	Fluss innerhalb I&G	51 $^{+/- 12}$
Autoteile	Output-Fluss	51 $^{+/- 12}$
Edelstähle für Industrie	Output-Fluss	22 $^{+/- 5,0}$
chem. Industrie, Molkerei- und Nahrungsmittel-Industrie	Lager	+ 22 $^{+/- 5,0}$

Tabelle 30 Quantifizierte Flüsse und Lager der Niob-hältigen Stähle im Prozess Industrie & Gewerbe im System Niob in Österreich (2011)

4.1.2 Supraleiter

Eine weitere, sehr bedeutende Anwendung von Niob begründet sich in seiner Eigenschaft, unterhalb von 9,25 K (-263,9 °C) als Supraleiter (des Typs II) zu fungieren.

Supraleiter sind Materialien, deren elektrischer Widerstand beim Unterschreiten der sogenannten Sprungtemperatur auf 0 abfällt. In diesem Zustand werden Magnetfelder verdrängt, was heißt, dass das Innere des Materials feldfrei bleibt bzw. wird. Dieser – nur quantenmechanisch erklärbare – Meißner-Ochsenfeld-Effekt lässt eine supraleitende Probe schweben.
Die Sprungtemperatur ist für die meisten Materialien sehr niedrig und sinkt in einem externen Magnetfeld oder bei einem Stromfluss durch den Supraleiter weiter ab – auf 0 K bei der kritischen Feldstärke H_c. Bei $H < H_c$ dringt das Feld nur etwa 100 nm weit in das Material ein. Diese dünne Schicht trägt die Abschirm- und Leitungsströme, tiefere Schichten sind feld- und stromfrei.
Supraleiter 2. Art haben 2 kritische Feldstärken, eine höhere für beginnendes Eindringen des Feldes, eine tiefere für das Zusammenbrechen der Supraleitung.
Die Sprungtemperatur von Niob ist von allen Elementen die höchste und liegt bei 9,25 K (-263,9 °C). Sie kann bereits durch Kühlung mit flüssigem Helium, dessen Siedepunkt bei 4,22 K (-268,93 °C) liegt, erreicht werden.
Anwendung findet Niob (auch als Niobzinn Nb_3Sn oder Niobgermanium Nb_2Ge) zur Erzeugung hoher Magnetfelder in Kernspintomographen im medizinischen (MRT – siehe Kapitel 00) oder im chemisch-pharmazeutischen Bereich (NMR – siehe Kapitel 0) sowie in Teilchenbeschleunigern (z.B. LHC am CERN in Genf) oder in Fusionsreaktoren.

Nach Angaben von Dr. Wolfram Knabl, Leiter der Forschungsabteilung bei Plansee SE, setzte Plansee im Jahr 2011 10 – 20 Tonnen reines Niob im Rahmen von Forschungsprojekten um. Die verbrauchte Niobmenge sei laut Dr. Knabl stark projektabhängig und schwanke stark – je nachdem, ob gerade an Supraleitern geforscht werde.
Außerdem wird bei Plansee ca. 70 % des außerhalb der Supraleiterforschung eingesetzten Niobs in Form von schmelzmetallurgisch hergestellten Ingots hoher Reinheit (> 99 %) zugekauft, zu Blechen gewalzt und finalisiert, ca. 20 % des Niobs mit „normaler Reinheit“ werden meist auch zu Flachhalbzeugen verarbeitet. Aus den restlichen ca. 10 % Niob werden Drähte mit 1 % Zirkon für den Lichtbereich hergestellt und eine Mischung aus 3 – 10 % Niob-Pulver wird gemeinsam mit Molybdän-Pulver gepresst, gesintert und umgeformt.

Niob bei Plansee		**Niob [t]**
reines Niob	Input-Fluss	15,42 $^{+/- 3,5}$
(Flach)Halbzeuge & Drähte; Supraleiter	Input-Fluss	15 $^{+/- 3,5}$
Münzkerne (siehe Kap. 4.1.3)	Output-Fluss	0,42

Tabelle 31 Quantifizierte Flüsse der Niob-Verarbeitung bei der Firma Plansee im Prozess Industrie & Gewerbe im System Niob in Österreich (2011)

4.1.2.1 NMR-Geräte

Ein wichtiger Anwendungsbereich von Supraleitern ist die Erzeugung starker, konstanter oder nur langsam variierender Magnetfelder. Der ohmsche Widerstand der Spulenwicklungen konventioneller Elektromagnete erzeugt große Wärmemengen und damit auch einen großen Energieverlust.
Für diese Anwendung werden (im Gegensatz zu keramischen Hochtemperatursupraleitern) nur klassische, metallische Supraleiter verwendet und hier wiederum vor allem Legierungen von Niob, da diese höhere magnetische Feldstärken erreichen. Die Herstellung starker, supraleitender Spulen erfordert das Ziehen von kilometerlangen, nur wenige Mikrometer dünnen Leiterfäden.
Die Supraleitung ermöglicht es, die von einem hohen Strom durchflossenen Feldspulen in sich zu schließen, woraufhin der Strom im Prinzip unendlich lange verlustfrei in der Spule erhalten bleiben kann. Zum Laden der in sich geschlossenen Spule wird ein kurzes Teilstück der Spule über die Sprungtemperatur aufgeheizt, wodurch die Spule geöffnet wird und über Zuleitungen geladen werden kann. Wenn die gewünschte Stromstärke erreicht ist, wird der Heizer abgeschaltet und die Spule ist dadurch wieder in sich geschlossen. Bei dauerhaftem Betrieb können die elektrischen Anschlüsse nach dem Laden der Spulen mechanisch entfernt und der Behälter der Spule verschlossen werden. Zur Erhaltung des Feldes ist dann nur ein regelmäßiges Nachfüllen der Kühlmedien Flüssighelium und Flüssigstickstoff erforderlich.
Kernspinresonanzspektroskopie (NMR-Spektroskopie von nuclear magnetic resonance) ist eine spektroskopische Methode zur Untersuchung der elektronischen Umgebung einzelner Atome und der Wechselwirkungen mit den Nachbaratomen. Dies ermöglicht die Aufklärung der Struktur und der Dynamik von Molekülen sowie Konzentrationsbestimmungen.
Die Methode beruht auf der magnetischen Kernresonanz, einer resonanten Wechselwirkung zwischen dem magnetischen Moment von Atomkernen der Probe, die sich in einem starken statischen Magnetfeld befindet, mit einem hochfrequenten magnetischen Wechselfeld. Es sind nur solche Isotope der Spektroskopie zugänglich, die im Grundzustand einen von 0 verschiedenen Kernspin und damit ein magnetisches Moment besitzen wie z.B. ^{1}H, ^{13}C, ^{15}N, ^{17}O usw.
Zur Messung wird die Probe in ein homogenes magnetisches Feld gebracht, das sogenannte Hauptmagnetfeld. Die Probe wird von einer Induktionsspule umgeben, welche ein hochfrequentes elektromagnetisches Wechselfeld senkrecht zum Hauptmagnetfeld erzeugt. Dann variiert man die Stärke des Hauptmagnetfeldes bis der Resonanzfall eintritt („continuous wave“, veraltet). Alternativ kann die magnetische Feldstärke konstant gehalten und die Frequenz des eingestrahlten Wechselfeldes variiert werden („continuous field“, veraltet). Wenn der Resonanzfall eintritt, die Probe also Energie aus dem Wechselfeld aufnimmt, verändert sich die Stromstärke, welche zum Aufbau des Wechselfeldes benötigt wird. – Dies ist messbar. Moderne Messverfahren strahlen nicht mehr kontinuierliche Wechselfelder in die Probe ein, sondern Radiowellen-Pulse („pulsed fourier transform NMR“).

Die Anzahl der in Österreich befindlichen NMR-Geräte wurde einerseits durch direkte Anfragen bei den jeweiligen Universitäten oder Firmen, andererseits nach Auskünften von Dr. Lothar Brecker, Assoziierter Professor am Institut für Organische Chemie der Universität Wien und Arbeitsgruppenleiter der AG-NMR der Gewerkschaft Österreichischer Chemiker (GÖCh), ermittelt.

NMR-Geräte an Universitäten laut AG-NMR (Dr. Lothar Brecker) sind:

- Universität Wien, Chemie: 600 MHz, 2 x 500 MHz, 2 x 400 MHz → 5 NMR
- Universität Wien, Pharmazie: 500 MHz, 400 MHz, 300 MHz, 200 MHz → 4 NMR
- Universität Wien, Max-Perutz Zentrum: 800 MHz, 2 x 600 MHz, 500 MHz → 4 NMR
- BOKU Tulln: 400 MHz → 1 NMR
- BOKU Wien: 600 MHz, 300 MHz → 2 NMR
- TU Graz: 500 MHz, 3 x 300 MHz, 2 x 200 MHz → 6 NMR
- KFU Graz, Chemie: 700 MHz, 500 MHz, 300 MHz → 3 NMR
- KFU Graz, Pharmazie: 600 MHz → 1 NMR
- JKU Linz: 700 MHz, 500 MHz, 300 MHz → 3 NMR
- Universität Innsbruck: 600 MHz, 500 MHz, 300 MHz → 3 NMR
- Montanuniversität Leoben: 400 MHz → 1 NMR

NMR-Geräte nach eigenen Anfragen bei den jeweiligen Universitäten:

- TU Wien, Angewandten Synthesechemie: 3 NMR
- TU Wien, Materialchemie: 2 NMR

NMR-Geräte in Firmen laut AG-NMR (Dr. Lothar Brecker):

- Lenzing, K-wood: 400 MHz → 1 NMR
- Industriepark Linz (Borealis, DSM und Nycomed/Takeda): 4 NMR

NMR-Geräte nach eigenen Anfragen bei den jeweiligen Firmen:

- Boehringer-Ingelheim (Wien): 2 NMR
- Sandoz (Kundl): 2 x 300 MHz, 500 MHz) → 3 NMR

NMR-Geräte in Firmen, deren Anzahl geschätzt werden musste:

- Nabriva: mind. 1 NMR (geschätzt

Bei der Firma Nabriva konnte weder durch direkte Anfragen eine Anzahl der dort befindlichen NMR-Geräte erhoben werden noch konnte Dr. Brecker angeben, wie viele Geräte sich dort befinden. Allerdings wusste Dr. Brecker aus seiner Tätigkeit als Arbeitsgruppenleiter der AG-NMR der Gewerkschaft Österreichischer Chemiker (GÖCh), dass diese Firma selbst NMR-Messungen durchführt. Daher wurde bei Nabriva als Mindestanzahl 1 NMR-Gerät angenommen.

Insgesamt gab es in Österreich im Jahr 2011 (mindestens) etwa 49 NMR-Geräte. Gut Dreiviertel dieser Spektrometer – 38 der ca. 49 NMR – stehen an Universitäten, da die Anschaffung sehr teuer und die Auslastung in Firmen meist nicht sehr groß wäre.

Den Niobgehalt in NMR-Geräten zu ermitteln, gestaltet sich schwierig, da – wie auch bei den MRT-Geräten – der Niobgehalt in den supraleitenden Magneten von Seiten der Herstellerfirmen als Betriebsgeheimnis gehandelt wird. Die typischen AnwenderInnen von NMR-Geräten sind organische

ChemikerInnen, PharmazeutInnen usw., der Aufbau dieser Geräte und im Speziellen die genaue Zusammensetzung des Magneten liegt nicht im Spezialgebiet dieser Forscher. Da auch eine Analyse des Magneten nicht zerstörungsfrei möglich wäre, muss bei der Ermittlung des Niobgehaltes des supraleitenden Magneten in NMR-Geräten auf eine Expertenschätzung zurückgegriffen werden.
Dr. Daniel Eckert ist stellvertretender Geschäftsführer der Firma Bruker in der Schweiz. Als Experte auf diesem Gebiet gab er folgende Schätzung zum Niobgehalt in NMR ab: „Zurzeit werden jährlich zwischen 500 und 600 NMR-Spektrometer (Bruker und Konkurrenz) produziert und bei Kunden installiert und ich gehe davon aus, dass es weltweit schon knapp über 10.000 installierte Geräte gibt. Alle dazugehörenden Magnete werden größtenteils mit NbTi-Leitern gewickelt, für Feldstärken über 9 T werden zusätzlich auch Nb_3Sn-Leiter eingesetzt. Der Anteil Nb an diesen Legierungen variiert zwischen 5 und 20 Gewichtsprozenten. Wenn ich jetzt eine Mischrechnung über alle Spektrometer mache, von den kleinsten (300 MHz) bis zu den größten (1000 MHz), komme ich auf einen jährlichen Gebrauch von 8 – 9 Tonnen Nb für NMR-Magneten, also im Durchschnitt etwa 15 kg pro Magnet."
Mit einem durchschnittlichen Niobgehalt von 15 kg pro Magnet und NMR-Gerät und mind. 49 NMR-Geräten in Österreich ergibt sich so ein Nioblager von rund 735 kg Nb in NMR-Geräten.
Laut Dr. Brecker gibt es zur durchschnittlichen Lebensdauer von NMR-Magneten keine gute Statistik. Einige Geräte machen gleich zu Beginn Probleme, andere (viele) halten schon weit über 30 Jahre und ein Ende ist nicht abzusehen. Die heute gefertigten Magneten sind zwar in den ersten Jahren quasi fehlerfrei, jedoch gibt es natürlich noch keine Daten zur Haltbarkeit nach vielen Jahren. Die „durchschnittliche Betriebszeit" schätzt Dr. Brecker auf 20 – 25 Jahre, eventuell sogar etwas höher (für den Magnet und nicht die öfter erneuerte zugehörige Elektronik). Danach werden in aller Regel sowohl in Universitäten, als auch in Firmen neue Geräte angeschafft. Die Hersteller nehmen die alten Geräte dabei in aller Regel zurück.
Demzufolge wird hier von einer Einsatzdauer von NMR-Spektrometern von etwa 25 Jahren ausgegangen, was zu einem errechneten Zuwachs von 2 Geräten im Jahr 2011 führen würde. Geht man von einem statischen Lager aus (Input = Output), kann man über das Anfallpotential errechnen, dass statistisch pro Jahr 2 NMR-Geräte ausgetauscht werden, was einen In- und Output von jeweils 2 NMR-Geräten ergebe. Fluss in die Abfallwirtschaft wird es – wie auch bei MR-Tomographen – jedenfalls keinen geben, da die Hersteller die Altgeräte wieder zurücknehmen. Mangels Informationen konnte der Fluss Alt-NMR daher nicht quantifiziert werden.

NMR-Geräte		**Niob [t]**
NMR	Lager	0,74 $^{+/- 0,18}$

Tabelle 32 Quantifiziertes Lager der NMR-Geräte im Prozess Industrie & Gewerbe im System Niob in Österreich (2011)

4.1.2.2 MRT-Geräte

Auch hier findet Niob als Supraleiter zur Erzeugung starker, konstanter, nur langsam variierender Magnetfelder Verwendung (siehe auch Kapitel 0

NMR-Geräte).

Die Magnetresonanztomographie (MRT oder MR, MRI = magnetic resonance imaging) ist ein bildgebendes Verfahren, das vor allem in der medizinischen Diagnostik zur Darstellung von Struktur und Funktion der Gewebe und Organe im Körper eingesetzt wird. Es basiert physikalisch auf den Prinzipien der Kernspinresonanz (NMR), insbesondere der Feldgradienten-NMR, und wird daher auch als Kernspintomographie bezeichnet (siehe dazu auch Kapitel 0

NMR-Geräte).

Mit der MRT kann man Schnittbilder des menschlichen (oder tierischen) Körpers erzeugen, die eine Beurteilung der Organe und vieler krankhafter Organveränderungen erlauben. Sie basiert auf sehr starken Magnetfeldern sowie magnetischen Wechselfeldern im Radiofrequenzbereich, mit denen bestimmte Atomkerne (meist die Wasserstoffkerne bzw. Protonen) im Körper resonant angeregt werden, wodurch in einem Empfängerstromkreis ein elektrisches Signal induziert wird. Eine wesentliche Grundlage für den Bildkontrast sind unterschiedliche Relaxationszeiten verschiedener Gewebearten. Daneben trägt auch der unterschiedliche Gehalt an Wasserstoff-Atomen in verschiedenen Geweben (z.B. Muskel, Knochen) zum Bildkontrast bei.

Der Bericht von Angerer et al. (2009) bezeichnet Siemens Healthcare und Philips Healthcare als die „großen" europäischen Hersteller der Tomographen.

Generell kann zwischen intramuraler Verwendung im Bereich der Krankenanstalten und extramuraler Verwendung im Bereich der niedergelassenen Versorgung unterschieden werden.

Laut Auskunft von Dr. Ulrike Schermann-Richter vom Bundesministerium für Gesundheit gab es 2011 160 MRT-Geräte größer/gleich 1 Tesla und 17 MRT-Geräte < 1 Tesla (siehe Tabelle 33).

Die Anzahl der MRT-Geräte im Raum Wien findet sich auch im Regionalen Strukturplan Gesundheit (RSG) Wien.

	B	K	NÖ	OÖ	S	St	T	V	W	Österreich gesamt
MRT ≥ 1 Tesla	4	10	23	22	8	28	18	7	40	160
davon intramural	2	7	10	14	5	15	11	3	22	89
davon extramural	2	3	13	8	3	13	7	4	18	71
MRT < 1 Tesla	1	0	1	1	2	0	7	2	3	17

Tabelle 33 MR-Geräte > 1 Tesla und < 1 Tesla in Österreich aufgeschlüsselt nach Bundesländern

Ende 2010 gab es in Österreich laut Auskunft von Dr. Ulrike Schermann-Richter vom Bundesministerium für Gesundheit 158 MRT-Geräte größer/gleich 1 Tesla – 156 Geräte, die im Strukturplan erfasst wurden plus 2 sogenannte „Funktionsgeräte", die interoperativ bzw. für ganz spezielle Aufgaben verwendet werden und nicht allgemein versorgungswirksam sind. Die Zahl der „kleinen" MRT-Geräte mit weniger als 1 Tesla schätzt sie auf rund 20 in Österreich – diese Daten wurden im Strukturplan für 2010 noch nicht erfasst. Es gab also bei den Geräten > 1 Tesla 2011 2 MRT-Geräte mehr als im Jahr 2010, die Geräte < 1 Tesla dürften in etwa gleich geblieben sein.

Wie schon bei den NMR-Geräten stellt auch bei den MRT-Geräten der Niobgehalt des supraleitenden Magneten ein Betriebsgeheimnis dar, da dadurch direkt die Homogenität des Magnetfeldes, Strombedarf, Kühlung usw. beeinflusst werden, wie ein Mitarbeiter der Firma Philips mitteilte. So muss auch hier eine Expertenschätzung zur Ermittlung des Niobgehaltes in MRT-Geräten angewendet werden.

Dr. Daniel Eckert, stellvertretender Geschäftsführer der Firma Bruker in der Schweiz, gab als Experte auf dem Gebiet der supraleitenden Magneten in NMR- und MRT-Geräten folgende Schätzung ab: „MRI-Magnete sind wesentlich größer als NMR-Magnete, da sie eine Öffnung von 80 – 90 cm haben (NMR: 5 – 14 cm), wo die Patienten reingeschoben werden für die klinische Untersuchung. Sie verbrauchen somit wesentlich mehr Supraleiter (ausschließlich NbTi-Leiter, da die Feldstärken relativ gering sind), der mittlere Nb-Gehalt dürfte bei etwa 50 kg pro Magnet liegen. Zurzeit werden weltweit über 2.000 MRI-Systeme pro Jahr installiert, was einer Menge von über 100 Tonnen Nb entspricht."

Wertet man nur die 160 „großen" MRT-Geräte mit einer magnetischen Flussdichte von größer oder gleich 1 Tesla in Österreich aus, ist darin eine Niobmenge von ca. 8.000 kg enthalten (davon sind 2 MRT-Geräte, also ca. 100 kg Nb 2011 hinzugekommen), nimmt man auch die 17 „kleinen" MRT-Geräte kleiner 1 Tesla dazu, erhält man eine Niobmenge von insgesamt ca. 8.850 kg.

Laut Du und Graedel (2011b) liegt die Einsatzdauer eines MRT-Geräts bei 10 Jahren. Das ergäbe mit den vorliegenden Zahlen und unter der Annahme eines statischen Lagers (Input = Output) ein errechnetes Anfallpotential von 18 MRT-Geräten pro Jahr und damit auch einen entsprechend gleich großen Inputfluss jährlich (plus die 2 MRT-Geräte, die tatsächlich 2011 dazugekommen sind). Da vom Bundesministerium für Gesundheit jährlich die Anzahl der Geräte, die in Betrieb sind, erhoben wird, nicht aber, ob Geräte ausgetauscht werden, liegen dazu bezogen auf Österreich keine Informationen vor. Dieser eventuelle Austausch von 18 MRT-Geräten im Jahr 2011 wird hier vernachlässigt, da er einerseits in keiner Weise bestätigt ist, andererseits es auch keine Auswirkungen hätte, wenn 2011 18 MRTs ausgetauscht worden wären, da eventuell anfallende Alt-MRTs in der Regel vom Erzeuger zurückgenommen werden. Bei einem möglichen Austausch von MRTs würden sich der Import der neuen Geräte und der Export der alten Geräte (zum Hersteller) in Bezug auf die Niob-Bilanz Österreichs aufheben. Zusätzlich wird angemerkt, dass eine Einsatzdauer von MRT-Geräten von nur 10 Jahren im Vergleich zu einer durchschnittlichen Einsatzdauer von ca. 25 Jahren bei NMR-Geräten bezogen auf den supraleitenden Magneten relativ kurz erscheint. Analog zu Alt-NMR-Geräten konnte der Fluss Alt-MRT-Geräte mangels Informationen nicht quantifiziert werden.

MRT-Geräte		Niob [t]
MRT	Input-Fluss	0,1 $^{+/- 0,03}$
MRT	Lager	8,75 $^{+/- 2,19}$

Tabelle 34 Quantifizierter Fluss und Lager der NMR-Geräte im Prozess Industrie & Gewerbe im System Niob in Österreich (2011)

4.1.3 Münzen

Eine speziell in Österreich auftretende Verwendung von Niob ist die Herstellung von 25-Euro-Bimetallmünzen aus Silber und Niob, die seit 2003 von der Münze Österreich geprägt werden. Der Niobkern der Münze wird bei jeder Auflage, also jedes Jahr, durch anodische Oxidation anders gefärbt, wobei durch unterschiedliche Oxidschichtdicken unterschiedliche Lichtbrechungen und damit andere Farbreflexe zustande kommen. Entwickelt wurde diese Methode, dass sich durch Anodisierung eine dünne Oxidschicht auf dem Niobkern bildet, vom Technologiezentrum Plansee der Planseewerke in Reutte in Tirol, wo die Niobkerne auch nach wie vor hergestellt werden.

Thema	Erscheinungs-jahr	Auflage	Farbe des Niobkerns	Gewicht des Niobkerns [g] (99,8 % Niob)
700 Jahre Hall in Tirol	2003	50 000	blau	7,15
150 Jahre Semmeringbahn	2004	50 000	grün	7,15
50 Jahre Fernsehen	2005	65 000	violett	7,15
Europäische Satellitennavigation	2006	65 000	gelb	7,15
Österreichische Luftfahrt	2007	65 000	türkis	6,5
Faszination Licht	2008	65 000	grün	6,5
Jahr der Astronomie	2009	65 000	goldgelb	6,5
Erneuerbare Energie	2010	65 000	blau	6,5
Robotik	2011	65 000	rot	6,5
Bionik	2012	65 000	violett	6,5

Tabelle 35 25-Euro-Bimetallmünzen

Der Ring der Bimetallmünze besteht jeweils aus 90 % Silber und 10 % Kupfer, der Kern aus 99,8 % Niob. Das Gewicht des Rings beträgt bei allen Münzen 10 g, der Kern wog bis 2006 7,15 g, ab 2007 nur mehr 6,5 g.

So ergibt sich im Gesamtbestand aller Niobmünzen bis zum Ende des Jahres 2011 ein Niobgehalt von 3.757 kg Niob, wovon 422,5 kg Niob allein in den im Jahr 2011 produzierten Münzen enthalten ist.

Münzen		Niob [t]
reines Niob	Input-Fluss	15,42 $^{+/- 3,5}$ davon 0,4225 $^{(+/-0)}$ für Münzen
Münzkerne	Fluss innerhalb I&G	3,757
Münzen	Output-Fluss zu PHH	0,4225

Tabelle 36 Quantifizierte Flüsse und Lager der NMR-Geräte im Prozess Industrie & Gewerbe im System Niob in Österreich (2011)

4.1.4 Superlegierungen

Auch zur Herstellung von Superlegierungen findet Ferroniob – aber auch Nickelniob – in der metallurgischen Industrie Verwendung. Superlegierungen sind hochwarmfeste Werkstoffe komplexer Zusammensetzung (Nickel-, Kobalt- und Eisenbasislegierungen mit Zusätzen anderer Elemente wie z.B. Niob). Der Name Superlegierung deutet darauf hin, dass ihre Einsatztemperaturen höher liegen als die von Stählen, weil sie in hohen Temperaturbereichen über erhöhte Festigkeit verfügen (Einsatztemperaturen von bis zu 80 – 90 % des Schmelzpunktes sind hier möglich). Niob erhöht in diesem Zusammenhang die Warm- und Schlagfestigkeit. Anwendung finden Superlegierungen (auch wegen ihres hohen Preises) im Motoren-, Turbinen- und Triebwerksbau, in der Energietechnik sowie in Luft- und Raumfahrt.

Hier ist die Datenlage im Vergleich zu Niob in der Stahlindustrie, wo Niob zu ca. 90 – 95 % Verwendung findet, noch deutlich schlechter. Deshalb wurde – nach ersten Sondierungen der Datenlage – im Rahmen dieses Projektes auf eine genauere Abschätzung der – im Bezug auf den Niob-Haushalt in Österreich – (sehr kleinen) Niobmengen in Superlegierungen verzichtet.

4.2 Private Haushalte & Infrastruktur

4.2.1 Stahl

Da Niob-hältige Stähle sich in allen Prozessen der SFA für Niob in Österreich finden, wird das gesamte System der Niob-hältigen Stähle im Kapitel 4.1.1 im Prozess Industrie & Gewerbe beschrieben. Dort finden sich auch die quantifizierten Flüsse und Lager und deren Herleitungen.
Der Prozess Bauwerke und Pipelines wird dem Subsystem Private Haushalte & Infrastruktur zugeordnet. Niob in Stählen ist in großer Menge in zahlreichen Bauwerken „gespeichert“, d.h. Bauwerke stellen ein großes Lager für Niob-hältige Stähle dar. Da Bauwerke einem stetigen Erneuerungsprozess unterliegen – auf der einen Seite werden neue errichtet, auf der anderen Seite

alte abgerissen – entstehen hier relevante Niob-Flüsse sowohl in den Prozess Private Haushalte & Infrastruktur hinein als auch aus ihm heraus.

Baustähle und Niob-hältige Stähle für die Infrastruktur (v.a. für Pipelines, auch für Schienen) werden in Österreich hergestellt, aber auch aus dem Ausland importiert. Da keine der kontaktierten Institutionen – weder Stahlwerke noch übergeordnete Organisationen wie die World Steel Association – Angaben zu den Niob-Mengen in speziellen Stählen machen konnte, können diese Flüsse hier allesamt nicht quantifiziert werden. Allein der Fluss der Stähle für die Infrastruktur von Industrie & Gewerbe (von den Stahlwerken) zu den privaten Haushalten konnte anhand der Umsatzzahlen der Voestalpine aus deren Geschäftsbericht abgeschätzt werden, wie schon im Kapitel 4.1.1 im Prozess Industrie & Gewerbe beschrieben.

Sowohl die Niob-Lager in Bauwerken als auch die Niob-Lager in Pipelines können nicht quantifiziert werden, da der Niob-Gehalt stark schwankt und dazu keine konkreten Informationen gefunden werden konnten. Die hier in Tabelle 37 angeführten Lagerzuwächse für Bauwerke und Pipelines stammen aus den Niob-hältigen Stählen, die in Österreich als Baustähle produziert und nicht exportiert und wie oben beschrieben abgeschätzt wurden. Diese Lagerzuwächse sind nicht als endgültige Daten anzusehen, da die gesamten Lagerzuwächse inklusive importierter Baustähle (die nicht quantitativ abgeschätzt werden konnten) größer einzuschätzen sind.

Ähnlich verhält es sich mit den Output-Flüssen von Bauwerken (Baurestmassen) und Pipelines: Mangels Informationen über den tatsächlichen Niob-Gehalt konnten diese Flüsse nicht quantifiziert werden.

Stahl		**Niob [t]**
Stähle für Infrastruktur	Fluss von I&G	81 $^{+/- 11}$
Baustähle	Fluss innerhalb PHH&I	40 $^{+/- 9}$
Pipelinestähle	Fluss innerhalb PHH&I	41 $^{+/- 9}$
Bauwerke	Lager	+ 40 $^{+/- 9}$
Pipeline	Lager	+ 41 $^{+/- 9}$

Tabelle 37 Quantifizierte Flüsse und Lager der Niob-hältigen Stähle im Prozess Private Haushalte & Infrastruktur im System Niob in Österreich (2011)

4.2.2 Münzen

Die im Kapitel 4.1.3 beschriebenen 25-Euro-Bimetallmünzen aus Silber und Niob stellen einen Importfluss in die privaten Haushalte vom Prozess Industrie & Gewerbe dar. Das Lager an Niob in Bimetallmünzen in privaten Haushalten ergibt sich aus der Anzahl der produzierten und verkauften Münzen aus den Jahren 2003 – 2010. Die im Jahr 2011 hergestellten Münzen werden als Fluss in die privaten Haushalte dargestellt. Wie viele Münzen jährlich erzeugt und damit verkauft wurden, findet sich im Kapitel 4.1.3. Ähnlich wie beim Schmuck kann auch bei Münzen davon ausgegangen werden, dass ihre Lebensdauer praktisch unlimitiert ist und sie nur aus Versehen und vereinzelt in der

Abfallwirtschaft landen könnten. Ob bzw. wie viele Münzen ins Ausland verkauft werden und wie viele im Inland verbleiben, kann nicht abgeschätzt werden.

Münzen		**Niob [t]**
Münzen	Input-Fluss von I&G	0,42
Münzen	Lager	$3{,}33^{+0{,}42}$

Tabelle 38 Quantifizierter Fluss und Lager der Niob-hältigen Stähle im Prozess Private Haushalte & Infrastruktur im System Niob in Österreich (2011)

4.2.3 Schmuck

In der Schmuckherstellung wird Niob als Legierungszusatz in kleinsten Mengen verwendet. Wegen seines bläulichen Schimmers eignet sich Niob auch als Hauptmetall für die Schmuckherstellung, v.a. für Piercing-Schmuck.

Da davon ausgegangen werden kann, dass das in der Schmuckindustrie verwendete Niob nur einen sehr kleinen Prozentsatz des gesamten Niobs darstellt, wurde dieser Weg im Rahmen des vorliegenden Projektes nicht weiter verfolgt. Abgesehen von den geringen Mengen ist unklar, inwieweit Schmuck grundsätzlich ein relevantes Ressourcenpotential darstellen kann. Da Schmuck primär als (komponiertes) Material (nicht als Produkt) genutzt wird, ist die technische Lebensdauer im Prinzip unbegrenzt. Daher endet Schmuck in der Regel nur aus Versehen in der Abfallwirtschaft und kann nur bedingt als Sekundärrohstoffquelle angesehen werden. Hinzu kommt, dass nicht abgeschätzt werden kann, wie viel Schmuck von Verbrauchern selber aus dem Ausland importiert wird.

4.2.4 Elektrolytkondensatoren

Ein Elektrolytkondensator ist ein gepolter Kondensator, dessen Anoden-Elektrode aus einem Metall (Ventilmetall) besteht, die Kathode wird durch einen Elektrolyten gebildet. Das Dielektrikum des Kondensators bildet eine dünne Oxidschicht auf der metallischen Anode, die durch Elektrolyse (anodische Oxidation) erzeugt wird. Man kann Elektrolytkondensatoren nach der Art der metallischen Elektrode (Aluminium, Tantal oder Niob) und nach der Beschaffenheit des Elektrolyten (feucht oder trocken) unterscheiden.

Laut Christoph Schnitter vom Tantal-Produzenten H. C. Starck (http://www.scinexx.de/dossier-detail-443-12.html, Stand 2009) werde an Möglichkeiten geforscht, Niob auch für Kondensatoren zu nutzen. Dafür müsse die mangelnde Reinheit von Niob in Verbindung mit der notwendigen großen Oberfläche verbessert werden. Keramik- und Aluminium-Kondensatoren stellen bereits eine Konkurrenz zu Tantal-Kondensatoren dar.

Niob-Elektrolytkondensatoren stünden in direktem Wettbewerb mit industriellen Tantal-Elektrolytkondensatoren, da ihre Eigenschaften – allen voran die Leistungsfähigkeit – vergleichbar

sind. So besitzen sie z.B. ähnlich hohe Speicherdichten wie Tantal-Elektrolytkondensatoren. Jedoch ist der angebotene Kapazitätsbereich bei Niob-Kondensatoren mit einem Nennspannungsbereich von max. 10 – 25 V vergleichsweise klein, wodurch sie für Bauteile, die besonders zuverlässig arbeiten müssen (wie Flugzeuge, Autos, Medizintechnik etc.), weniger geeignet sind als Tantal-Kondensatoren, die bei Betriebsspannungen von bis zu 60 V stabil arbeiten. Der Einsatz von (billigeren) Niob-Kondensatoren wäre somit für Produkte des Massen- und Wegwerfmarktes wie Laptops oder Spielkonsolen geeignet.
Das billigere Niob könnte in Zukunft Tantal in Elektrolytkondensatoren ersetzten, solange der Schwerpunkt auf dem Preis der Rohstoffe liegt. Sollten die Coltan-Reserven knapp werden, könnte ein Ersatz von Tantal durch Niob natürlich keine Abhilfe schaffen.

4.3 Abfallwirtschaft

Der Prozess Abfallwirtschaft wurde hier als einziger nicht in einem Subsystem dargestellt, da die vorliegenden Informationen nicht ausreichen, um den Prozess im Detail abzubilden.
Wie schon im Kapitel 4.2.1 dargelegt ist die in Baurestmassen enthaltene Menge an Niob-hältigen Stählen nicht quantifizierbar. Qualitativ kann gesagt werden, dass die in den entsorgten Baurestmassen enthaltenen Stähle jedenfalls vom mineralischen Material getrennt und als Schrotte einem Stahlwerk zugeführt werden. Die einzige Möglichkeit, Niob gezielt zu rezyklieren, wäre, Niob-hältige Stähle gezielt aus den gemischten Schrotten zu separieren, getrennt einzuschmelzen und wieder zu Niob-hältigen Stählen zu verarbeiten. Die dissipative Methode, dass alle Schrotte gemeinsam eingeschmolzen werden und die Schmelze so lange mit frischem Stahl verdünnt wird, bis Niob keinen Störfaktor mehr in der Rohstahlerzeugung darstellt, macht eine spätere Rückgewinnung oder gezielte Wiederverwertung von Niob unmöglich. Durch diese dissipative Nutzung und die gemischt anfallenden Schrotte spielt Niob derzeit in der Abfallwirtschaft keine wirtschaftliche Rolle, was auch dazu führt, dass zu den Niob-Gehalten in Schrotten keine Daten vorliegen.
Im Gegensatz dazu kann das als Supraleiter verwendete Niob in MRT- und NMR-Geräten sehr einfach rezykliert werden, was auch praktiziert wird – allerdings nicht von der Abfallwirtschaft, sondern in Closed-Loop-Produktsystemen bei den Herstellerfirmen. Da diese einerseits genau über den Aufbau ihrer Geräte Bescheid wissen und sie andererseits wieder Supraleiter aus Niob herstellen, ist dieser Weg des Recyclings der effizienteste. Anzumerken ist natürlich, dass die hier umgesetzten Mengen an Niob im Vergleich zu denen in der Stahlindustrie sehr gering sind (vgl. Abbildung 15).
Selbst bei einem Deponierückbau wäre eine Abtrennung von Niob-Stählen praktisch ausgeschlossen, da diese wiederum nur durch chemische Analysen identifizierbar wären. Das Niob-Lager in Deponien wäre abschätzbar, indem man die aus Landfill Mining erhaltenen Daten zu Stahlmengen auf Deponien mit einem geschätzten durchschnittlichen Niob-Anteil in Stählen verknüpft.

4.4 Ergebnisse

In Abbildung 15 ist der Niob-Haushalt für Österreich im Jahr 2011 dargestellt. Die bei weitem größten quantifizierten Niob-Flüsse in dieser SFA sind die, die zur Stahlproduktion in Österreich gehören: der Ferro-Niob-Import mit 770 $^{+/- 121}$ t/a und der Export an Niob-hältigen Stählen mit 616 $^{+/- 121}$ t/a, genauer dargestellt im Stoffflussdiagramm Industrie & Gewerbe (Abbildung 16 Subsystem Industrie & Gewerbe im System Niob in Österreich (2011)). Die Menge der importierten Stähle konnte nicht quantifiziert werden, da in den entsprechenden Statistiken (z.B. European Mineral Statistic (Brown et al. 2012a), World Mineral Production (Brown et al. 2012b),) die Kategorie „crude steel" nicht höher aufgelöst ist und somit Niob-hältige Stähle nicht extra ausgewiesen sind.

Gepunktete Flüsse können – wie bereits in den Kapiteln 0 – 4.3 beschrieben – nicht quantifiziert werden und werden daher in die Bilanzierung nicht miteinbezogen.

Exakt bestimmbar ist die Niob-Menge in den in Österreich am Technologiezentrum Plansee der Planseewerke hergestellten 25-Euro-Bimetallmünzen aus Silber und Niob, die seit 2003 von der Münze Österreich geprägt werden. Unklar ist allerdings, ob bzw. wie viele dieser Münzen ins Ausland verkauft werden und wie viele im Inland verbleiben. Das maximal anzunehmende Niob-Lager in diesen Münzen – davon ausgehend, dass alle Münzen seit 2003 im Inland verbleiben – ist allerdings mit 3,75 t verglichen mit dem jährlichen Niob-Verbrauch in der Stahlindustrie sehr klein.

Die Niob-Menge in NMR- und MRT-Geräten, in denen Niob als Supraleiter verwendet wird, ist nicht genau quantifizierbar, da der Niob-Gehalt pro Gerät nur abgeschätzt werden kann, weil die genaue enthaltene Menge bei den Herstellerfirmen als Betriebsgeheimnis gehandelt wird. Die Anzahl der MRT-Geräte wird jährlich vom Bundesministerium für Gesundheit erhoben und ist somit relativ genau bekannt. Die Anzahl der NMR-Geräte kann durch Anfragen bei den einzelnen Forschungsinstitutionen, von denen angenommen wird, dass sie NMR-Messungen durchführen, abgeschätzt werden. Das Niob-Lager in NMR-Geräten kann mit 0,74 $^{+/- 0,18}$ t als sehr klein, das in MRT-Geräten mit 8,75 $^{+/- 2,2}$ t als klein verglichen mit dem jährlichen Niob-Umsatz der Stahlindustrie bezeichnet werden. Ein Recycling des Niobs in MRT- und NMR-Geräten findet statt, wird allerdings nicht über abfallwirtschaftliche Betriebe abgewickelt, sondern direkt von den Herstellerfirmen in Form von Closed-Loop-Produktsystemen.

Bei der Firma Plansee SE wurden im Jahr 2011 10 – 20 t Niob umgesetzt – einerseits im Rahmen von Forschungsprojekten, andererseits wird Niob dort zu Flachhalbzeugen verarbeitet, hochreines Niob zu Blechen gewalzt und finalisiert und Mischungen von Niob und Zirkon bzw. Molybdän verarbeitet.

Der Prozess Abfallwirtschaft konnte mangels Informationen als einziger nicht in einem Subsystem dargestellt werden. Die Niob-hältigen Stähle aus den Baurestmassen werden zwar vom mineralischen Baumaterialien abgetrennt und Stahlwerken zum Einschmelzen zugeführt, allerdings erfolgt dieser Prozess dissipativ, d.h. die Niob-hältigen Stähle werden nicht extra erfasst, sondern als Gesamtschrotte in der Stahlproduktion wiederverwendet. Bei dieser Vorgehensweise ist das in den Spezialstählen enthaltene Niob auch zu einem späteren Zeitpunkt keinem Recycling mehr zugänglich.

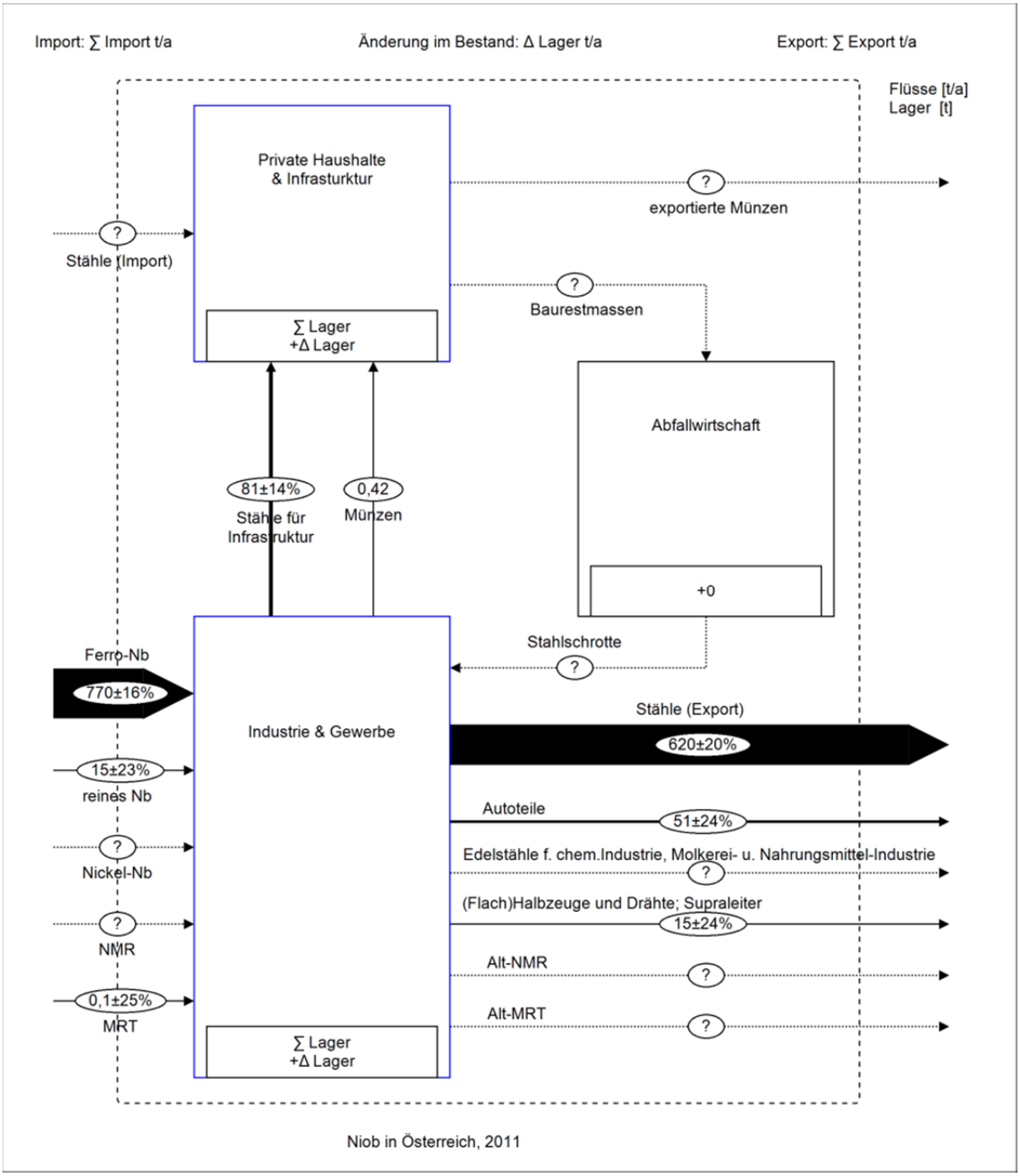

Abbildung 15 Stoffflussbild Niob in Österreich (2011)

Die Aufteilung der in Österreich produzierten, nicht exportierten Niob-hältigen Spezialstähle auf die einzelnen Industriezweige (Infrastruktur, Autoteile, chemische und Nahrungsmittelindustrie) erfolgt – mangels spezifischer Daten für Österreich – anhand einer Publikation des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung (DIW) (Eggert 2012).

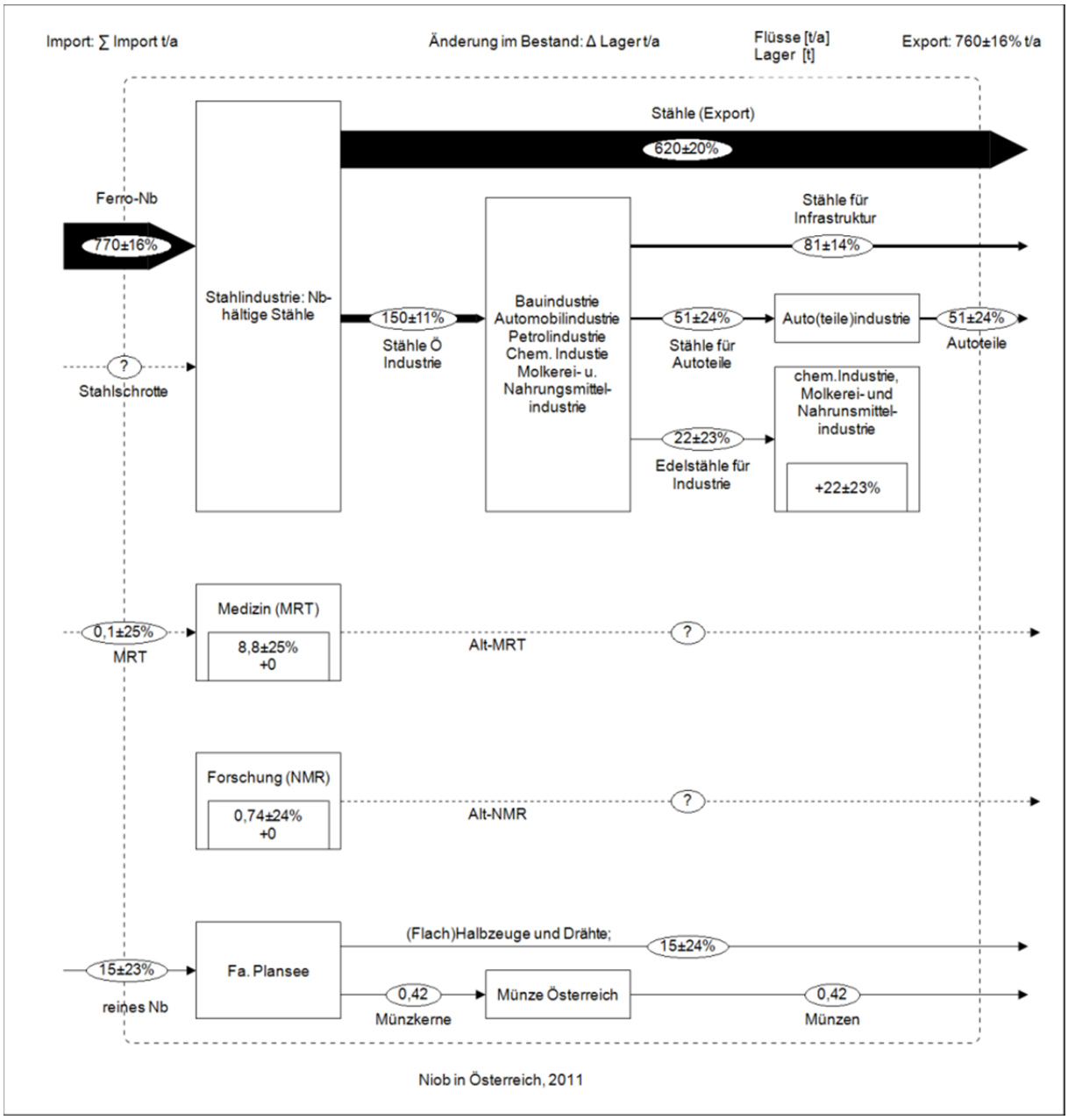

Abbildung 16 Subsystem Industrie & Gewerbe im System Niob in Österreich (2011)

Der Prozess Bauwerke und Pipelines wird dem Subsystem Private Haushalte & Infrastruktur (Abbildung 17) zugeordnet. Niob in Stählen ist in Form von Spezialstählen in großer Menge in zahlreichen Bauwerken „gespeichert“, d.h. Bauwerke stellen ein großes Lager für Niob-hältige Stähle dar. Da Bauwerke einem stetigen Erneuerungsprozess unterliegen, entstehen hier relevante Niob-Flüsse sowohl in den Prozess Private Haushalte & Infrastruktur hinein als auch aus ihm heraus. Allerdings werden diese (nicht speziell gekennzeichneten) Stähle beim Abbau – wie bereits beschrieben – dissipativ gemeinsam mit den gemischten Schrotten Stahlwerken zum Einschmelzen zugeführt.

Baustähle und Niob-hältige Stähle für die Infrastruktur (v.a. für Pipelines, auch für Schienen) (siehe Abbildung 15) werden in Österreich hergestellt, aber auch aus dem Ausland importiert. Der Fluss der Stähle für die Infrastruktur von Industrie & Gewerbe (von den Stahlwerken) zu den privaten Haushalten konnte anhand der Umsatzzahlen der Voestalpine abgeschätzt werden.

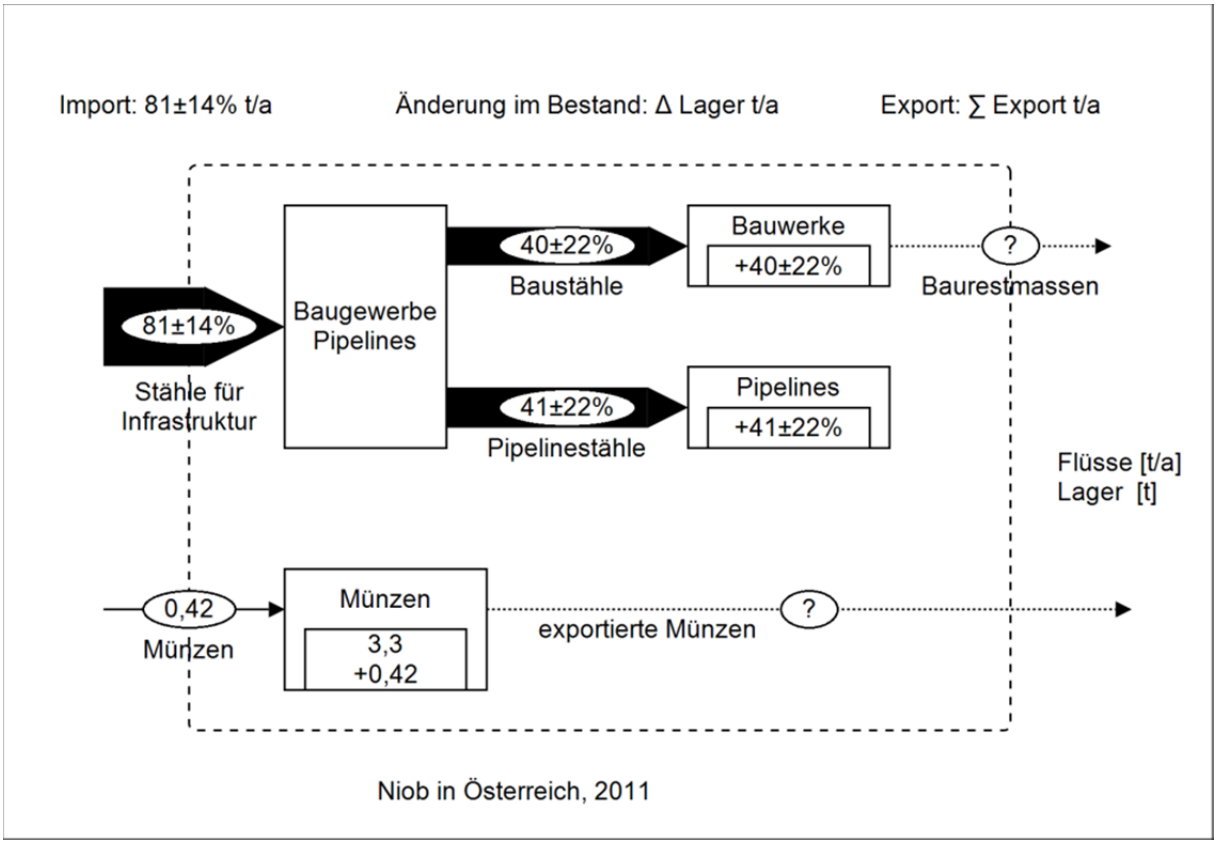

Abbildung 17 Subsystem Private Haushalte & Infrastruktur im System Niob in Österreich (2011)

Die angegebenen Unsicherheiten im Rahmen der Stoffflussanalysen bewegen sich zwischen 14 und 25 %, allein die Produktion der Niob-hältigen Bimetallmünzen ist exakt bestimmbar.

Es soll nochmals hervorgehoben werden, dass die Möglichkeit der Quantifizierung zumindest einiger Flüsse des Systems Niob-hältige Stähle allein durch eine einzige Auskunft (Ferro-Niob-Bedarf der Voestalpine) und darauf basierenden Hochrechnungen gegeben war. Vor diesem Hintergrund ist die

Datenlage zur Erstellung des österreichischen Niob-Haushaltes als sehr mangelhaft zu bezeichnen und die Ergebnisse dementsprechend als erste, grobe Abschätzungen anzusehen. Dazu kommt die große Anzahl an unbestimmten Flüssen, die eine quantitative Analyse des Nb-Haushaltes nur für ausgewählte Sektoren zulassen. Auf die Datenlücken und wie die Datenlage gezielt verbessert werden kann, wird im folgenden Kapitel 4.5 näher eingegangen.

4.5 Diskussion und Nb-Rohstoffpotentiale

In diesem Abschnitt werden einerseits die Ergebnisse der Stoffflussanalyse in Bezug auf das (zukünftige) Recyclingpotential für Niob in Österreich diskutiert, andererseits wird die Datenlage für die Erstellung der Stoffflussanalyse die damit verbundene Aussagekraft des Nb-Haushaltes kritisch betrachtet.

4.5.1 Recyclingpotentiale für Niob

Da Niob in erster Linie als Stahlveredler eingesetzt wird, stellen die Anwendungen in Spezialstählen die wesentlichen Flüsse (und Lager) in der Stoffflussanalyse für Niob in Österreich dar (vgl. Abbildung 15). Obwohl die Einsatzgebiete der Spezialstähle generell bekannt sind, kann anhand der vorhandenen Daten das Lager nicht in einer Weise charakterisiert werden, die eine gezielte Ausschleusung und Verwertung von Niob-hältigen Stählen erlaubt. Somit stellen zwar die Niob-Mengen in Spezialstählen bei weitem das größte Potential für ein Recycling dar, ein Wiedereinsatz (bzw. Verwertung) des Niobs in diesen Anwendungen erfolgt derzeit nicht und erscheint auch in Zukunft unwahrscheinlich. Die maßgeblichen Gründe dafür sind:

- Unzureichende Kenntnisse in Bezug auf die Lage und Qualität der Bauteile aus den Niob-hältigen Spezialstählen. Dadurch ist ein gezielter Ausbau bzw. eine getrennte Sammlung der Spezialstähle nicht möglich. Die resultierenden Konzentrationen von Niob in den gemischten Stahlschrotten sind jedoch viel zu niedrig, um eine Rückgewinnung und funktionale Nutzung des Niobs beim Recycling zu ermöglichen.
- Insgesamt relativ geringe Mengen an Niob in den Stählen (in den Spezialstählen liegen die Nb-Gehalte nur zwischen 0,03 und 0,5 Masse%), die nur kaum ökonomische Anreize für ein gezieltes Recycling darstellen.
- Der Großteil der produzierten Spezialstähle wird exportiert, wodurch das enthaltene Niob nicht zum Niob-Lager in Österreich beiträgt sondern „verloren“ geht.

Ein Recycling von Niob-hältigen Spezialstählen erscheint vor diesem Hintergrund nur für ausgewählte Anwendungen möglich, die eine getrennte Erfassung relativ problemlos ermöglichen (z.B. Pipelines). Sofern entsprechende Kenntnisse über den Mehrwert einer getrennten Erfassung der entsprechenden Stähle vorhanden sind und die ökonomischen Anreize dafür ausreichen, könnte ein

Recycling direkt von den Herstellern und der anwendenden Industrie in geschlossenen Systemen umgesetzt werden. Ein Recycling über das klassische Schrottrecycling erscheint derzeit weder wirtschaftlich noch technisch sinnvoll.

Abgesehen von den Spezialstählen wird Niob zur Produktion von Bimetall-Münzen und für Schmuck sowie als Supraleiter in NMR- und MRT-Geräten verwendet. Da die Nutzung in Münzen und Schmuck grundsätzlich nicht mit einer bestimmten „Lebensdauer" verbunden ist, kann für diese Anwendungen davon ausgegangen werden, dass sie kein maßgebliches Potential für das Recycling von Niob beinhalten. Eine Übergabe an die Abfallwirtschaft wird in der Regel nur unbeabsichtigt erfolgen, was eine getrennte Sammlung und Verwertung ausschließt.

Für die Anwendungen von Niob in der Forschung (NMR-Geräte) und in der Medizin (MRT-Geräte) wird von keinen (maßgeblichen) Lagerzuwächsen ausgegangen (vgl. Abbildung 16). Somit ist davon auszugehen, dass die Niob-Mengen in den entsprechenden Flüssen auch in Zukunft gering sein werden. Darüber hinaus handelt es sich bei diesen Anwendungen ohnehin um Spezial-Geräte, die durch die Herstellerfirmen während der Nutzung durchgehend betreut und schließlich als Alt-Geräte zurückgenommen werden. Sofern das Niob in den Altgeräten ein relevantes Recyclingpotential darstellt, kann davon ausgegangen werden, dass die Produzenten dieses Potential zu nutzen wissen. Obwohl massive Unsicherheiten in Bezug auf die Niob-Gehalte der einzelnen Geräte bestehen (vgl. Kapitel 4.1.2), würden diese in Bezug auf die NMR- und MRT-Geräte ein mögliches Recycling eher nicht verhindern (Produzent = Verwerter). Die relativ geringen Niob-Mengen in diesen Anwendungen (Nb-Lager in Österreich im Jahr 2011 ca. 9,5 t, vgl. Abbildung 15) unterstreichen, dass ein Nb-Recycling aus diesen Geräten in jedem Fall von untergeordneter Bedeutung im Gesamtsystem wäre.

4.5.2 Datenlage für die Erstellung des österreichischen Niob-Haushaltes

Wie im vorigen Abschnitt bereits erwähnt waren zur Erzeugung Niob-hältiger Spezialstähle nur generelle Angaben verfügbar. Dadurch kann die Verteilung von Niob auf unterschiedliche Stahlprodukte nur generell abgeschätzt werden – Produktionszahlen für die unterschiedlichen Stahlsorten waren nicht verfügbar. Insgesamt war die Bilanzierung des Niob-Einsatzes in der Stahlindustrie nur möglich, da von der Fa. Voestalpine eine Angabe zu den insgesamt eingesetzten Niob-Mengen bei der Produktion gemacht wurde. Die Einsatzgebiete sowie der Niob-Verbrauch anderer Stahlproduzenten mussten basierend auf durchschnittlichen Daten (z.B. konnten die Einsatzgebiete von Niob in Spezialstählen nur basierend auf Angaben des Deutschen Instituts für Wirtschaftsforschung ermittelt werden, Niob-Gehalte einzelner Stähle wurden anhand internationaler Angaben ermittelt, Produktionsstatistiken zur Stahlerzeugung in Österreich wurden verwendet, um den Niob-Import der gesamten Stahlindustrie abzuschätzen) ermittelt werden. Die mangelnde Bereitschaft der Industrie, konkrete Produktions- und Einsatzstatistiken der betreffenden Spezialstähle zur Verfügung zu stellen, bedingt die wesentlichsten Unsicherheiten in der Niob-Bilanz für Österreich, da die Stahlindustrie ca. 98 % des Niob-Umsatzes in Österreich bestimmt. Vor diesem

Hintergrund wäre eine Weitergabe (eine gewisse Aggregation aus Datenschutzgründen wäre hier natürlich unumgänglich) von Daten zum Einsatz von Niob in der Stahlindustrie und dem Verbleib der betreffenden Produkte als Grundlage für eine gezielte Bewirtschaftung von Niob-hältigen Spezialstählen zu sehen. Ohne entsprechende Daten ist ein Recycling dieser Spezialstähle in geschlossenen Kreisläufen kaum realisierbar.

Eine große Unbekannte im gesamten System stellt das bestehende Niob-Lager in Infrastruktur und in Deponien dar. Entsprechende Abschätzungen wurden im Rahmen der Stoffflussanalyse nicht angestellt, da es selbst für ein Bilanzjahr (2011) schwierig war, eine aussagekräftige Bilanz zu generieren (für eine Quantifizierung der Lager wäre eine Betrachtung über längere Zeiträume notwendig). Wogegen eine Nutzung von Niob in deponierten Spezialstählen und Rückständen aufgrund der hohen Verdünnung in Deponien sehr unwahrscheinlich ist, könnte eine bessere Kenntnis der Infrastruktur (z.B. Pipelinesysteme, bestimmte Konstruktionselemente von Verkehrsbauten) eine Identifikation vorhandener Recyclingpotentiale ermöglichen. Anhand der verfügbaren Daten ist dies für das Gesamtsystem jedoch nicht möglich und könnte nur fallweise (bei konkreten Abbruchprojekten) eine Möglichkeit darstellen.

In Bezug auf die Nutzung von Niob in Supraleitern und als Schmuckkomponente bestehen ebenfalls massive Unsicherheiten. Allerdings wirken sich diese nur geringfügig auf das vorhandene Recyclingpotential aus. Einerseits liegt dies an den geringen Niob-Mengen in diesen Anwendungen und andererseits daran, dass die entsprechenden Produkte nicht bzw. nur unbeabsichtigt als Abfälle anfallen.

Die geringsten Unsicherheiten bestehen in Bezug auf die Produktion von Niob-haltigen Bimetall-Münzen (Niob-Gehalt und Anzahl der Münzen sind exakt bekannt). Aufgrund der theoretisch unendlichen Nutzungsdauer und der Schwierigkeit bei der Lokalisierung der Münzen (Inland vs. Ausland), tragen die genauen Produktionsdaten nicht zu einer potentiellen Verwertung des Niobs in den Münzen bei.

5 SFA für Pd

Allgemeines über Pd

Palladium ist ein chemisches Element mit dem Elementsymbol Pd und der Ordnungszahl 46. Das silberweiße Übergangsmetall zählt zu den Platinmetallen, im Periodensystem steht es in der 5. Periode und der 10. Gruppe oder Nickelgruppe.

Palladium wurde 1803 entdeckt und nach dem 2 Jahre vorher entdeckten Asteroiden Pallas benannt. Heute wird es meist aus Nickel- und Kupfererzen gewonnen.

Palladium ähnelt im chemischen Verhalten sehr dem Platin, das im Periodensystem direkt unter Palladium steht. Palladium ist ein Edelmetall, auch wenn es deutlich reaktiver ist als Platin.

Bei Raumtemperatur reagiert Palladium nicht mit Sauerstoff, es behält an der Luft seinen metallischen Glanz. Bei Erhitzung auf etwa 400 °C läuft es aufgrund der Bildung einer Oxidschicht stahlblau an, bei etwa 800 °C zersetzt sich das Oxid wieder. Palladium löst sich in Salpetersäure, in Königswasser und in heißer konzentrierter Schwefelsäure. Auch in Salzsäure löst es sich bei Luftzutritt langsam auf. Der Edelmetallcharakter von Palladium ist damit dem des benachbarten Silbers vergleichbar.

Palladium besitzt die höchste Absorptionsfähigkeit aller Elemente für Wasserstoff. Bei Raumtemperatur kann es das 900-fache, Palladiummohr das 1200-fache und kolloidale Palladiumlösungen das 3000-fache des eigenen Volumens an Wasserstoff binden. Man kann die Wasserstoffaufnahme als Lösen von Wasserstoff im Metallgitter und als Bildung eines Palladiumhydrids mit der ungefähren Zusammensetzung Pd_2H beschreiben. Bei 30 °C und Normaldruck entspricht das maximale Wasserstoff-Palladium-Verhältnis der Formel $PdH_{0,608}$.

Produktion 2005	195 t
Reserven	Platingruppenmetalle insgesamt: 71.000 t
Regionale Konzentration der Produktion (2008)	Russland: 43 % Südafrika: 37 % Kanada: 7% (Top 3: 87 %)
Unternehmerische Konzentration (2005)	Norilsk Nickel (Russland) (50 %) Anglo American (Großbritannien) (18 %) Impala Platinum Holdings (Rep. Südafrika) (10 %) (Top 3: 78 %) (Top 10: 94 %)

Tabelle 39 Produktionsdaten von Palladium (Quellen: Lutz 2010; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2007)

Hauptanwendungen von Pd

Nach Angerer et al.(2009) (Quelle: Hagelüken 2005):

- Palladium in Kfz-Abgaskatalysatoren ~ 50,9 %
- Palladium in Elektronik und Elektrotechnik ~ 14,9 %
- Palladium in der Dentaltechnik ~ 13,7 %

Weitere Anwendungen (~ 20,5 %):

- Schmuck (Weißgold)
- Tiegel
- Wasserstoffspeicher
- Vielschichtkondensatoren (MLCC)
- Medizinische Instrumente

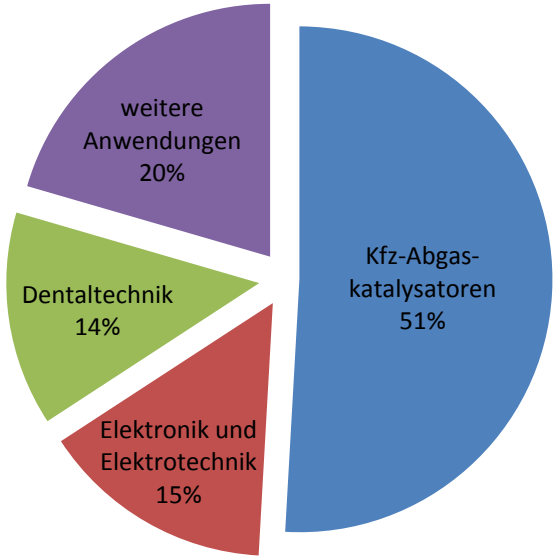

Abbildung 18 Anwendungsgebiete von Palladium (Angerer et al. 2009)

Pd soll zukünftig vermehrt in miniaturisierten Kondensatoren, zur Meerwasserentsalzung, als Elektrodenmaterial in Brennstoffzellen und als Speichermaterial für Wasserstoff in zukünftigen Wasserstoffautos zum Einsatz kommen.

Prozesse der SFA

Die SFA für Palladium in Österreich (2011) wurde in folgende Prozesse gegliedert:

- Industrie & Gewerbe
- Private Haushalte
- Abfallwirtschaft

5.1 Private Haushalte

5.1.1 Kfz-Abgaskatalysatoren

Die Erfindung des Kfz-Katalysators lag bereits in den 1950er-Jahren. In den 1970er-Jahren wurde er zunächst in den USA und in Japan aufgrund der dort herrschenden Smog-Problematik eingeführt.
Katalysatoren für die Abgasreinigung von Kraftfahrzeugen enthalten die Platingruppenmetalle Platin (Pt), Palladium (Pd) und Rhodium (Rh), wobei zunehmend Palladium das teurere Platin ersetzen kann. Durch die Abgasgesetzgebung stieg ab ca. 1980 der jährliche Gesamtbedarf an Platingruppenmetallen für Autokatalysatoren kontinuierlich an.
In Österreich besteht seit 01.01.1987 für alle Neuwagen über 1.500 cm³, seit 01.01.1988 auch für alle übrigen neuen Kraftfahrzeuge mit Benzinmotor Katalysatorpflicht. Seit 01.01.1995 werden Kraftfahrzeuge ohne Katalysator mit einer höheren Kfz-Steuer belegt. Laut ÖAMTC waren Ende 2011 95 % aller in Österreich zugelassenen Benzinfahrzeuge mit einem Katalysator ausgestattet.
Über die Hälfte der primär produzierten Menge an Palladium (auch bei Platin sind es über 40 %) geht in die Produktion von Kfz-Katalysatoren (Angerer et al. 2009) (Kristof, Hennicke et al. 2010).
Da Palladium auch als Elektrodenwerkstoff für Zündkerzen und in Lamda-Sonden zum Einsatz kommt, ist die Fahrzeugbranche eindeutig der Hauptabnehmer für Palladium.
Ein Katalysator ist in der Chemie ein Stoff, der bei einer chemischen Reaktion die Reaktionsgeschwindigkeit durch Absenkung der Aktivierungsenergie erhöht, ohne selbst dabei verbraucht zu werden, d.h. der Katalysator liegt nach der Reaktion unverändert vor bzw. kann regeneriert werden.
Fahrzeugkatalysatoren sollen durch Oxidation bzw. Reduktion die Verbrennungsschadstoffe Kohlenwasserstoffe (C_mH_n), Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxide (NO_x) in die ungiftigen Stoffe Kohlendioxid (CO_2), Wasser (H_2O) und Stickstoff (N_2) umwandeln.

$$2\ C_2H_6 + 7\ O_2 \rightarrow 4\ CO_2 + 6\ H_2O$$
$$2\ CO + O_2 \rightarrow 2\ CO_2$$
$$2\ NO + 2\ CO \rightarrow N_2 + 2\ CO_2$$

3-Wege-Katalysatoren bei Benzinmotoren reduzieren gleichzeitig die Stickoxide und die Kohlenwasserstoffe und oxidieren das Kohlenmonoxid.
Oxidationskatalysatoren bei Dieselmotoren reduzieren die Kohlenwasserstoffanteile an den Russpartikeln mit Hilfe des Luftsauerstoffes im Dieselabgas.
Fahrzeugkatalysatoren bestehen meist aus mehreren Komponenten. Als Trägermaterial dient ein temperaturstabiler Wabenkörper aus Keramik oder Metall mit vielen dünnwandigen Kanälen, der von einem metallischen Gehäuse (Canning) umgeben ist. Auf dem Träger befindet sich der sogenannte Washcoat, der durch hohe Rauhigkeit zur Oberflächenvergrößerung dient und aus Aluminiumoxid (Al_2O_3) und Sauerstoffspeicherkomponenten wie z.B. Cer(IV)-oxid (CeO_2) besteht.

Cer(IV)-oxid reagiert mit CO zu Cer(III)-oxid (Ce_2O_3) und CO_2, bei Sauerstoffüberschuss im Abgas wird das Cer(III)-oxid wieder regeneriert:

$$4\ CeO_2 + 2\ CO \rightarrow 2\ Ce_2O_3 + 2\ CO_2$$

$$2\ Ce_2O_3 + O_2 \rightarrow 4\ CeO_2$$

In dem Washcoat sind die katalytisch aktiven Platingruppenmetalle Platin (Pt), Palladium (Pd) bzw. Rhodium (Rh) eingelagert.

Laut Hagelüken (Hagelüken 2008) ist in der Fahrzeugflotte ein Vielfaches der Weltminenproduktion an Paltingruppenmetallen gebunden. Daher wird bei Kraftfahrzeugen auch von der „rollenden Platin- bzw. Palladiummine“ gesprochen.

Amatayakul und Ramnäs (2001) fanden in Kfz-Katalysatoren einen Anteil von 2 g an den Edelmetallen Platin, Palladium und Rhodium im Verhältnis Pt : Pd : Rh = 1 : 14 : 1. Damit übereinstimmend geben Kuriki et al. im Jahr 2010 einen Palladium-Bedarf von ca. 2,3 g pro Auto an, wobei sich diese Angabe nicht nur auf den Katalysator, sondern auch auf das Palladium in Zündkerze, Lambda-Sonde, Kontakten etc. bezieht. Die Experten Prof. Dr. Ernst Pucher, Professor am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik an der TU Wien, und Ass.Prof. Dr. Yuri Suchorski, Professor am Institut für Materialchemie an der TU Wien, gaben als Größenordnung für den Anteil an Platingruppenmetallen in Kfz-Katalysatoren in etwa 5 g bzw. 2 – 4 g an.
Der Anteil der einzelnen Platingruppenmetalle in Kfz-Katalysatoren unterliegt einem ständigen Wandel: Bei den ersten Katalysatoren wurde v.a. Platin in Kombination mit Rhodium als katalytisch aktive Substanzen eingesetzt. Durch weitere Entwicklungen konnte Platin in Katalysatoren für Benzinmotoren durch das billigere Palladium ersetzt werden.
Da für neue Kraftfahrzeuge mit Benzinmotor seit 1988 Katalysatorpflicht besteht, geht der ÖAMTC davon aus, dass Ende 2011 95 % aller in Österreich zugelassenen Benzinfahrzeuge mit einem Katalysator ausgestattet waren.
Nach Hagelüken et al. (2005) war bis 1993 für Europa das klassische Verhältnis Pt : Rh von 5 : 1 erkennbar. Aus Abbildung 19 ist ersichtlich, dass von 1993 – 1999 die Nachfrageexplosion in Europa fast ausschließlich durch Palladium bedingt war, während in den Jahren danach die Entwicklung durch Platin vorangetrieben wurde, da in Europa viele Dieselkatalysatoren gebaut wurden.
Da die genaue Zusammensetzung der einzelnen Katalysatoren der Pkw, die 2011 als Alt-Fahrzeuge anfielen, nicht bekannt ist, wird hier versucht, sich dem wahren Wert folgendermaßen anzunähern: Es wird der Durchschnitt der Angaben aus der Literatur und von Experten zum Gehalt an Platingruppenmetallen eines Katalysators (2 g, 5 g bzw. 2 – 4 g) herangezogen und angenommen, in etwa die Hälfte der enthaltenen Platingruppenmetalle sei Palladium. So kommt man zu einem Palladiumgehalt von $1{,}7\ ^{+/-\ 0{,}4}$ g pro Katalysator.

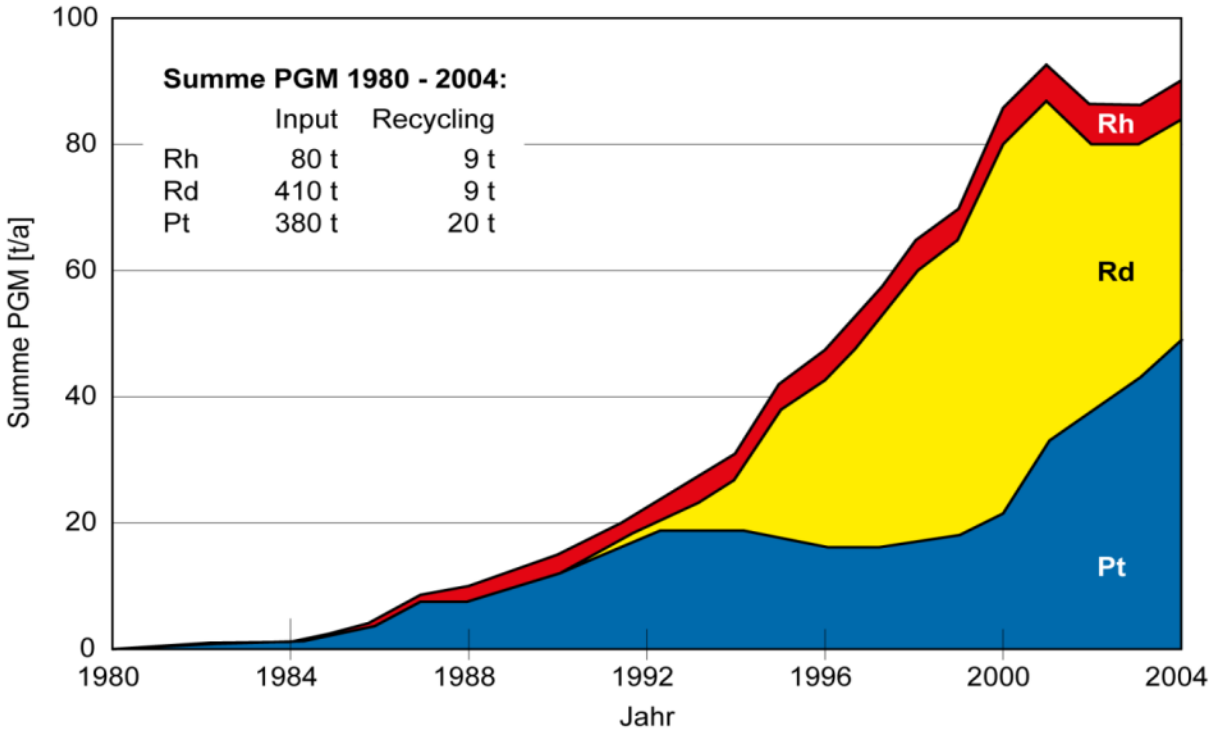

Abbildung 19 Bruttobedarf an Platin, Palladium und Rhodium für Autokatalysatoren in Europa (Abbildung aus Hagelüken 2005)

Mag. Michael Schiller von der Wirtschaftskammer Wien gab folgende österreichische Unternehmen als Katalysatorenerzeuger an, die die ARGE Automotive Zulieferindustrie bekannt gegeben hätte:

- Remus
- Frauenthal Automotive / Ceram
- Roth-Technik Austria GesmbH

Weiters wurde auch bei folgenden 2 Firmen angefragt:

- Dürer GesmbH (Kfz-Werkstätte mit Auspuffvertrieb)
- Tunefact (Importeur für Abgassysteme, … und Spezialist für Katalysatoren)

Auch auf wiederholte Anfrage antwortete nur Herr Rudolf Jöbstl von der Firma Ceram und gab an, dass Ceram kein Palladium verwende und dass sie der einzige DeNox-Katalysator-Hersteller in Österreich seien.

Der Großteil der Neu-Kraftfahrzeuge wird nach Österreich importiert, es werden aber auch einige wenige Autotypen in Österreich zusammengebaut. 2011 wurden in Österreich 4 Pkw-Typen produziert:

- KTM X-Bow
- Peugeot 308 RC Z
- Aston Martin
- Mini R60

Die gesamte österreichische Pkw-Produktion belief sich im Jahr 2011 auf 130.411 Stück, von denen im selben Jahr 129.661 Stück exportiert wurden. Von den 750 in Österreich verbliebenen Pkw wurden 2011 108 Pkw angemeldet.

Bei der Statistik Austria finden sich online in der Rubrik Energie, Umwelt, Innovation, Mobilität – Verkehr – Straße zahlreiche Daten zu Kraftfahrzeugen aus den Jahren 2007 – 2011. Hier besonders relevant sind die Statistiken zum Kfz-Bestand und den Kfz-Neu- und Gebrauchtzulassungen.

	Pkw-Bestand 2010	Pkw-Neu-zulassungen 2011	Pkw-Gebraucht-zulassungen 2011	Pkw-Bestand 2011	Pkw-Abmeldungen 2011 (errechnet)
Benzin	1.988.079	159.027	357.008	1.997.066	507.048
Diesel	2.445.506	194.721	443.935	2.506.511	577.651
Benzin/Flüssiggas	87	12	47	125	21
Benzin/Erdgas	897	182	172	1.098	153
Benzin/Elektro	4.792	1.306	957	6.056	999
Diesel/Elektro		4		4	0
Elektro+Flüssiggas+Erdgas	1.666	893	339	2.561	337
Summe	4.441.027	356.145	802.458	4.513.421	1.086.209

Tabelle 40 Daten zum Pkw-Bestand und den Pkw-Neu- und Gebrauchtzulassungen von Statistik Austria, Pkw-Abmeldungen wurden daraus berechnet.

Aus diesen (online verfügbaren) Daten der Statistik Austria lässt sich die Anzahl der Pkw-Abmeldungen 2011 wie folgt berechnen:

Pkw-Abmeldungen 2011 = Pkw-Bestand 2010 + Pkw-Neuzulassungen 2011 + Pkw-Gebrauchtzulassungen 2011 – Pkw-Bestand 2011

Mit Alt-Pkw-Abmeldungen werden hier die „endgültig" abgemeldeten Pkw bezeichnet. Es handelt sich also um Pkw, die danach nicht mehr in Österreich angemeldet wurden. Ihre Anzahl belief sich 2011 auf 283.751 und lässt sich wie folgt aus obigen Daten der Statistik Austria berechnen:

Alt-Pkw-Abmeldungen 2011 = Pkw-Abmeldungen 2011 – Pkw-Gebrauchtzulassungen 2011

	Alt-Pkw-Abmeldungen 2011 (errechnet)
Benzin	150.040
Diesel	133.716
Benzin/Flüssiggas	-26
Benzin/Erdgas	-19
Benzin/Elektro	42
Diesel/Elektro	0
Elektro+Flüssiggas+Erdgas	-2
Summe	283.751

Tabelle 41 Daten zu den „endgültigen" Pkw-Abmeldungen, berechnet aus Daten von Statistik Austria

Die negativen Zahlen, die in Tabelle 41 bei den Antriebsarten Benzin/Flüssiggas, Benzin/Erdgas und Elektro+Flüssiggas+Erdgas auftreten, könnten dadurch erklärbar sein, dass vielleicht Autobesitzer ihre Autos mit „konventionellen" Antrieben (Diesel oder Benzin) mit Umrüstsätzen auf Flüssig- oder Erdgas-betriebene Autos umbauen.

Weiters gibt es ein „Statistikjahrbuch des Fachverbandes der Fahrzeugindustrie Österreichs" (WKO 2012), in dem eine große Menge an Daten zur Verfügung gestellt wird, u.a. „Rahmendaten zur Fahrzeugindustrie" und zur „Struktur der österreichischen Fahrzeugindustrie". Der Fachverband der Fahrzeugindustrie ist ein Teil der Wirtschaftskammer Österreich (WKO) und beschreibt sich selbst als die gesetzliche Interessenvertretung jener Betriebe, die eine Gewerbeberechtigung aus dem Bereich der Fahrzeugindustrie besitzen.

Es wurde auch Kontakt zu den Abteilungen Kfz-Zulassungsstatistik (Frau Fischer) und Außenhandel (Frau Wessely) der Statistik Austria aufgenommen, was aber über die online zur Verfügung stehenden Daten hinaus keine weiteren hier verwertbaren Daten lieferte. Bei der Abteilung für Außenhandel ist es möglich, mit den entsprechenden Warennummern („KN8-Codes") kostenpflichtig Daten zu den einzelnen Fahrzeugkategorien abzufragen.

Auf Anfrage beim Fachverband der Fahrzeugindustrie Österreichs bei der WKO wurde ein Auszug aus der Außenhandelsstatistik über die Jahre 2008 – 2011 zur Verfügung gestellt, der die Import- und Exportzahlen von Personenkraftwagen einschließlich Kombi sowohl neu als auch gebraucht abbildet.

Personenkraftwagen einschl. Kombi [Stück] 8703 – Gliederung nach HS/KN-Positionen	Einfuhr 2011	Ausfuhr 2011
87031011 Schneespezialfahrzeuge(Motorschlitten) mit Kolbenverbrennmotor	383	286
87031018 Spezialfahrzeuge zur Personenbeförderung mit anderem Motor	2.016	300
87032110 Pkw m. Hubkolbenverbrennungsmotor, neu, ≤ 1000 cm^3, Rennwagen	9.874	628
87032210 Pkw mit Hubkolbenverbrennungsmotor, neu, > 1000 – 1500 cm^3	114.036	10.833
87032311 Wohnmobile mit Hubkolbenverbrennungsm., neu, > 1500 – 3000 cm^3	19	5
87032319 Pkw mit Hubkolbenverbrennungsmotor, neu, > 1500 – 3000 cm^3	59.122	79.571
87032410 Pkw mit Hubkolbenverbrennungsmotor, neu, > 3000 cm^3	2.516	5.893
87033110 Pkw mit Verbrennungsmotor mit Selbstzündung, neu, ≤ 1500 cm^3	24.279	3.049
87033211 Wohnmobile m. Verbrennungsm. m. Selbstz., neu, > 1500 – 2500 cm^3	439	17
87033219 Pkw mit Verbrennungsmotor mit Selbstz., neu, > 1500 – 2500 cm^3	177.999	53.821
87033311 Wohnmobile mit Verbrennungsmotor mit Selbstz., neu, > 2500 cm^3	187	18
87033319 Pkw mit Kolbenverbrennungsmot. mit Selbstzünd., neu, > 2500 cm^3	17.649	8.714
Summe	408.651	163.135

Tabelle 42 Daten zum österreichischen Import und Export von neuen Pkw im Jahr 2011 vom Fachverband der Fahrzeugindustrie Österreichs der WKO aus deren Außenhandelsdatenbank

Die Summe der laut Tabelle 42 2011 importierten Neufahrzeuge (408.651 Pkw) unterscheidet sich nur geringfügig von der Anzahl der 2011 importierten „Pkw inkl. Fahrgestelle und Karosserien für die industrielle Pkw-Montage“ (408.215 Pkw) – ebenfalls vom Fachverband der Fahrzeugindustrie (WKO 2012), als Quelle wird hier „Der Außenhandel Österreichs“ von der Statistik Austria angegeben – die Differenz beträgt lediglich 436 Pkw. In dieser Stoffflussanalyse wird der Wert 407.901 im Jahr 2011 nach Österreich importierten Pkw verwendet. – Er entstammt ebenfalls dem Fachverband der Fahrzeugindustrie (WKO 2012) und versteht sich abzüglich der Fahrgestelle und Karosserien für die industrielle Pkw-Montage.

Die Summe der laut Tabelle 42 2011 exportierten Pkw beinhaltet mit 163.135 Pkw die 129.661 in Österreich produzierten und exportierten Pkw. Zieht man diese 129.661 Pkw ab, kommt man auf 33.474 Pkw, die zwar nicht in Österreich zusammengebaut, aber trotzdem neu exportiert werden. Wer diese neuen Pkw importiert und sie als neue Pkw wieder exportiert, darüber konnten die Befragten weder beim Fachverband der Fahrzeugindustrie der WKO noch bei der Statistik Austria Auskunft geben.

Vergleicht man nun eingangsseitig die neu importierten (407.901) und die in Österreich produzierten und nicht exportierten Pkw (750) ausgangsseitig mit den neu exportierten (163.135) und neu zugelassenen Autos (356.145), so ergibt sich daraus für das Jahr 2011 ein Lagerzuwachs an neuen Pkw von 19.032, die in Österreich gelagert, aber (noch) nicht angemeldet sind. Dieser Zuwachs im Lager der neuen Pkw ist schwer erklärbar, da es nach dieser Art der Berechnung auch im Jahr 2010 in ähnlicher Größenordnung gegeben hätte (~ 30.000 Pkw).

Neue Pkw				
Importe	Produktion	Direktexporte	Exporte gesamt	Neuzulassungen
407.901	130.411	129.661	163.135	356.145

Tabelle 43 Bestand an Pkw Kl. M1 nach Antriebsart (in Stück) (Quelle: WKO 2012, Statistik Austria 2012)

Tabelle 43 zeigt die Im- und Exportdaten für gebrauchte Pkw ebenfalls vom Fachverband der Fahrzeugindustrie der WKO.

Personenkraftwagen einschl. Kombi [Stück] **8703 – Gliederung nach HS/KN-Positionen**	**Einfuhr 2011**	**Ausfuhr 2011**
87032190 Pkw mit Hubkolbenverbrennungsmotor, gebr. ≤ 1000 cm^3,Rennwagen	205	802
87032290 Pkw mit Hubkolbenverbrennungsmotor, gebraucht, >1000 – 1500 cm^3	1.192	5.254
87032390 Pkw mit Hubkolbenverbrennungsmot., gebraucht, > 1500 – 3000 cm^3	342	5.924
87032490 Pkw mit Hubkolbenverbrennungsmotor, gebraucht, > 3000 cm^3	623	767
87033190 Pkw mit Verbrennungsmotor mit Selbstzünd., gebraucht, ≤ 1500 cm^3	590	1.089
87033290 Pkw mit Verbrennungsmot. mit Selbstz., gebraucht, > 1500 – 2500 cm^3	11.872	17.138
87033390 Pkw mit Kolbenverbrennungsmot. mit Selbstz., gebraucht, > 2500 cm^3	1.964	2.211
Summe	16.788	33.185

Tabelle 44 Daten zum österreichischen Import und Export von gebrauchten Pkw im Jahr 2011 vom Fachverband der Fahrzeugindustrie Österreichs der WKO aus deren Außenhandelsdatenbank

Die Summe der nach Tabelle 44 2011 exportierten Autos (33.185) stimmt beinahe mit dem ebenfalls vom Fachverband der Fahrzeugindustrie der WKO in deren Statistikjahrbuch (WKO 2012) publizierten Wert (33.267) überein (Differenz = 82 Pkw). Die importierten Pkw werden im Statistikjahrbuch mit 20.020 als vorläufiger Wert angegeben, laut Außenhandelsdatenbank desselben Fachverbandes für Fahrzeugindustrie belaufen sie sich allerdings auf 16.788, das sind 3.232 gebrauchte Pkw weniger im Import. Welche Zahl von beiden eher der Wahrheit entspricht, kann hier nicht entschieden werden. Es wird der offiziell auf der Homepage des Fachverbandes der Fahrzeugindustrie in deren Statistikjahrbuch publizierte Wert – 20.020 gebrauchte importierte Pkw – verwendet.

Im Bundesabfallwirtschaftsplan (BAWP) 2011 (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft 2011) sind Altfahrzeuge folgendermaßen definiert:

Altfahrzeuge im Sinne der Altfahrzeugeverordnung sind gebrauchte Fahrzeuge (Personenkraftwagen, Fahrzeuge zur Güterbeförderung mit einem zulässigen Gesamtgewicht von nicht mehr als 3,5 t sowie dreirädrige Kraftfahrzeuge mit Ausnahme von Krafträdern), die im Sinne von § 2 Abs. 1 AWG 2002 als Abfall gelten, d.h. dass sich deren der Besitzer entledigen will oder entledigt hat oder dass deren Entsorgung als Abfall erforderlich ist, um die öffentlichen Interessen nicht zu beeinträchtigen. Entspricht ein Fahrzeug nicht mehr den Erfordernissen der Verkehrs- oder Betriebssicherheit, so kann dies als ein Indiz gesehen werden, dass ein Altfahrzeug vorliegt.

In der Literatur gehen Saurat und Bringezu (2009) davon aus, dass etwa 30 % der Platingruppenmetalle in den End-of-life-Kfz-Katalysatoren zurückgewonnen werden. Der Hauptgrund für diese niedrige Recyclingquote ist der Export von End-of-Life-Fahrzeugen ins nicht-europäische Ausland. Vom Leiter eines österreichischen Shredderunternehmens wurde die Exportrate von in Österreich nicht mehr zugelassenen Autos („Altfahrzeugen“) ebenfalls auf 75 % geschätzt. Hier geht es v.a. um Fahrzeuge, die die §57a-Begutachtung nicht mehr bestehen und somit als Fahrzeuge in Österreich nicht mehr zugelassen sind. Diese Definition findet sich auch in der Altfahrzeugeverordnung bzw. dem Österreichischen Bundesabfallwirtschaftsplan 2011 (siehe oben).
Herr Ing. Walter Kletzmayr, einer der beiden Geschäftsführer der ARGE-Shredder GmbH in Lambach (OÖ) gab als Experte auf dem Gebiet der Altfahrzeuge Auskünfte auf der Grundlage von altauto.at, einer Internet-Plattform zur zentralen Erfassung und Verwaltung von Daten aus der Übernahme, Behandlung und Verwertung von Altfahrzeugen. Auf dieser Plattform geben die einzelnen Shredder-Unternehmen selbst ihre Daten ein.
Ing. Walter Kletzmayr veröffentlichte im VDI-Vortrag „Aktuelle Situation der SLF- und Altfahrzeugverwertung in Österreich“ im Juni 2012 folgende Daten:

Pkw-Bestand Ende 2010	**Neuwagen 2011**	**Gebrauchtwagen 2011**	**Verschrottung/Export 2011**	**Pkw-Bestand Ende 2011**
4.441.000	356.000	802.500	284.000	4.513.000 = Pkw-Bestand Ende 2010 + 72.000

Tabelle 45 „Das Autojahr 2011 in Österreich“ aus dem VDI-Vortrag „Aktuelle Situation der SLF- und Altfahrzeugverwertung in Österreich“ von Ing. Walter Kletzmayr im Juni 2012

Die Zahlen in Tabelle 45 stammen von der zentralen Zulassungsstelle, Statistik Austria, WKO (Fahrzeughandel) und eigenen Berechnungen der Importeure. Die Zahl von 284.000 verschrotteten/exportierten Kfz ist bereits von den diversen Tagesanmeldungen etc. bereinigt, denn die Berechnung dafür lautet: Das Kfz ist älter als 10 Jahre, wurde in Österreich abgemeldet und länger als 6 Monate nicht mehr angemeldet.
Die Daten aus Tabelle 45 decken sich mit den Zahlen von der Statistik Austria und den daraus selbst errechneten in Tabelle 40.
Die Anzahl der Altfahrzeuge, die 2011 zurückgenommen und in altauto.at erfasst wurden, gibt Ing. Kletzmayr mit 80.004 an – davon wurden 145 in Deutschland beim Shredderbetrieb Thyssen/Dück verwertet. Ing. Kletzmayr schätzt, dass jährlich max. 300 Altfahrzeuge (legitim) ins Ausland verbracht werden, um z.B. in einem anderen Land geshreddert zu werden. Diese Anzahl dieser (legitim) exportierten und im Ausland verwerteten Altfahrzeuge käme zu den 80.004 dazu, so erhält man etwa 80.300 Altfahrzeuge, die in Österreich 2011 als solche angefallen sind und einer Verwertung im In- oder Ausland zugeführt worden sind.

Frau Mag.[a] Pia Kleihs von ÖCAR Automobilrecycling GmbH gibt an, dass im Jahr 2011 österreichweit 79.944 Altfahrzeuge zurückgenommen wurden, was sich mit der Zahl von Ing. Kletzmayr (80.003 Altfahrzeuge) in etwa deckt.

Andere Ergebnisse liefern hier die Auskünfte des Lebensministeriums, die Ihre Daten aus dem Elektronischen Datenmanagement EDM beziehen: „Für das Berichtsjahr 2011 wurden im EDM 31.737 übernommene Altfahrzeuge im Wege einer Erstübernehmer-Übernahmemeldung [2] eingebracht. Dazu kommen noch 9.924 Altfahrzeuge, die von den Herstellern/Importeuren über ihre Rücknahmestellen übernommen wurden und 268 Altfahrzeuge, die im Wege der Anfallstellenmeldung[3] im EDM gemeldet wurden."

In Summe ergeben sich hieraus lediglich 41.929 im EDM 2011 registrierte Altfahrzeuge. Es wurde hier also nur gut die Hälfte der Altfahrzeuge, die von der ARGE-Shredder und ÖCAR registriert wurden, erfasst.

In den 80.004 in altauto.at erfassten Altfahrzeugen waren 471.856 kg Katalysatoren verbaut, die stofflich verwertet wurden. Das Durchschnittsalter der 2011 verwerteten Altfahrzeuge lag bei 17,4 Jahren. Laut Ing. Kletzmayr werden derartige Altersauswertungen seit 1992 gemacht, wobei das Durchschnittsalter der verwerteten Altfahrzeuge nie unter 16 Jahren lag. Einerseits lässt sich daraus ableiten, dass der Fuhrpark Österreichs als „überaltert" bezeichnet werden kann (in Österreich hieß die staatliche finanzielle Entschädigung für das Verschrotten eines Kraftfahrzeugs 2009 „Ökoprämie", in anderen Ländern war das die „Verschrottungsprämie"), andererseits ist das natürlich auch eine Folge des „Altfahrzeug-Schwundes", auf den im Folgenden näher eingegangen werden wird.

Dazu kommen Katalysatoren, die beim Einbringen in die Verwertungskette gefehlt haben. Diese „bei Übernahme fehlenden Bauteile" werden erfasst und müssen in Summe in Abzug gebracht werden, weil eine Verwertung nicht dokumentiert wurde – aber mit hoher Wahrscheinlichkeit stattgefunden hat, sonst hätte man den Katalysator nicht ausgebaut. Es ist daher laut Ing. Kletzmayr davon auszugehen, dass weitere 91.770 kg Katalysatoren verwertet wurden. Diese Zahl ergibt sich aus einer Stückzahl von 13.110 multipliziert mit dem durchschnittlichen Katalysatorgewicht von 7 kg. Insgesamt erhält man so also rund 563.626 kg Katalysatoren, was einer Stückzahl von etwa 80.518 Katalysatoren (mit einem durchschnittlichen Gewicht von 7 kg) entspricht. Dazu kommen noch die von Ing. Kletzmayr geschätzten max. 300 Altfahrzeuge, die jährlich (legitim) ins Ausland verbracht werden, um dort einer stofflichen Verwertung zugeführt zu werden. Nimmt man an, dass drei Viertel dieser Fahrzeuge Benzin-, ein Viertel Dieselfahrzeuge (die v.a. im Fall von älteren Baujahren i.A. nicht mit einem Katalysator ausgerüstet waren), kann man von ca. 225 Katalysatoren

---

2 Erstübernehmer-Übernahmemeldung: Der Erste in der Verwertungskette, der ein Fahrzeug von einem Letzthalter übernimmt, ist der sogenannte Erstübernehmer- beispielsweise wenn ein Schrotthändler ein Unfallfahrzeug übernimmt. Jeder Erstübernehmer hat u.a. die Verpflichtung gemäß Altfahrzeugeverordnung, alle von ihm übernommenen Fahrzeuge zu melden.

3 Anfallstellenmeldung: Nicht übernommene, sondern angefallene Altfahrzeuge werden in der Anfallstellenmeldung gemeldet. Meist handelt es sich hierbei um Gebrauchtwagen, die nicht mehr verkauft werden können und bei einem Gebrauchtwagenhändler solcherart zu Altfahrzeugen geworden sind, dort also als Altfahrzeuge „anfallen".

ausgehen. So ergeben sich insgesamt ca. 80.743 Katalysatoren, die (in Österreich oder im Ausland) offiziell und legal verwertet werden. Die Annahme, dass drei Viertel der Altfahrzeuge mit Benzin betrieben wurden, wird im Folgenden noch erläutert werden.

Stellt man nun diese rund 80.750 verwerteten Altfahrzeuge (hier sind die rund 225 Benzin-Altfahrzeuge, die pro Jahr im Ausland verwertet werden, mitgerechnet) den 284.000 verschrotteten/exportierten Pkw gegenüber, fehlen hier rund 203.000 Stück. Diese in Österreich fehlenden Altfahrzeuge werden zum Großteil ins Ausland exportiert, werden dort allerdings nicht einer gezielten Verwertung zugeführt, sondern anderweitig weiterverwendet. Sie werden aus österreichischer Sicht auch als „Altfahrzeug-Schwund“ bezeichnet.

Was bei der Betrachtung der ARGE Shredder allerdings nicht mit einbezogen wurde, sind folgende Zahlen der Statistik Austria zum Import und Export gebrauchter Fahrzeuge.

Gebrauchte Pkw [Stück]	
Fahrzeugimporte	Fahrzeugexporte
20.020	33.267

Tabelle 46 Bestand an Pkw Kl. M1 nach Antriebsart (in Stück) (Quelle: WKO 2012, Statistik Austria 2012)

Da 20.020 gebrauchte Pkw importiert und 33.267 gebrauchte Pkw exportiert wurden, ergibt sich daraus eine Differenz von 13.247 gebrauchten Pkw. Von den 203.000 „fehlenden“ Pkw können also noch rund 13.000 abgezogen werden, die offiziell exportiert worden sind, woraus sich ein sogenannter „Altfahrzeug-Schwund“ von rund 190.000 Pkw-Altfahrzeugen ergibt.

Nun muss noch die Aufteilung der Altfahrzeuge in Benzin- und Dieselfahrzeuge genauer betrachtet werden. Wie bereits im Vorhergehenden näher ausgeführt, besteht in Österreich seit 01.01.1988 für alle neuen Kraftfahrzeuge mit Benzinmotor Katalysatorpflicht. Seit 01.01.1995 werden Kraftfahrzeuge ohne Katalysator mit einer höheren Kfz-Steuer belegt. Allerdings beziehen sich diese Regelungen ausschließlich auf Kraftfahrzeuge mit Benzinmotor. Laut ÖAMTC waren Ende 2011 95 % aller in Österreich zugelassenen Benzinfahrzeuge mit einem Katalysator ausgestattet. Für Dieselkraftfahrzeuge schreibt der Gesetzgeber bislang keine Katalysatoren vor. Allerdings sind auch von Diesel-Kfz die Emissionsgrenzwerte nach den jeweils gültigen Euro-Abgasnormen (aktuell ist die Euro 5 in Kraft [gilt für Erstzulassungen ab 01.01.2011]) zu erfüllen, was dazu führt, dass neue Diesel-Kfz zur Einhaltung dieser Werte einen (Oxidations-)Katalysator benötigen. Nach Angaben von Frau Mag.[a] Eva-Maria Steinbacher vom Verkehrsclub Österreich (VCÖ) war bis Jahresende 2011 in Österreich nur jeder 3. Diesel-Pkw serienmäßig mit einem Partikelfilter ausgerüstet. Da es sich bei den 2011 in Shreddern verwerteten Alt-Pkw aber um Fahrzeuge mit einem Durchschnittsalter von 17,4 Jahren handelte (Angaben der ARGE Shredder, siehe weiter oben), muss davon ausgegangen werden, dass die Benzinfahrzeuge, die endgültig aus dem Verkehr gezogen wurden, einen Katalysator eingebaut hatten, Dieselfahrzeuge allerdings mit nichts Vergleichbarem ausgestattet waren. Nun muss die Zusammensetzung Benzin-/Dieselfahrzeuge in der Menge der rund 190.000 Altfahrzeuge, die im Vorhergehenden als „Altfahrzeug-Schwund“ bezeichnet wurden, abgeschätzt werden.

Fahrzeuge, die das Durchschnittsalter von 17,4 Jahren haben, stammen aus dem Jahr 1995. In diesem Jahr war die Aufteilung 2.766.911 Benziner zu 826.540 Diesel-Pkw, was einem Verhältnis von 3,35 : 1 entspricht (siehe Tabelle 47). Nimmt man nun an, dass drei Viertel der Altfahrzeuge Benzin-betrieben sind, und weiter, dass alle diese Benzin-betriebenen Pkw einen Katalysator eingebaut haben bzw. hatten, erhält man aus den rund 190.000 Altfahrzeugen, die als „Fahrzeug-Schwund“ bezeichnet wurden, ca. 142.500 Katalysatoren.

Pkw [Stück]					
Jahr	**insgesamt**	**Benzin**	**Diesel**	**Elektro**	**sonstiger Antrieb**
1980	2.246.950	2.168.410	78.524	16	-
1981	2.312.932	2.228.657	84.254	21	-
1982	2.361.071	2.269.275	91.782	14	-
1983	2.414.466	2.315.278	99.173	15	-
1984	2.468.452	2.358.081	110.356	15	-
1985	2.530.800	2.390.589	140.193	18	-
1986	2.609.390	2.431.553	177.819	18	-
1987	2.684.780	2.458.214	226.548	18	-
1988	2.784.792	2.499.459	285.313	20	-
1989	2.902.949	2.554.117	348.809	23	-
1990	2.991.284	2.582.521	408.733	30	-
1991	3.100.014	2.640.826	459.133	55	-
1992	3.244.920	2.708.806	536.026	88	-
1993	3.367.626	2.749.383	618.122	121	-
1994	3.479.595	2.762.004	717.460	131	-
1995	3.593.588	2.766.911	826.540	137	-
1996	3.690.692	2.733.246	957.297	149	-
1997	3.782.544	2.702.515	1.079.866	163	-
1998	3.887.174	2.680.035	1.206.970	169	-
1999	4.009.604	2.658.276	1.351.162	166	-
200	4.097.145	2.597.888	1.499.101	156	-
2001	4.182.027	2.544.585	1.637.289	153	-
2002	3.987.093	2.243.847	1.743.098	148	-
2003	4.054.308	2.168.945	1.885.228	135	-
2004	4.109.129	2.087.180	2.021.821	128	-
2005	4.156.743	2.028.873	2.127.533	127	210
2006	4.204.969	1.983.337	2.220.804	127	701
2007	4.245.583	1.960.380	2.283.302	131	1.770
2008	4.284.919	1.957.751	2.323.016	146	4.006
2009	4.359.944	1.972.352	2.381.906	223	5.463
2010	4.441.027	1.988.079	2.445.506	353	7.089
2011	4.513.421	1.997.066	2.506.511	989	8.855

Tabelle 47 Bestand an Pkw Kl. M1 nach Antriebsart (in Stück) (Quelle: WKO 2012, Statistik Austria 2012)

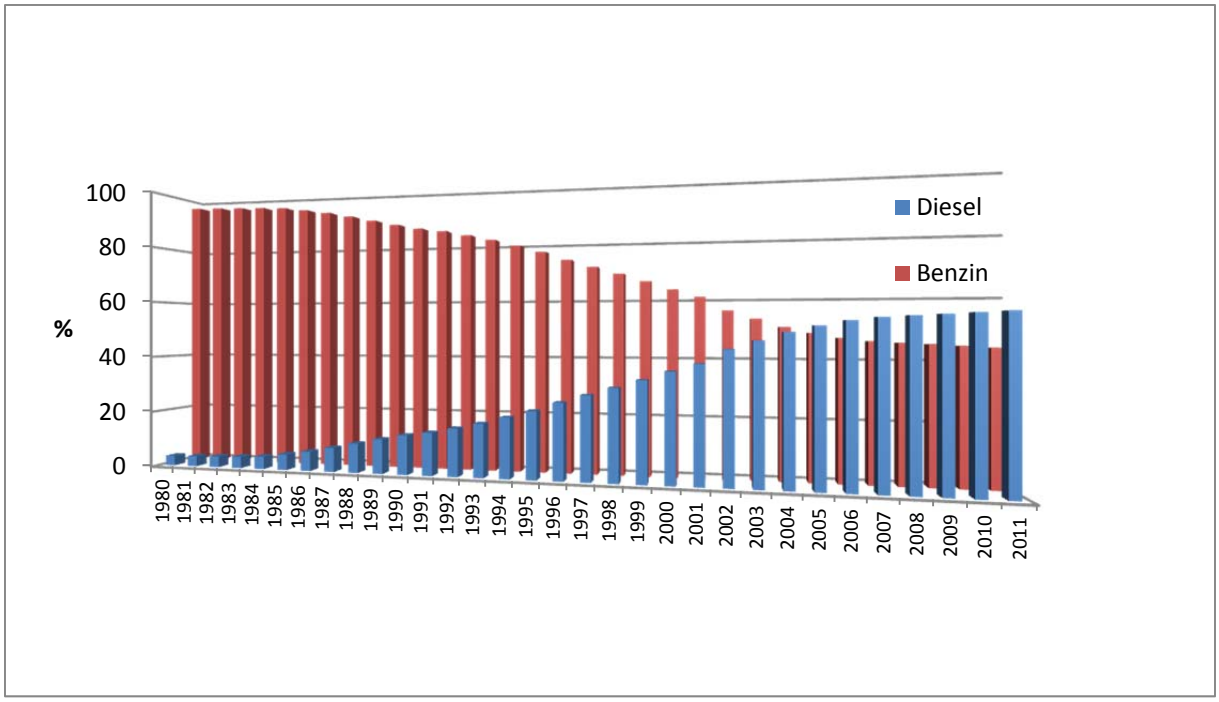

Abbildung 20 Bestand an Pkw Kl. M1 in den Jahren 1980 – 2011 nach Antriebsart (Anteile in %) (Quelle: WKO 2012)

Vergleicht man eingangsseitig die neu importierten (407.901) und die in Österreich produzierten und nicht exportierten Pkw (750) ausgangsseitig mit den neu exportierten (163.135) und neu zugelassenen Autos (356.145), so ergibt sich daraus für das Jahr 2011 ein Lagerzuwachs an neuen Pkw von 19.032.

Zusammenfassend fanden sich 2011 rund 80.750 verwertete Katalysatoren. Ca. 142.500 Katalysatoren befanden sich zwar in Pkw, die 2011 abgemeldet und nicht mehr angemeldet wurden, die allerdings keiner Verwertung (im In- oder Ausland) zugeführt wurden. Es ist anzunehmen, dass sich ein kleiner Teil davon im Lager von Privaten befindet, der Großteil wurde wahrscheinlich exportiert. Weiters gab es 2011 noch ca. 19.032 Pkw-Neufahrzeuge (von denen 750 in Österreich produziert wurden), bei denen es aber noch zu keiner Neuanmeldung kam.

Kfz-Katalysatoren		Palladium [kg]
Autos neu (Import)	Input-Fluss	680 $^{+/- 170}$
Autos gebraucht (Import)	Input-Fluss	20 $^{+/- 4,2}$
Autos aus Ö neu	Input-Fluss von I&G	1,3 $^{+/- 0,31}$
Autos neu zugelassen	Fluss innerhalb PHH	580 $^{+/- 140}$
Autos neu (Export)	Output-Fluss	56 $^{+/- 14}$
Alt-Autos (Shredder)	Output -Fluss zur AWS	130 $^{+/- 34}$
Autos gebraucht (Export)	Output -Fluss	28 $^{+/- 6,9}$
Alt-Autos Export	Output -Fluss	180 $^{+/- 45}$
Autos	Lager	+ 45 $^{+/- 220}$
Autos angemeldet	Lager	3700 + 260 $^{+/-150}$

Tabelle 48 Quantifizierte Flüsse und Lager der Kfz-Katalysatoren im Prozess Private Haushalte im System Palladium in Österreich (2011)

5.1.2 Elektronik und Elektrotechnik

Die wichtigste Anwendung von Palladium im Elektronikbereich sind Vielschichtkondensatoren (MLCC = Multi-Layer Ceramic Capacitor). Mit einer Jahresproduktion von 1.000 Milliarden Stück sind sie die am häufigsten eingesetzten diskreten Kondensatoren in der Elektronik. Sie werden in großer Stückzahl als Entkopplungselemente in Halbleiterbauelementen eingesetzt und sind laut Abschlussbericht des Projektes MaRess (Bringezu et al. 2011) auf praktisch allen Leiterplatten in unterschiedlicher Anzahl zu finden. – Je komplexer das Gerät, desto höher die Zahl der benötigten MLCCs. Sie dienen der Speicherung von elektrischer Ladung und werden u.a. zur Aufrechterhaltung eines gleichmäßigen Stromes in integrierten Schaltkreisen verwendet.

Keramikkondensatoren werden aus feingemahlenen Granulaten paraelektrischer (z.B. TiO_2) oder ferroelektrischer (z.B. $BaTiO_3$) Pulvergemische hergestellt, die zur Keramik der kapazitiven Zelle gesintert werden. Sie bildet das Dielektrikum des Kondensators und dient als Träger der Elektroden.

Die minimale Schichtdicke des Dielektrikums bewegt sich in der Größenordnung von 1 µm und wird durch die Korngröße des keramischen Stoffes nach unten begrenzt. Auf den Keramikträger werden die Elektroden des Kondensators aufmetallisiert. Keramik-Vielschichtkondensatoren bestehen aus einer Vielzahl von einseitig metallisierten Keramikkondensatoren, die übereinander gestapelt und über Anschlussflächen gemeinsam in Parallelschaltung kontaktiert werden.

Bis Ende der 1990er Jahre wurden wegen der hohen Sintertemperaturen von 1.200 – 1.400 °C ausschließlich die nicht-oxidierbaren Edelmetalle Silber und Palladium zur Metallisierung der Elektroden und Anschlussflächen verwendet. Im Endbericht des Projektes MaRess (Kristof, Hennicke et al. 2010) werden als typische Zusammensetzung von AgPd-Elektroden in MLCC-Kondensatoren 70:30 bzw. 95:5 (Stephenson et al. 2004) angegeben, sie wiegen zwischen 0,00017 g und 0,45 g (ZVEI 2003). Da diese NME-Metallisierung (noble metal electrode = Edelmetall-Elektrode) in starkem Maße den Endpreis der MLCCs beeinflusst, wurde sie zum Teil von der BME-Metallisierung (base metal

electrode), die v.a. Nickel und in geringerem Maße auch Kupfer enthält, ersetzt. Da aber Edelmetall-Elektroden über besondere Eigenschaften verfügen – sie sind z.B. nicht-magnetisch und verfügen über ein besseres Impedanzverhalten – werden sie vor allem in hochwertigen Produkten auch weiterhin eingesetzt. Bei Klasse-1-Kondensatoren (Kondensatoren mit definiertem Temperaturkoeffizienten, die in elektrischen Schaltkreisen mit hohen Anforderungen an die Frequenzgenauigkeit eingesetzt werden) wird nach wie vor die NME-Metallisierung verwendet, da hier die Konstanz der elektrischen Werte entscheidend ist und dies nur durch die Verwendung von Palladium gewährleistet wird.
Obwohl MLCCs immer kleiner werden, wird dieser Effekt durch den steigenden Einsatz in elektronischen Anwendungen überkompensiert (Bringezu et al. 2011), die Palladium-Einsatzmenge steigt dadurch insgesamt auch weiter an.
Verwendung finden MLCCs z.B. in Handys mit eingebautem Fotoapparat und Vielkern-Prozessoren in PCs. Auch in Fernseh- und Computerbildschirmen sowie Laptops findet Palladium auf den Leiterplatten der Steuerungselektronik Verwendung (Bringezu et al. 2011).

In die Kategorie Elektronik und Elektrotechnik fallen in der vorliegenden SFA für Palladium folgende Produkte bzw. Produktgruppen:

- Mobiltelefone
- Notebooks
- PC-Flatscreens
- LCD-TV-Flatscreens
- Elektroaltgeräte

Nach Angerer et al. (2009) ist die Nutzung von Palladium in der Elektronik seit 2000 als Folge der Miniaturisierung und der Substitution durch Nickel in MLCC-Kondensatoren stark rückläufig (Roskill 2005b). Im Endbericht zum Projekt MaRess (Kristof, Hennicke et al. 2010) wird dieser Sachverhalt anders dargestellt: Obwohl MLCCs immer kleiner werden, wird dieser Effekt durch den steigenden Einsatz in elektronischen Anwendungen überkompensiert. Dafür spricht, dass die Palladium-Einsatzmenge insgesamt auch weiter ansteigt.
Im Endbericht des Projektes MaRess (Kristof, Hennicke et al. 2010) werden als typische Zusammensetzung von AgPd-Elektroden in MLCC-Kondensatoren 70:30 bzw. 95:5 angegeben, sie wiegen zwischen 0,00017 g und 0,45 g.

5.1.2.1 Mobiltelefone

Allgemeines über Mobiltelefone, die Stoffflüsse in Österreich und die durchschnittliche Lebensdauer finden sich im Kapitel 3.3.2.2 Mobiltelefone bzw. Smartphones.
Im Endbericht zum Projekt Maress (Kristof, Hennicke et al. 2010) findet sich folgende Übersicht zu Literaturangaben zum Gehalt von Palladium in Mobilfunktelefonen:

- 0,12 g/kg (Huisman 2004)
- 0,13 g/kg (Sullivan 2006)
- 0,11 g/kg (Hagelüken/Buchert 2008)
- 0,06 g/kg (Chancerel et al. 2009)

Buchert et al. (Öko-Institut 2012) publizieren folgende Palladiumgehalte pro Gerät (Buchert et al. 2012):

- Mobiltelefon: 9 mg
- Smartphone: 11 mg

Es wurde hier das Ergebnis für ein 90 g schweres Mobiltelefon (ohne Akku), das auf Basis von Analysen von Umicore erhalten wurde, auf ein durchschnittliches Smartphone mit 110 g (ebenfalls ohne Akku) extrapoliert. Da die Werte im Maress-Endbericht (Kristof, Hennicke et al. 2010) als Konzentrationen angegeben sind, werden im Folgenden die Zahlen vom Öko-Institut als Durchschnittswert (10 mg pro Gerät) weiter verwendet.

Die Flüsse ungenutzte Handys und Althandys sowie das Nutzlager Handys und das Lager Althandys werden im Kapitel 3.3.2.2 Mobiltelefone bzw. Smartphones genauer beschrieben und zahlenmäßig hergeleitet.
Da 91 % der Österreicher ein Mobiltelefon besitzen, ergibt das – bei 8,4209 Millionen Einwohnern – eine Stückzahl von 7,924 Millionen $^{+/- 1,981 \text{ Mio.}}$ in den österreichischen Haushalten, was in der SFA dem „Nutzlager“ entspricht (siehe dazu auch Kapitel 3.3.2.2). Neu hinzu kamen 2011 3,3 Millionen $^{+/- 825.000}$ in Österreich verkaufte Mobiltelefone als Input-Fluss ins Nutzlager. Analog zu Kapitel 3.3.2.2 wird die Zahl der ungenutzten Mobiltelefone im „Lager Althandys“ auf 8,540 Millionen $^{+/- 2,135 \text{ Mio.}}$ geschätzt. Der Output-Fluss ins ungenutzte Lager („ungenutzte Handys“) wird über die mittlere Lebensdauer von $2^{+/-0,25}$ Jahren anhand des Anfallpotentials wie in Kapitel 3.3.2.2 beschrieben auf 426.993 $^{+/- 106.748}$ Mobiltelefone geschätzt. Als Althandys wird hier der Output-Fluss vom ungenutzten Lager zur Abfallwirtschaft bezeichnet. Anhand von Daten aus Deutschland (siehe auch Kapitel 3.3.2.2) beläuft sich dieser auf 5 %, was für Österreich 427.000 $^{+/- 107.000}$ Mobiltelefone ergäbe. Da 2011 durch die Ö3-Wundertüte 467.000 alte Handys gesammelt wurden (ein kleiner Teil des Erlöses der Ö3-Wundertüte kommt Soforthilfefonds von Licht ins Dunkel zugute), wird diese Zahl hier – als Minimum aller entsorgten Mobiltelefone – als Output-Fluss zur Abfallwirtschaft verwendet.

Mobiltelefone		Palladium [kg]
Mobiltelefone	Input-Fluss	33 $^{+/- 8,0}$
ungenutzte Handys	Fluss innerhalb PHH	4,3 $^{+/- 1,1}$
Althandys	Fluss innerhalb PHH	4,7 $^{+/-1,2}$
Elektroaltgeräte	Fluss zur AWS	14 $^{+/-1,8}$ davon 4,7 $^{+/-1,2}$ in Althandys
Nutzlager Handys	Lager	77 $^{+/- 19}$ + 29 $^{+/- 8,1}$
Lager Althandys	Lager	85 $^{+/- 21}$

Tabelle 49 Quantifizierte Flüsse und Lager der Mobiltelefone im Prozess Private Haushalte im System Palladium in Österreich (2011)

5.1.2.2 Notebooks

Allgemeines über Computer, die Stoffflüsse in Österreich und die durchschnittliche Lebensdauer finden sich im Kapitel 3.3.2.1 Festplatten (HDD).

Buchert et al. (2012) geben folgende Palladiumgehalte in Notebooks an (Quellen: Umicore und Chancerel 2009):

	Pd [mg/kg]	Pd [mg/Gerät]
Motherboard	80	25
Speicherkarten	180	4
kleine Leiterplatten	80	2
HDD	280	3
optisches Laufwerk	70	2
Display	99	4
gesamt	-	39

Tabelle 50 Palladium in Leiterplatten von Notebooks (Quelle: Buchert et al., Öko-Institut 2012)

Den Palladiumgehalt einer Festplatte einer Festplattenbaueinheit (HDD platter) geben Buchert et al. (Öko-Institut 2012) als äußerst gering mit < 0,1 mg pro Gerät an.

Wie schon im Kapitel 3.3.2.1 Festplatten (HDD) beschrieben, waren laut Statistik Austria (2011b) im Jahr 2011 78,1 % der österreichischen Haushalte im Besitz (mind.) eines Computers.

Im Endbericht des Projektes MaRess (Kristof, Hennicke et al. 2010) wird für den Bereich der privaten Anwender einerseits angegeben, dass Anfang 2008 35 % der privaten Haushalte in Deutschland mit einem Notebook, Lap- oder Palmtop ausgestattet waren, andererseits wird dort auch eine absolute Anzahl von 13,5 Mio. Notebooks (Quelle: Destatis) angeführt. Vergleicht man nun diese beiden Angaben heruntergebrochen auf Österreich, so kommt man im 1. Fall (mit 3.650.400 österreichischen Haushalten im Jahr 2011) auf ~ 1.280.000 Notebooks, im 2. Fall auf ~ 1.400.000, was einen Unterschied von ~ 110.000 Notebooks oder rund 8 % ausmacht. In Ermangelung neuerer Zahlen aus Österreich wird der Mittelwert dieser beiden Ergebnisse weiter verwendet. Da sich die

Zahlen aus dem MaRess-Endbericht (Kristof, Hennicke et al. 2010) nur auf privat genutzte Notebooks beziehen (Quelle: Cemix 2011), kann davon ausgegangen werden, dass der wahre Wert jedenfalls höher liegt als dieser. Weil mit den in der Software STAN verwendeten Standardabweichungen keine schiefen Verteilungen mit Abweichungen nur im positiven Bereich abgebildet werden können, wird dieser Wert hier mit dem Faktor 1,25 multipliziert, um zumindest einen Teil der gewerblich genutzten Notebooks einzubeziehen und um trotz des Datenunsicherheitsbereichs nicht unter den ursprünglichen Wert zu kommen.

Laut Buchert et al. (Öko-Institut 2012) wurden im Jahr 2010 7.097.000 Laptops für den privaten Sektor verkauft. Auch dieser Wert wird hier ver-1,25-facht – zur Erklärung zu diesem Vorgehen siehe oben.

Du und Graedel (2011b) geben die Lebensdauer eines Computers mit 10 Jahren an. Hausmann (2005) gibt für Computer Lebensdauern von 5 – 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 2. Hälfte der Laptops gibt es keine Daten. Es wird jedoch vermutet, dass es wie auch bei anderen elektronischen Geräten mehrere Möglichkeiten des Verbleibs gibt:

- Lagerung zu Hause
- Entsorgung mit dem Restmüll
- Verkauf ins Ausland (um dort weiter verwendet zu werden)

Die weitere Behandlung von Laptops nach erfolgreicher Sammlung wird im Kapitel 3.3.2.1

Notebooks		**Palladium [kg]**
Notebooks	Input-Fluss	18 $^{+/- 4,6}$
ungenutzte Notebooks	Fluss innerhalb PHH	6,0 $^{+/- 1,5}$
Altnotebooks	Fluss innerhalb PHH	3,0 $^{+/- 0,070}$
Elektroaltgeräte	Fluss zur AWS	14 $^{+/- 1,8}$ davon 3,0 $^{+/- 0,070}$ in Altnotebooks
Nutzlager Notebooks	Lager	33 $^{+/- 8,0}$ + 12 $^{+/- 4,8}$
Lager Altnotebooks	Lager	+ 3,0 $^{+/- 1,7}$

Tabelle 51 Quantifizierte Flüsse und Lager der Notebooks im Prozess Private Haushalte im System Palladium in Österreich (2011)

5.1.2.3 Flachbildschirme

Flachbildschirme enthalten eine oder mehrere Leiterplatten mit elektronischen Komponenten und Kontakte, die die Edelmetalle Gold, Silber und Palladium enthalten.

Große Flachbildschirme werden v.a. als Fernseher oder Computermonitore genutzt, andere Anwendungsgebiete wären digitale Displays, digitale Fotobilderrahmen, Tablet-PCs, E-Book-Reader, Handys, Smartphones usw… Aufgrund der Größe und dem demzufolge deutlich größeren Palladiumgehalt werden hier nur die Großgeräte Fernseher und PC-Monitore betrachtet.

Laut Buchert et al. (2012) werden als PC-Monitore im Allgemeinen LCD-Monitore (Liquid Crystal Display) verwendet, bei Fernsehgeräten kommt sowohl LCD als auch PDP (Plasma Display Panel) zur Anwendung. Laut MaRess (Kristof, Hennicke et al. 2010) dominieren die Verkaufszahlen von LCD-TV-Geräten stark über die von Plasma-TV-Geräten. – In Deutschland wurden 2009 10 Mal so viele LCD-Geräte wie Plasma-Geräte verkauft, der Absatz von LCD-Fernsehern hat sich in nur 4 Jahren (2005 – 2008) verfünffacht. Röhrenbildschirmgeräte (CRT = cathode ray tube) wurden – bis auf einige wenige Spezialgeräte – beinahe völlig vom Markt verdrängt und machten im Verkauf 2009 in Deutschland 150 Stück aus, was heruntergebrochen auf Österreich 15 verkauften Geräten entspräche.
Buchert et al. (Öko-Institut 2012) geben die Palladiumgehalte dieser Geräte mit folgenden Werten an:

- Leiterplatte eines LCD-Monitors: 99 mg/kg oder 40 mg pro Gerät
- Leiterplatte eines LCD-Fernsehers: 19 mg/kg oder 44 mg pro Gerät

Die Verkaufszahlen für LCD-Fernseher und LCD-PC-Monitore finden sich in Tabelle 52, wobei Buchert et al. die Verkaufszahlen wieder (wie schon bei Notebooks) jeweils nur für den privaten Sektor angeben (Quelle: Cemix 2011). Bei PC-Monitoren ist (wie bei Notebooks) davon auszugehen, dass die tatsächlichen Verkaufszahlen jedenfalls höher liegen, da sie auch im gewerblichen Bereich Anwendung finden. Es wurde hier analog zu den Notebooks (siehe Kapitel 5.1.2.2) vorgegangen und der Wert für den privaten Sektor mit dem Faktor 1,25 multipliziert – zur Erklärung dieses Vorgehens siehe Kapitel 5.1.2.2. Der so erhaltene, für Österreich hochgerechnete Wert für den Verkauf von PC-Monitoren im Jahr 2010 ist mit dem aus den Zahlen aus MaRess (Kristof, Hennicke et al. 2010) hochgerechneten Wert für PC-Monitore in Österreich im Jahr 2009 vergleichbar (siehe Tabelle 52).

	PC-Monitore in D	LCD-TV in D	PC-Monitore in Ö (berechnet)	LCD-TV in Ö (berechnet)
MaRess (Kristof, Hennicke et al. 2010) für 2009	3.251.000	7.553.000	334.495	777.128
Buchert et al. (2012) für 2010	2.576.000	8.258.000	265.045	**849.665**
Buchert et al. x Faktor 1,25 (berechnet)	-	-	**331.306**	-

Tabelle 52 Verkaufszahlen für LCD-Bildschirme in Deutschland aus der Literatur und die daraus hochgerechneten Werte für Österreich

Das deutsche Statistikportal statista.de gibt an, dass im Jahr 2011 in Deutschland 69,91 Mio. Menschen mind. einen Fernseher besaßen und dass 59 % der deutschen TV-Haushalte mit Flachbildfernsehern ausgestattet waren. Buchert et al. (2012) geben an, dass 90 % der Flachbildfernseher auf LCD-Technologie basieren, die restlichen 10 % der vorhandenen TV-Flachbildgeräte sind Plasma-Fernseher mit PDP-Technologie.
Wie schon im Kapitel 3.3.2.1 Festplatten (HDD) beschrieben waren laut Statistik Austria (2011b) im Jahr 2011 78,1 % der österreichischen Haushalte im Besitz (mind.) eines Computers. – Im Rahmen

dieser Stoffflussanalyse wird (wie auch schon in den Kapiteln 3.3.2.1 Festplatten (HDD) und im Kapitel 5.1.2.2 Notebooks) angenommen, dass 78,1 % der österreichischen Bevölkerung einen Computer besitzen. Davon wird die Anzahl der Notebooks, die bereits in Kapitel 5.1.2.2 Notebooks abgeschätzt wurde, abgezogen.

Im Endbericht zum Projekt MaRess (Kristof, Hennicke et al. 2010) wird angenommen, dass 80 % der Neukäufe ein altes Röhrenbildschirmgerät und 10 % einen alten Flachbildschirm ersetzen (hier werden laut MaRess häufig Flachbildschirme der 1. Generation gegen HD-ready- oder Full-HD-Geräte ausgetauscht). Bei Computerbildschirmen wird an gleicher Stelle wegen des niedrigeren Marktsättigungsgrades eine Ersatzquote von 80 % mit einer Aufteilung von 80 : 20 für LCD- zu CRT-Geräten angenommen.

Aus der Publikation des österreichischen Umweltbundesamtes „Flachbildschirmaltgeräte – Anforderungen an die Behandlung und Status in Österreich“ (Tesar und Öhlinger 2012) konnten leider keine Daten gewonnen werden, da die Angaben hier immer auf Tonnen Bildschirmgeräte und nicht auf deren Anzahl bezogen wird.

Flatscreens		**Palladium [kg]**
PC-Flatscreens	Input-Fluss	6,7 $^{+/- 1,7}$
LCD-TV-Flatscreens	Input-Fluss	19 $^{+/- 4,7}$
Alt-PC-Flatscreens	Fluss innerhalb PHH	4,2 $^{+/-1,1}$
Alt-LCD-TVPC-Flatscreens	Fluss innerhalb PHH	1,9 $^{+/-0,47}$
Elektroaltgeräte	Fluss zur AWS	14 $^{+/- 1,8}$ davon 4,2 $^{+/-1,1}$ in Alt-PC-Flatscreens davon 1,9 $^{+/-0,47}$ in Alt-LCD-TV-Flatscreens
Nutzlager PC-Flatscreens	Lager	98 $^{+/- 25}$ + 2,5 $^{+/- 2,0}$
Nutzlager LCD-TV-Flatscreens	Lager	84 $^{+/- 21}$ + 17 $^{+/- 4,7}$

Tabelle 53 Quantifizierte Flüsse und Lager der Flachbildschirme im Prozess Private Haushalte im System Palladium in Österreich (2011)

5.1.3 Münzen

Es gibt verschiedene Anlage- bzw. Sammlermünzen in Palladium (z.B. Ballerina, Cook Islands, Palladium Maple Leaf, Panda, Emu), deren bekannteste wohl die kanadische Maple Leaf Münze ist. Ab 1979 gab es sie in Gold, ab 1988 auch in Silber und Platin und ab 2005 in geringer Auflage (2005: 40.000 Stück) auch in Palladium. Die chinesische Panda-Münze gab es in den Jahren 1989, 2004 und 2005 in sehr kleiner Stückzahl (3.000 bzw. 8.000 Stück) ebenfalls in Palladium (ansonsten Gold, Silber und Platin).

Da es keine offizielle Deklarierungspflicht für den Kauf oder Verkauf von Sammlermünzen gibt, kann nicht nachvollzogen werden, wie viele davon in Österreich existieren.

5.1.4 **Schmuck**

Palladium wird in der Schmuckindustrie als Legierungsbestandteil zum Entfärben von Weißgold verwendet. Die Bezeichnung Weißgold ist allerdings nicht standardisiert und sagt daher nichts über die tatsächliche Zusammensetzung der Legierung aus. Mögliche Legierungsbestandteile sind z.B. Silber, Palladium, Mangan, Nickel, Kupfer oder Zink, seltener Platin, Chrom oder Eisen.
Bei Palladiumweißgold handelt es sich um eine Zwei- oder Dreistofflegierung aus jedenfalls Gold und Palladium und allenfalls Silber. Der Palladiumanteil der Zweistofflegierung muss mind. 16 % betragen, um das Gold zu entfärben (z.B. 750er Weißgold mit 75 % Au und 25 % Pd).
Laut Ögussa gibt es keinen Generalimporteur für Edelmetalle im Schmuckbereich, sowohl Goldschmiede als auch Kunden kaufen im In- oder Ausland ein. Wie auch im Kapitel 4.2.3 Schmuck bei der SFA für Niob näher erläutert kann auch hier nicht abgeschätzt werden, wie viel Schmuck von Verbrauchern selbst aus dem Ausland importiert wird. Wie schon erwähnt ist die technische Lebensdauer von Schmuck im Prinzip unbegrenzt. Er endet daher in der Regel nur aus Versehen in der Abfallwirtschaft und stellt somit kein relevantes Ressourcenpotential dar.

5.1.5 **Dentaltechnik**

Palladium findet auch im Bereich des Zahnersatzes Verwendung. Wie viel Palladium auf diesem Gebiet zum Einsatz kommt, dazu konnte keine verwertbare Statistik gefunden werden. Zusätzlich ist eine Abgrenzung der im In- oder Ausland stattgefunden zahnärztlichen Eingriffe nicht möglich.
Einer wissenschaftlichen Stellungnahme der deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde aus dem Jahr 2000 ist folgende Definition der Verwendung von Palladium als Legierungsbestandteil in diesem Bereich zu entnehmen:
„Palladium ist ein Bestandteil […] von mehr als 90 % der zahnärztlich verwendeten Edelmetall-Legierungen. Seit den 30er Jahren wird es in zahnärztlichen Silber-Palladium-Legierungen und Gold-Silber-Palladium-Legierungen verwendet. Im Zusammenhang mit der Favorisierung der Palladiumgusslegierungen […] sind in Deutschland rund 166 Palladiumlegierungen (dabei ist Palladium der Hauptbestandteil) nach der Zusammenstellung im Dental Vademekum 6 (1998) im Handel. Mit Ausnahme von 5 Legierungen sind alle für die Aufbrenntechnik vorgesehen. Während in den aufbrennfähigen Hochgoldlegierungen der Palladiumzusatz bis zu 10 % im Wesentlichen die Warmfestigkeit während der Keramikbrände gewährleisten soll, wurde bei den goldreduzierten Legierungen und in besonderem Maße bei den Palladiumlegierungen dieses Metall aus Kostengründen eingesetzt. Aufgrund einer deutlichen Preiserhöhung für Palladium in den letzten Jahren ist dieses Argument zurzeit hinfällig. Etwa die Hälfte der angebotenen Palladiumlegierungen sind Palladium-Silber-Legierungen, das restliche Viertel sind Palladium-Kupfer-Legierungen.“

5.1.6 Umweltemissionen

Es gibt Publikationen aus dem Bereich der Umwelt-Spurenanalytik zum Thema Palladium-Emissionen. Alt und Zereini (2006) haben zu diesem Thema ein Buch herausgegeben, in dem u.a. festgehalten ist, dass neben Platin auch die Gehalte von Palladium in Umweltmatrizes ansteigen. Dieser Anstieg sei entlang den Straßen zu messen aber auch im Eis und Schnee Grönlands. Verglichen mit Platin sei Palladium deutlich mobiler in der Umwelt und auch bioverfügbarer.
Auch eine Publikation von A. Limbeck et al. (2003) befasst sich mit den saisonalen Unterschieden von u.a. Palladiumkonzentration in der Luft, genauer in der Aerosolfraktion kleiner 10 µm. Da es sich hier um regional abgegrenzte Messungen handelt (bei Limbeck et al. (2003) z.B. Klagenfurt und Salzburg), kann keine allgemeine Quantifizierung von Palladium-Emissionen in die Umwelt gemacht werden.
Einer Publikation des Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit in der Helmholtz-Gemeinschaft (U. Koller 2004) über Katalysatoren in Kraftfahrzeugen wird von 10 – 100 ng Platinemissionen pro Kubikmeter Abgas oder pro gefahrenem Kilometer geschrieben. Bei vollständigem Ersatz von Platin durch Palladium ginge man von Emissionsraten von 150 – 400 ng/km aus.
Bei Limbeck et al. (2003) wird festgehalten, dass die wichtigsten Parameter, die die Konzentration von Platingruppenmetallen in der Luft beeinflussen, die meteorologischen Bedingungen, die Verkehrsdichte (Rauch et al. 2001) und die Fahrbedingungen (Artelt et al. 1999) sind.
All dies weist auf einen Anstieg der Palladiumkonzentration in der Umwelt durch vermehrten Abrieb von Kfz-Katalysatoren hin.

5.2 Industrie & Gewerbe

5.2.1 Kfz-Katalysatoren

Da Kfz-Katalysatoren sich in allen Prozessen der SFA für Palladium in Österreich finden, wird das gesamte System der Kfz-Katalysatoren im Kapitel 5.1.1 im Prozess Industrie & Gewerbe beschrieben. Dort finden sich auch die quantifizierten Flüsse und Lager und deren Herleitungen.
Der Großteil der Neu-Kraftfahrzeuge wird nach Österreich importiert, es werden aber auch einige wenige Autotypen in Österreich zusammengebaut. 2011 wurden in Österreich 4 Pkw-Typen produziert:

- KTM X-Bow
- Peugeot 308 RC Z
- Aston Martin
- Mini R60

Die gesamte österreichische Pkw-Produktion belief sich im Jahr 2011 auf 130.411 Stück, von denen im selben Jahr 129.661 Stück exportiert wurden. Von den 750 in Österreich verbliebenen Pkw wurden 2011 108 Pkw angemeldet.

Kfz-Katalysatoren		Palladium [kg]
Autoteile	Input-Fluss	32 $^{+/- 7,1}$
Autos aus Ö neu	Fluss zu PHH	1,3 $^{+/- 0,31}$
Autos aus Ö neu (Export)	Output-Fluss	31 $^{+/- 7,1}$

Tabelle 54 Quantifizierte Flüsse der Kfz-Katalysatoren im Prozess Industrie & Gewerbe im System Palladium in Österreich (2011)

5.2.2 Katalysatoren für die chemische Industrie

Generell kann zwischen homogener und heterogener Katalyse unterschieden werden, je nachdem, ob Katalysator und Reaktanten in der gleichen Phase vorliegen oder nicht. Typisch für heterogene Katalysen sind gasförmige Edukte und feste Katalysatoren. Typisch für homogene Katalysen ist, dass die Reaktanten und der Katalysator in Lösung vorliegen und die Reaktionstemperaturen relativ niedrig sind (20 – 150 °C im Gegensatz zu 200 – 600 °C bei der heterogenen Katalyse).
Fein verteiltes Palladium wird als Katalysator zur Beschleunigung von chemischen Reaktionen wie z.B. Hydrierungen, Dehydrierungen oder das Cracken von Kohlenwasserstoffen eingesetzt.
Metallorganische Komplexkatalysatoren sind Übergangsmetallverbindungen mit definierter Struktur und Stöchiometrie. Palladiumkomplexe werden z.B. für C-C-Verknüpfungsreaktionen eingesetzt, wobei der Pd-Komplex in situ aus stabilen und kommerziell erhältlichen Ausgangssalzen wie $Pd(OAc)_2$ oder $PdCl_2$ hergestellt wird.
Die in Österreich jährlich in der chemischen Industrie eingesetzte Menge an Palladiumkatalysatoren konnte nicht quantifiziert werden. Es kann jedoch generell von einer guten internen Rezyklierbarkeit von derartigen Katalysatoren durch Regeneration ausgegangen werden, sodass die Verluste relativ gering sein müssten und Katalysatoren in hohem Maße wiederverwendet werden können.

5.2.3 Schmuck

Da Schmuck sich sowohl im Prozess Private Haushalte als auch im Prozess Industrie & Gewerbe der SFA für Palladium in Österreich wiederfindet, wird Palladium in der Schmuckindustrie im Kapitel 5.1.4 im Prozess Private Haushalte beschrieben.
Laut Ögussa gibt es keinen Generalimporteur für Edelmetalle im Schmuckbereich, sowohl Goldschmiede als auch Kunden kaufen im In- oder Ausland ein. Auch österreichische Goldschmiede werden zu einem gewissen (nicht näher bekannten Prozentsatz) ins Ausland exportieren. Import und Export von Palladium-hältigen Schmuckwaren kann also hier nicht abgegrenzt werden.

Wie schon erwähnt ist die technische Lebensdauer von Schmuck im Prinzip unbegrenzt. Er endet daher in der Regel nur aus Versehen in der Abfallwirtschaft und stellt somit kein relevantes Ressourcenpotential dar.

5.2.4 **Dentaltechnik**

Wie schon bei Palladium-hältigem Schmuck kommt auch Palladium-hältiger Zahnersatz sowohl im Prozess Private Haushalte als auch im Prozess Industrie & Gewerbe der SFA für Palladium in Österreich vor. Auch Palladium in der Dentaltechnik wird im Kapitel 5.1.5 im Prozess Industrie & Gewerbe beschrieben.
Ursprünglich aus der Ögussa/Degussa hervorgegangen, ist die in Wien ansässige DeguDent Austria seit 2001 100%ige Tochter der US-amerikanischen Dentsply International, dem größten Hersteller von Dentalprodukten weltweit. Die Angebotspalette von Dentsply umfasst das komplette Spektrum an Dentalprodukten sowohl im zahntechnischen (DeguDent) als auch im implantologischen (Dentsply Friadent) und zahnmedizinischen (Dentsply DeTrey) Bereich und fertigt u.a. Zahnersatzprodukte, Zahnfüllungen, Zahnimplantate und Implantatprothetik.
Auf der Homepage von DeguDent Deutschland (www.degudent.de) finden sich verschiedene Palladium-Basis- und Silber-Palladium-Dentallegierungen, die zwischen 1,0 und 77,3 % Pd enthalten. Es wird hier unterschieden zwischen aufbrennfähigen Legierungen mit konventionellen Keramiken, solchen mit hochexpandierenden Keramiken und Gusslegierungen.
Von DeguDent Austria konnten keine Daten über die im Jahr 2011 verarbeiteten Mengen an Palladium erhalten werden.

5.3 Abfallwirtschaft

Der Prozess Abfallwirtschaft wurde auch hier als einziger nicht in einem Subsystem dargestellt, da die vorliegenden Informationen nicht ausreichen, um den Prozess im Detail abzubilden.
Der größte rezyklierbare Palladium-Anteil ist in den Katalysatoren der Alt-Kfz enthalten. Das gesamte System der Kfz-Katalysatoren, deren Pd-Flüsse alle Prozesse betreffen, wird in Kapitel 5.1.1 im Prozess Private Haushalte detailliert beschrieben.
Im Jahr 2011 wurden rund 80.750 Katalysatoren bei Shredderbetrieben aus Alt-Kfz ausgebaut und exportiert. Diesen verwerteten Katalysatoren stehen allerdings ca. 142.500 Katalysatoren gegenüber (das entspricht der 1,8-fachen Menge der verwerteten Kats), die sich zwar in Alt-Kfz befanden, aber keiner Verwertung (im In- oder Ausland) zugeführt wurden. Es ist anzunehmen, dass sich ein kleiner Teil davon im Lager von Privaten befindet, der Großteil wurde wahrscheinlich exportiert. Diese exportierten Alt-Kfz werden aus österreichischer Sicht als „Altfahrzeugschwund“ bezeichnet. Einerseits ist eine Weiterverwendung im Ausland (Exporte finden laut Hagelüken (Hagelüken 2008)

v.a. nach Afrika und Osteuropa statt) einer direkten Verwertung durchaus vorzuziehen, andererseits besteht das Problem, dass eine Verwertung am Ende der Lebensdauer der Kfz in den entsprechenden Zielländern nicht oder nur zu einem sehr geringen Prozentsatz stattfindet, da dort i.A. keine – bzw. keine mit der österreichischen/mitteleuropäischen vergleichbare – Recyclinginfrastruktur besteht. Somit kann das Palladium in den exportierten Alt-Kfz für das Palladium-Recycling größtenteils als verloren angesehen werden.

Das Recycling der Platingruppenmetalle ist laut Hagelüken (Hagelüken 2008) technisch gelöst, Umicore erzielt bei der Scheidung für Platin/Palladium Metallausbeuten von 98 % aus Autokatalysatoren. Als Hauptproblem des Palladiumrecyclings und des Edelmetallrecyclings aus Alt-Kfz-Katalysatoren beschreibt Hagelüken mehrfach (z.B. Hagelüken 2008) die offene Kreislaufstruktur: Die erzielten Recyclingquoten bei Platingruppenmetallen in Europa liegen mit 40 % deutlich unter den erzielbaren technischen Rückgewinnungsmöglichkeiten. Das liege v.a. daran, dass der industrielle Kreislauf durch private Nutzer und – zu Beginn der Recyclingkette – oft nicht-industrielle Akteure unterbrochen wird. Im Gegensatz dazu käme es bei einer geschlossenen Kreislaufstruktur zwischen industriellen, professionell agierenden Akteuren (wie z.B. bei Prozess-Katalysatoren in der chemischen Industrie oder Ölraffination) zu PGM-Rückgewinnungsraten von über 90 % über den gesamten Produktlebenszyklus.

Den 2. Fluss in die Abfallwirtschaft stellen die Palladium-hältigen Elektroaltgeräte (EAG) dar, zu denen Althandys, Altnotebooks, Alt-PC- und Alt-LCD-TV-Flachbildschirme gehören.

Leiterplatten und Mobiltelefone können (nach Entnahme der Batterie) direkt in integrierten Kupfer- und Edelmetallhütten verarbeitet werden. Großtechnische Anlagen für die metallurgische Verarbeitung von Leiterplatten und anderen Elektronikfraktionen bestehen laut Hagelüken (Hagelüken 2009) in Belgien, Kanada, Deutschland, Japan und Schweden. Das Einsatzmaterial stamme aus weltweiten Quellen.

Die Sammlung von Flachbildschirmgeräten sieht in Österreich derzeit laut Tesar & Öhlinger (2012) folgendermaßen aus: Sie werden meist gemeinsam mit anderen Bildschirmgeräten in Gitterboxen oder auf Paletten mit Folienumwicklung, aber auch in loser Schüttung in Großcontainern gesammelt bzw. zu Behandlern transportiert. Bei größeren Sammelstellen werden Flachbildschirmgeräte auch separat erfasst, zum Teil werden sie aber auch als EAG-Gemisch (Kleingeräte, Bildschirmgeräte, Großgeräte) gesammelt, was in der Regel zu einer höheren Beschädigungsrate der Flachbildschirmgeräte führt. LCD-Fernseher und -Monitore enthalten eine Quecksilber-hältige Hintergrundbeleuchtung, die folglich bei beschädigten Geräten zu Problemen führt. Außerdem macht der Hg-Gehalt ein Shreddern unmöglich und zwingt zur manuellen Demontage, um u.a. an die enthaltenen Leiterplatten gelangen zu können.

Basierend auf den Angaben von Tesar & Öhlinger (2012) werden in Österreich in 15 Anlagen Bildschirmgeräte behandelt. 4 dieser Anlagen (die 2010 zusammen 37 % der Bildschirmgeräte übernahmen) gaben an, keine Behandlung durchzuführen. Die anschließende mechanische Behandlung erfolgt laut Tesar & Öhlinger (2012) in Anlagen in der Schweiz (Sovag/Veolia in Rubigen), in Frankreich (Air Mercury AG bei Lyon) oder in Belgien (Apparec, Coolrec Group in Tisselt). Einige

andere Anlagen (Griag Glassrecycling AG in Deutschland, Galloo N.V. in Belgien, Saubermacher AG in Österreich) befinden sich im Probebetrieb. Die Leiterplattenfraktion geht i.A. weiter zu NE-Hütten zur weiteren Aufbereitung.

		Palladium [kg]
Alt-Autos (Shredder)	Input-Fluss von PH	130 $^{+/- 34}$
Elektroaltgeräte	Input-Fluss von PH	14 $^{+/- 1,8}$
Lager Abfallwirtschaft		+ 140 $^{+/- 34}$

Tabelle 55 Quantifizierte Flüsse und Lager der Kfz-Katalysatoren im Prozess Industrie & Gewerbe im System Palladium in Österreich (2011)

5.4 Ergebnisse

In Abbildung 21 ist der Palladium-Haushalt für Österreich im Jahr 2011 dargestellt. Der über alle quantifizierbaren Palladium-Flüsse dominierende ist der Neuwagenimport mit 680 $^{+/- 170}$ kg/a, gefolgt vom Alt-Auto-Export (180 $^{+/- 45}$ kg) und den (in Österreich) verwerteten bzw. Shredderbetrieben zugeführten Alt-Autos (130 $^{+/- 34}$ kg). Die in Österreich produzierten Autos werden in Abbildung 23 dargestellt.

Summiert man die in den hier betrachteten Elektro- und Elektroaltgeräten (Mobiltelefone, Notebooks, PC- und LCD-TV-Flachbildschirme) enthaltenen Mengen an Palladium, wurden in Elektrogeräten 2011 ca. 77 $^{+/- 19}$ kg Palladium importiert, die 2011 angefallenen Elektroaltgeräte enthielten ca. 14 $^{+/- 1,8}$ kg Palladium.

Sowohl die Pd-Flüsse in den Kfz als auch die in den Elektrogeräten und die dazugehörigen Pd-Lager werden im Subsystem Private Haushalte detailliert dargestellt und beschrieben (vgl. Abbildung 22).

Münzen, Zahnersatz und Schmuck sind aufgrund der schlechten Datenlage nicht quantifizierbar, ihr Palladium-Gehalt ist aber im Vergleich zu Kfz und zu Elektrogeräten als sehr klein einzuschätzen. Zahnersatz und Schmuck können sowohl im In- als auch im Ausland erworben werden, wobei zwischen diesen beiden Möglichkeiten hier nicht unterschieden werden kann. Bei Münzen besteht ein ähnliches Problem: Auch hier gibt es keine Deklarierungspflicht, ob sie im In- oder Ausland erworben werden, ebenso können die in Österreich produzierten Pd-hältigen 25-Euro-Münzen ins Ausland verkauft werden, was nicht nachvollziehbar ist.

Wie viel Palladium für industrielle Anwendungen einerseits an reinem Palladium in Form von Ingots oder Pulver, andererseits als Katalysator für die chemische und Petrolindustrie importiert wird, kann nicht quantifiziert werden, da in den entsprechenden Statistiken (z.B. European Mineral Statistic (Brown et al. 2012a), World Mineral Production (Brown et al. 2012b)) Palladium nicht getrennt von den anderen Platingruppenmetallen ausgewiesen wird.

Die Freisetzung von Palladium aus Kfz-Katalysatoren während der Nutzung ist nicht quantifizierbar, es gibt aber Hinweise darauf, dass die Palladiumkonzentration in der Umwelt durch vermehrten Abrieb von Kfz-Katalysatoren ansteigt.

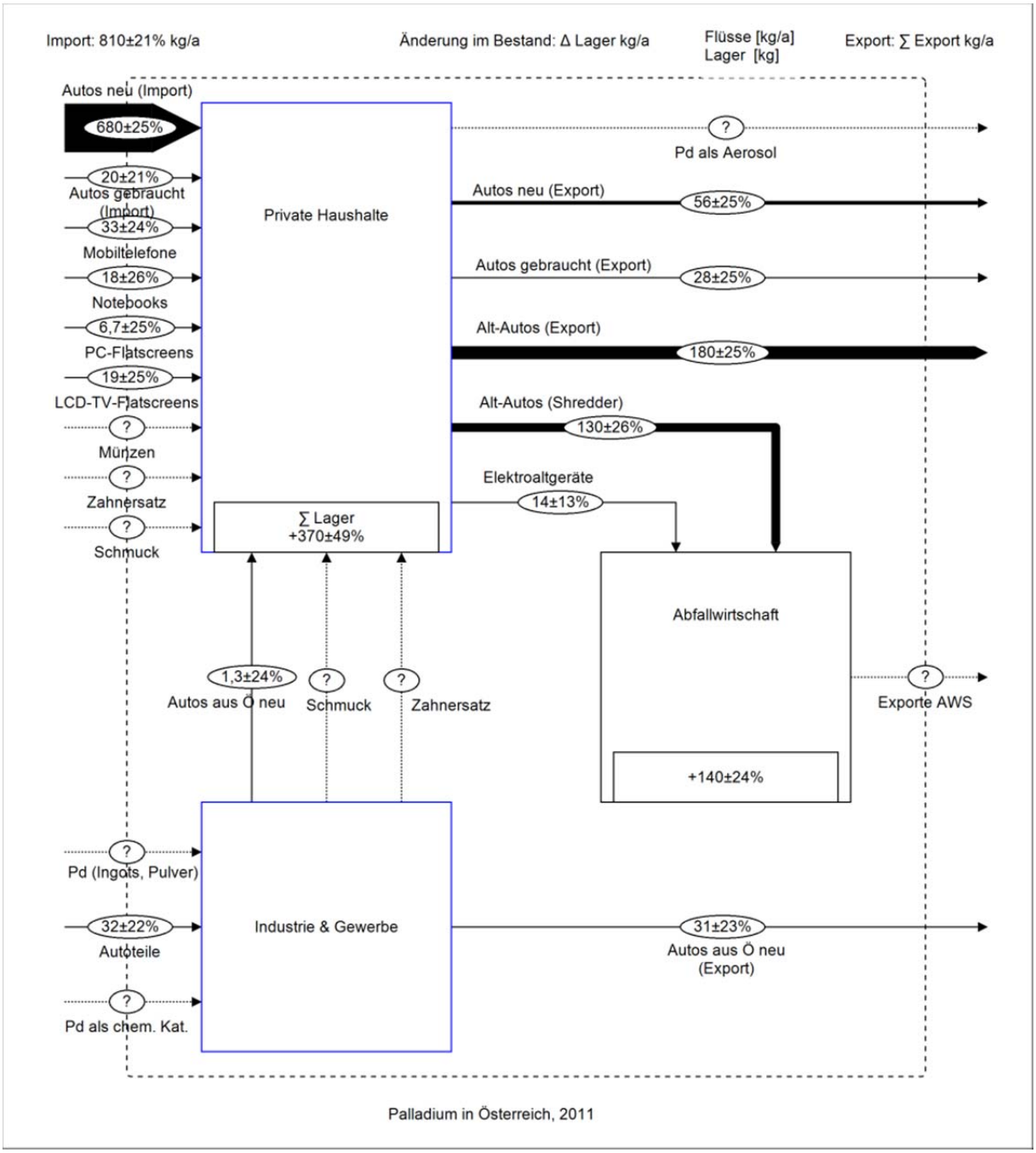

Abbildung 21 Stoffflussbild Palladium in Österreich (2011)

Auch in Abbildung 22 wird erneut deutlich, warum bei Kraftfahrzeugen von der „rollenden Platin- und Palladiummine“ gesprochen wird: Die 2011 in Österreich angemeldeten Autos stellen mit rund 4,0 t (3,7 + 0,26 $^{+/-0,15}$ t) mit Abstand das größte Palladium-Lager dar. Im Vergleich dazu sind die Mengen an Palladium in Elektro- und Elektroaltgeräten (Mobiltelefone, Notebooks, PC- und LCD-TV-Flachbildschirme) um ca. eine Größenordnung niedriger: Die Importe an Elektrogeräten beinhalten 2011 ca. 77 $^{+/- 19}$ kg Palladium, die Nutzlager der Elektrogeräte gesamt rund 350 kg (290 $^{+/- 73}$ + 61 $^{+/- 20}$ kg) und die Elektroaltgeräte, die über die Sammelstellen zur Abfallwirtschaft gehen ca. 14 $^{+/- 1,8}$ kg Palladium. Das zweitgrößte Lager, nämlich das Nutzlager der Elektrogeräte gesamt, ist somit etwa um den Faktor 11 kleiner als das Lager aller in Österreich angemeldeten Autos (~ 350 kg versus 4 t Pd). Entsprechend dominant sind folglich die Flüsse der Kfz: Neuwagenimport (680 $^{+/ 170}$ kg Pd/a), neuzugelassene Autos und Alt-Kfz, die exportiert werden (180 $^{+/- 45}$ kg Pd/a), und jene, die über (österreichische) Shredderbetriebe einer Verwertung zugeführt werden (130 $^{+/- 34}$ kg Pd/a).

Wie schon im Kapitel 5.1.1 ausgeführt ist unklar, wie der „Lagerzuwachs“ von ~ 19.000 neuen Pkw, was einer Palladium-Menge von 45 kg ($^{+/- 220 kg}$) entspricht, zustande kommt. Die Datenlage bei Kraftfahrzeugen ist daher zum Teil als inkonsistent, die bei den Elektro- und Elektroaltgeräten generell als mangelhaft zu bezeichnen. Weiters ist bei den Elektro(alt)geräten die Abgrenzung zwischen Nutzlager, „Altlager“ und Elektroaltgeräten schwierig, da einige dieser Geräte (allen voran Handys) nach ihrer Nutzungsphase nicht entsorgt, sondern zu Hause gelagert („Altlager“) oder über den Restmüll entsorgt werden. Weiters fehlen höher aufgelöste Daten über die getrennte Sammlung der jeweiligen Geräte. Die Bildschirmaltgeräte wurden in einer Publikation des Umweltbundesamtes (Tesar, Öhlinger 2012) z.B. nicht stückweise, sondern nur massemäßig erfasst.

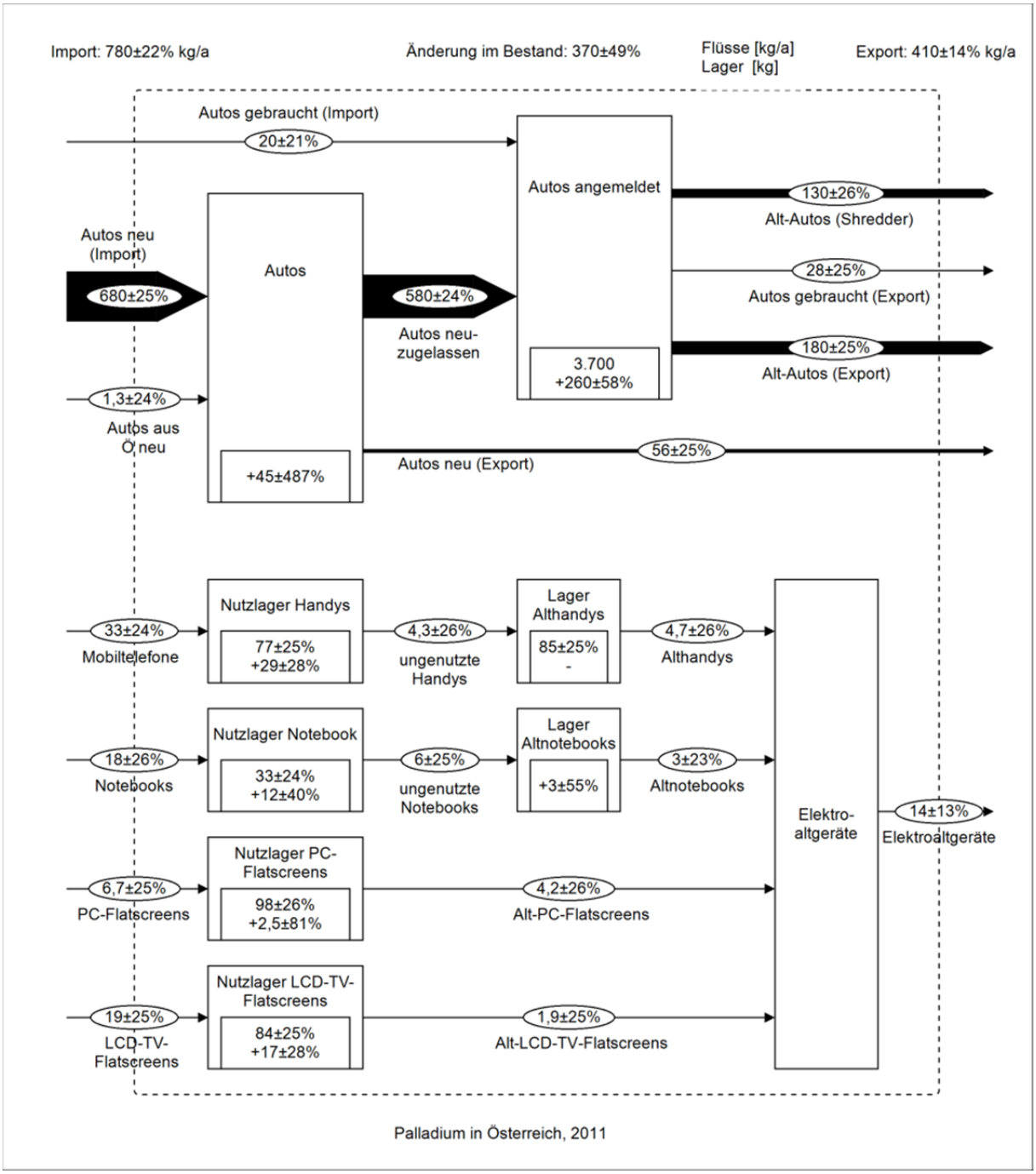

Abbildung 22 Subsystem Private Haushalte im System Palladium in Österreich (2011)

In Abbildung 23 ist die österreichische Autoproduktion abgebildet: Es werden Autoteile nach Österreich importiert, aus denen im Jahr 2011 4 Autotypen (KTM X-Bow, Peugeot 308 RC Z, Aston Martin, Mini R60) zusammengebaut wurden. Von diesen 130.411 in Österreich produzierten Kfz, die 32 $^{+/- 7,1}$ kg Palladium entsprechen, wurden 99,4 % exportiert.

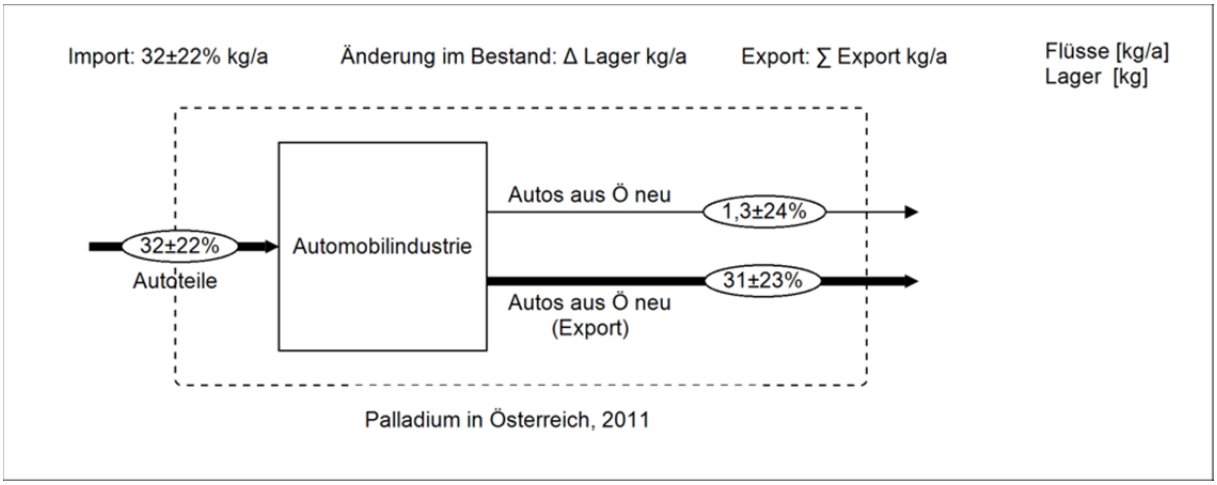

Abbildung 23 Subsystem Industrie & Gewerbe im System Palladium in Österreich (2011)

Die angegebenen Unsicherheiten im Rahmen der Stoffflussanalysen bewegen sich zwischen 13 und 487 %, wobei letzteres als Ausnahmeerscheinung zu sehen ist (es handelt sich dabei um den unklaren Lagerzuwachs bei Neuwägen), von dieser abgesehen, die höchsten Unsicherheiten bei 84 und 58 % liegen.
Auf diese bereits erwähnten Inkonsistenzen in den Daten (z.B. bei Kfz), die vorhandenen Datenlücken (z.B. bei Elektro(alt)geräten) und wie die Datenlage gezielt verbessert werden kann, wird im folgenden Kapitel 5.5 näher eingegangen.

5.5 Diskussion und Palladium-Rohstoffpotentiale

In diesem Abschnitt werden einerseits die Ergebnisse der Stoffflussanalyse in Bezug auf das (zukünftige) Recyclingpotential für Palladium in Österreich diskutiert und andererseits wird die Datenlage zur Erstellung des Palladium-Haushaltes für Österreich kritisch beleuchtet.

5.5.1 Recyclingpotentiale für Palladium

Weltweit wird mehr als 50 % des verbrauchten Palladiums in Autokatalysatoren verwendet. Im Rahmen der Palladium-Stoffflussanalyse für Österreich im Jahr 2011 machen die Palladium-Flüsse in Autokatalysatoren ca. 86 % des gesamten Palladium-Imports in das System aus (vgl. Abbildung 21). Das Palladium-Lager in den Katalysatoren der angemeldeten Fahrzeuge betrug 2011 ca. 3,7 t, was in

etwa dem 5-fachen Gesamtimport an Palladium nach Österreich entspricht. Dementsprechend ist klar, dass vor allem das Palladium in Autokatalysatoren ein erhebliches Recyclingpotential darstellt. Derzeit werden aber nur ca. 36 % der Autokatalysatoren einem Recycling zugeführt, da 64 % der Autokatalysatoren in Alt-Kfz nicht zu Shredderbetrieben gelangen, sondern ins Ausland exportiert werden. Der Altfahrzeug-Schwund ist somit primär dafür verantwortlich, dass nur ein relativ geringer Teil des Palladiums in Autokatalysatoren verwertet werden kann. Da die Alt-Kfz in Länder „verschwinden", die keine hochentwickelte Alt-Fahrzeug-Verwertungsinfrastruktur besitzen, wird – wenn überhaupt – nur ein geringerer Anteil des enthaltenen Palladiums in diesen Katalysatoren rückgewonnen als dies in Österreich der Fall wäre (die Palladium-Verluste in hochspezialisierten Recyclingwerken sind sehr gering). Zusätzlich zu den weniger hoch entwickelten Recyclingtechnologien ist auch davon auszugehen, dass in den Zielländern der Alt-Kfz zudem während der Nutzung höhere Verluste an Palladium auftreten (mangelnde Fachkenntnis der Mechaniker und unzureichende Wartung, schlechte Straßenverhältnisse) als in Österreich. Dies verringert wiederum den rückgewinnbaren Anteil des in Verkehr gebrachten Palladiums (vgl. Kristof, Hennicke et al. 2010; Hagelüken 2008). Aus den genannten Gründen ist es für eine optimale Nutzung des Palladium-Recyclingpotentials in Katalysatoren von Alt-Kfz einerseits notwendig, Schein-Exporte (es erfolgt keine Weiternutzung) zu verhindern und andererseits effiziente Recyclingnetzwerke in und mit den jeweiligen Zielregionen aufzubauen, um Wertstoffe aus den Alt-Kfz am Ende der Nutzungsdauer zurückzugewinnen.

Abgesehen von Autokatalysatoren stellen in erster Linie Elektroaltgeräte ein Potential für die Rückgewinnung von Palladium dar. Das Palladium-Lager in genutzten Geräten wird für Österreich im Jahr 2011 mit 0,21 t abgeschätzt (vgl. Abbildung 22). In den Elektroaltgeräten fällt etwa eine Palladium-Menge von 14 kg/a an, die anhand geeigneter Sammel- und Verwertungsverfahren rückgewinnbar wäre. In der Praxis wird jedoch nur ein relativ kleiner Anteil dieses Palladiums (um 30 %, vgl. Chancerel et al. 2009) zurück gewonnen, was in erster Linie auf die Art der Sammlung (nicht getrennt) und Behandlung (ungeeignete Verfahren) zurückzuführen ist. Der soeben erwähnte Recyclinganteil beruht jedoch auf Literaturdaten und wurde für den österreichischen Palladium-Haushalt nicht erhoben. In jedem Fall ist aber davon auszugehen, dass durch eine verbesserte Sammlung und gezielte Behandlung auch in Österreich eine deutliche Steigerung der Palladiumausbeute aus der Elektroaltgeräteverwertung möglich wäre.

Die Palladium-Flüsse und -Lager in Münzen, Dentalprodukten und Schmuck wurden nicht quantifiziert. Da für alle Anwendungen im Rahmen der Verarbeitung von hoher Materialeffizienz (kaum Verluste an Palladium) ausgegangen werden kann, könnten ungenutzte Recyclingpotentiale vor allem am Ende der Nutzungsphase auftreten. Da sowohl Schmuck als auch Münzen in der Regel nur aus Versehen in den Abfall gelangen, sollte die Nicht-Bestimmung der Palladium-Mengen in diesen Produkten keinen massiven Einfluss auf eine potentielle Palladium-Rückgewinnung haben. Ähnliches gilt in Bezug auf Dentalanwendungen, die zusätzlich in Bezug auf die Palladium-Menge von stark untergeordneter Bedeutung sein dürften.

5.5.2 Datenlage für die Erstellung des österreichischen Palladium-Haushaltes

Aufgrund der dominierenden Bedeutung der Autokatalysatoren für den Palladium-Haushalt Österreichs sind in erster Linie Daten zur Fahrzeugnutzung und -verwertung sowie zu den Palladium-Gehalten der Katalysatoren relevant. Während statistische Daten zum Import/Export sowie zur Anmeldung/Abmeldung/Verwertung von Kraftfahrzeugen in hoher Detailtiefe vorhanden sind, ist dies für Palladium-Gehalte der Katalysatoren nicht der Fall. Diese sind vom jeweiligen Katalysatortyp, dem Baujahr und dem Hersteller abhängig. Da es hierzu keine flächendeckenden Untersuchungen für Österreich gibt, resultieren aus der Festlegung mittlerer Palladium-Gehalte relativ große Unsicherheiten. Eine Erhebung von Daten zu Palladium-Gehalten unterschiedlicher Katalysatoren (am besten bei Alt-Auto-Verwertern, da auf diese Weise keine Unsicherheiten aufgrund von Verlusten in der Nutzungsphase eingeführt werden), würde die Zuverlässigkeit der Schätzungen deutlich erhöhen. Außerdem sind die statistischen Daten zu Import/Export und Anmeldung/Abmeldung der Kfz nicht zu 100 % plausibel (z.B. Aufbau eines Lagers an Neuwagen, die nicht angemeldet oder wieder exportiert werden). Für diese Inkonsistenzen wären, gemeinsam mit den erhebenden Stellen, Erklärungen zu suchen und die Datenbasis entsprechend zu verbessern.

Für den Bereich Elektro- und Elektronikprodukte stellt sich die Datenlage ebenfalls als unvollständig dar. Abgesehen von der Notwendigkeit, auf mittlere Palladium-Gehalte für ganze Produktgruppen zurückgreifen zu müssen, waren Angaben zu den in Verkehr gesetzten Mengen und zu Besitzstatistiken zum Teil nur für Deutschland verfügbar, welche bevölkerungsäquivalent umgerechnet wurden. Die größte Herausforderung stellt sich für Elektro-Altgeräte in Bezug auf die Abschätzung der anfallenden Mengen dar. Hier sind kaum Daten (auf Produkt(gruppen)ebene) verfügbar, die erlauben nachzuvollziehen, wie viele Geräte aus der Nutzung ausscheiden und wo diese im System auftauchen. So werden einige Geräte (z.B. Handys) beispielsweise oft nach dem Nutzungsende nicht der Abfallwirtschaft übergeben oder weiter verkauft sondern zu Hause zwischengelagert. Andere Geräte werden mit dem Restmüll entsorgt und keiner getrennten Sammlung zugeführt. Dementsprechend stellt die Abschätzung der Geräte, die aus dem Gebrauch ausscheiden und wie sich diese auf unterschiedliche Entsorgungswege aufteilen, eine große Herausforderung dar. Die soeben erwähnten Unsicherheiten machen die Abschätzung der Palladium-Flüsse in der Abfallwirtschaft sehr schwierig, weswegen dieser Prozess im Rahmen der Stoffflussanalysen nicht näher bilanziert werden konnte (vgl. Abbildung 21). Für eine stärkere Rückgewinnung des Palladiums in unterschiedlichen Abfallströmen (dies gilt für Elektrogeräte und Autokatalysatoren in gleicher Weise) sind Untersuchungen zu einem besseren Verständnis des Abfallwirtschaftssystems notwendig.

Darüber hinaus ließ auch die Datenlage für die Bereiche Schmuck, Münzen und Dentalanwendungen eine Bilanzierung der entsprechenden Pd-Lager und -Flüsse nicht zu. Aufgrund der (vermutlich) geringen Palladium-Mengen in diesen Anwendungen und der geringen Potentiale für ein effektiveres Palladium-Recycling aus diesen Produkten erscheinen diese Datenlücken im Vergleich mit den Datenlücken im Bereich der Alt-Autokatalysatoren und der Elektroaltgeräte jedoch nachrangig.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Stoffflussanalysen (SFA) stellen ein geeignetes Werkzeug zur Untersuchung potentieller Sekundärrohstoffmengen in anthropogenen Systemen dar und wurden in der Vergangenheit sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene zur Untersuchung von Ressourcensystemen angewendet. Allerdings gibt es bisher nur wenige systematische Analysen, die im Zuge von Zukunftstechnologien bzw. Hochtechnologieanwendungen verwendete Rohstoffe (z.B. Seltene Erden, Platingruppen Metalle, Gallium, Indium etc.) untersucht haben.

Die verstärkte Gewinnung und Nutzung sekundärer Ressourcen dient nicht nur der Schonung primärer Lagerstätten, sondern ist integrativer Bestandteil einer nachhaltigen Ressourcenbewirtschaftung. Außerdem kann die effizientere Nutzung vorhandener Ressourcenpotentiale innerhalb Österreichs (z.B. Recycling von Rohstoffen aus bisher ungenutzten Abfallströmen) die Abhängigkeit der österreichischen Wirtschaft von Rohstoffimporten verringern.

Das Ziel dieser Studie war es, eine konsistente Auswertung vorhandener Daten zum österreichischen Haushalt dreier ausgewählter kritischer Rohstoffe anhand der SFA durchzuführen und diese im Hinblick auf potentielle Sekundärrohstoffmengen zu diskutieren.

Bei der Auswahl der zu betrachtenden kritischen Rohstoffe wurde – nach Sondierung der Methoden zur Kritikalitätsbewertung – analog zur Ad-hoc-Arbeitsgruppe der EU vorgegangen, um folgende drei, für Österreich wirtschaftlich besonders relevante, Elemente auszuwählen: **Neodym (Nd)** als Vertreter der Seltenen Erden, **Palladium (Pd)** als Vertreter der Platingruppenmetalle und **Niob (Nb)** als der Rohstoff mit dem höchsten Indikatorwert in Bezug auf die Relevanz für die österreichische Wirtschaft [4].

Für die 3 ausgewählten kritischen Rohstoffe, wurden jeweils Stoffbilanzen für Österreich im Jahr 2011 durchgeführt. Die Systeme wurden zunächst qualitativ beschrieben, wesentliche Stoffflüsse identifiziert und schließlich (soweit wie möglich) quantifiziert. Hierfür kam die Methode der SFA zur Anwendung (Brunner und Rechberger 2004), wobei auch die Unsicherheiten aufgrund unterschiedlicher Qualität und Verfügbarkeit von Daten mitberücksichtigt wurden. Die Bilanzierung der Systeme und die Darstellung der Ergebnisse erfolgte anhand der Software STAN®, einer an der TU Wien entwickelten Spezialsoftware für SFA.

Im Anschluss werden zunächst die wesentlichen Ergebnisse der SFA zusammengefasst, danach die Probleme in Bezug auf die Daten für die Bilanzierung der Systeme diskutiert und abschließend basierend auf den Resultaten einige Empfehlungen abgeleitet.

[4] Die hohe wirtschaftliche Bedeutung von Niob ergibt sich durch die beinahe ausschließliche Verwendung als Stahlveredler. Da der Metallsektor die höchste Wertschöpfung der produzierenden Industrie hat, resultiert dies in der hohen wirtschaftlichen Bedeutung von Niob (vgl. Kapitel 2.1.2)

6.1 Stoffflussanalysen für Neodym, Niob und Palladium

6.1.1 Neodym

Das System zur Analyse des Neodym-Haushaltes für Österreich beinhaltet die Prozesse „Private Haushalte (PHH)“, „Windkraftwerke“, „Verarbeitende Industrie“, „Medizin & Forschung“ und „Abfallwirtschaft“. Die größten Nd-Flüsse in Österreich im Jahr 2011 stellen die Permanentmagneten in verschiedenen Elektro- und Elektronikanwendungen dar. Festplatten und Lautsprecher stellen jeweils die größten Inputs in den und auch die größten Lager im PHH dar (37 bzw. 67 t). Darüber hinaus verursachen auch die Nd-Mengen in DVD-Playern ein wesentliches Lager im PHH (14 t), wogegen die Nd-Lager in verschiedenen Hybrid- und Elektrofahrzeugen noch relativ klein (insgesamt unter 10 t), aber im Aufbau begriffen, sind. Neben der Anwendung von Permanentmagneten in Produkten des Alltagsgebrauches sind diese auch bei der Erzeugung von Strom aus Windenergie von großer Bedeutung (Nd-Input-Fluss von 2,1 t/a und Nd-Lager von 42 t). Durch die verstärkte Nutzung von Windkraft als Stromquelle, ist für diesen Prozess in Zukunft von einem weiter stark wachsenden Lager auszugehen. Während derzeit kaum Nd aus Windkraftanlagen rückgewonnen werden kann (Anlagen habe das Ende der Nutzungsdauer noch nicht erreicht), wurde für das Jahr 2033 anhand von Szenarien abgeschätzt, dass die Permanentmagneten aus den Alt-Windkraftanlagen den größten Nd-Fluss im System darstellen werden (ca. 16 t/a).

Der Prozess „Verarbeitende Industrie“ konnte nicht bilanziert werden. Aus Vertraulichkeitsgründen waren keine Daten zu den Importen und Exporten an Neodym verfügbar. In Absprache mit der Industrie kann aber davon ausgegangen werden, dass Nd keine wesentliche Rolle für die Seltene-Erden-verarbeitende Industrie in Österreich spielt und dass der Großteil der hergestellten Güter ohnehin wieder exportiert wird.

Der Prozess „Medizin & Forschung“ konnte nicht bilanziert werden, obwohl die Anwendung von Nd in NMR- und MRT-Geräten sowie in Nd:YAG-Lasern in diesem Bereich untersucht wurde. Es ist aber jedenfalls von sehr geringen Nd-Mengen auszugehen, die für das Recycling kaum eine Rolle spielen.

In Bezug auf den Prozess „Abfallwirtschaft“ wird im Rahmen dieser Arbeit primär der Verbleib von Elektroaltgeräten betrachtet (diese machen derzeit mehr als 90 % des Nd in Abfällen aus privaten Haushalten aus), weil viele der anderen Anwendungen bzw. Produkte derzeit noch kaum in der Abfallwirtschaft angekommen sind. Da weder entsprechende Verfahren vorhanden sind noch die Konzentrationen an Neodym in den verschiedenen Abfallströmen eine Aufbereitung und Abtrennung ökonomisch attraktiv machen, wird derzeit kein Neodym aus Abfallströmen rückgewonnen. Am ehesten wäre ein Recycling von Permanentmagneten denkbar, da in diesem Bereich eine getrennte Erfassung (zumindest für einige Produktströme) möglich erscheint und auch intensiv an der Entwicklung entsprechender Recyclingverfahren gearbeitet wird. Derzeit sind vor diesem Hintergrund vor allem Festplatten interessant, in Zukunft wird aber auch das Neodym-Recyclingpotential in Windkraftanlagen sowie in Hybrid-Autos und Elektrofahrrädern stark

zunehmen. Daher werden diese Abfallströme in einigen Jahrzehnten vermutlich am attraktivsten für ein gezieltes Nd-Recycling sein.

6.1.2 **Niob**

Das System zur Analyse des Niob-Haushaltes für Österreich beinhaltet die Prozesse „Private Haushalte & Infrastruktur“, „Industrie & Gewerbe“ und „Abfallwirtschaft“.
Niob wird vor allem als Stahlveredler eingesetzt. Die Anwendungen von Niob in Spezialstählen stellen die wesentlichen Flüsse (und Lager) in der Stoffflussanalyse für Niob in Österreich dar. Insgesamt importierte die österreichische Stahlindustrie im Jahr 2011 ca. 770 t Niob, wovon ca. 620 t in verschiedenen Spezialstählen wieder exportiert wurden. Da die Einsatzgebiete für Niob in unterschiedlichen Stählen nur allgemein ermittelt werden konnten, ist es anhand der vorhandenen Daten nicht möglich, das Niob-Lager so zu charakterisieren, dass Empfehlungen für eine gezielte Ausschleusung und Verwertung der Niob-haltigen Stähle in Österreich abgegeben werden können.
Abgesehen von den Spezialstählen wird Niob zur Produktion von Bimetall-Münzen und für Schmuck sowie als Supraleiter in NMR- und MRT-Geräten verwendet. Obwohl die Niob-Mengen in den Münzen für das Jahr 2011 bekannt waren (Lager: 3,3 t, Input: 0,42 t/a), stellen diese kein maßgebliches Recyclingpotential dar. Abgesehen von der relativ geringen Menge liegt dies an der theoretisch unendlichen Nutzung dieser Münzen, wodurch eine Übergabe an die Abfallwirtschaft nur unbeabsichtigt erfolgen würde, was eine getrennte Sammlung und Verwertung ausschließt. In Bezug auf das Recycling gelten diese Aussagen in gleicher Weise für Niob in Schmuck, allerdings wurden die Niob-Mengen im Bereich Schmuck nicht bestimmt, da die Datenlage dies nicht zuließ.
Für die Anwendungen von Niob in der Forschung (NMR-Geräte) und in der Medizin (MRT-Geräte) wird von keinen (maßgeblichen) Lagerzuwächsen ausgegangen, wodurch das Niob-Lager in NMR-Geräten und MRT-Geräten bei ca. 9,5 t stagniert. Für Recyclingbetrachtungen ist auch dieser Bereich eher unwichtig, da für diese Geräte der Produzent auch für die Wartung und Entsorgung zuständig ist und dieser bei entsprechenden Anreizen auch ein Niob-Recycling durchführen wird. Außerdem sind die Niob-Mengen in den Geräten fast um einen Faktor 100 geringer als die jährlichen Niob-Flüsse in Spezialstählen.
Trotz des vorwiegenden Einsatzes von Niob in bestimmten Spezialstählen, findet ein Niob-Recycling nach der Nutzungsphase derzeit nicht statt und erscheint in Anbetracht der Rahmenbedingungen aktuell auch nur für ausgewählte Anwendungen möglich, die eine getrennte Erfassung relativ problemlos ermöglichen (z.B. Pipelines). Sofern entsprechende Kenntnisse über den Mehrwert einer getrennten Erfassung der entsprechenden Stähle vorhanden sind und die ökonomischen Anreize dafür ausreichen, könnte ein Recycling direkt von den Herstellern und der anwendenden Industrie in geschlossenen Systemen umgesetzt werden. Ein Recycling aus gemischtem Stahlschrott erscheint aktuell weder wirtschaftlich noch technisch sinnvoll.

6.1.3 **Palladium**

Das System zur Analyse des Palladium-Haushaltes für Österreich beinhaltet die Prozesse „Private Haushalte“, „Industrie & Gewerbe“ und „Abfallwirtschaft“.

Im Rahmen der Palladium-Stoffflussanalyse für Österreich machen die Palladium-Flüsse in Autokatalysatoren ca. 86 % des gesamten Palladium-Imports in das System aus (ca. 0,7 t/a). Das Palladium-Lager in den Katalysatoren der in Nutzung befindlichen Fahrzeuge betrug 2011 ca. 3,7 t, was in etwa dem 5-fachen Import an Palladium nach Österreich entspricht.

Abgesehen von Autokatalysatoren stellen in erster Linie Elektroaltgeräte einen relevanten Bereich für den österreichischen Palladium-Haushalt dar. Das gesamte Palladium-Lager in genutzten Elektro- und Elektronikgeräten im Jahr 2011 betrug 0,21 t. Der Palladium-Input in den privaten Haushalt durch Elektrogeräte (Mobiltelefone, LCD-TV-Screens, Notebooks und PC-Flatscreens) betrug ca. 77 kg/a, wobei die Palladium-Menge in den anfallenden Elektroaltgeräten mit 14 kg/a abgeschätzt wurde (das Lager im privaten Haushalt (genutzt und ungenutzt) wächst demnach um ca. 63 kg/a). Diese Daten verdeutlichen, dass durch eine verbesserte Sammlung und gezielte Behandlung von Elektroaltgeräten in Zukunft eine deutliche Steigerung der Palladiumausbeute aus der Elektroaltgeräteverwertung möglich wäre.

Die Palladium-Flüsse und -Lager in Münzen, Dentalprodukten und Schmuck konnten aufgrund der mangelhaften Datenlage nicht quantifiziert werden. Da die Palladium-Mengen in diesen Bereichen vermutlich von untergeordneter Bedeutung in Relation zu den Palladium-Flüssen im Bereich Autokatalysatoren und Elektrogeräte sind, sollten diese Bilanzlücken keinen gravierenden Einfluss auf die Aussagen zum Sekundärrohstoffpotential für Palladium in Österreich haben.

Insgesamt ist klar, dass vor allem das Palladium in Autokatalysatoren ein erhebliches Recyclingpotential darstellt. Im Jahr 2011 wurden in Österreich aber nur ca. 36 % der Autokatalysatoren einem Recycling zugeführt. Der Rest der Autokatalysatoren in Alt-Kfz gelangte nicht zu Shredderbetrieben, sondern wurde ins Ausland exportiert. Dieser Altfahrzeug-Schwund ist somit primär dafür verantwortlich, dass derzeit nur ein relativ geringer Teil des Palladiums in Autokatalysatoren (in Österreich) verwertet werden kann.

Um ein optimiertes Recycling von Palladium aus den beiden wesentlichen Abfallströmen, Autokatalysatoren in Alt-Kfz und Elektroaltgeräte, zu ermöglichen, ist es jedenfalls notwendig, die anfallenden Mengen genauer zu erkunden sowie die abfallwirtschaftlichen Systeme zu untersuchen und schließlich anzupassen (getrennte Sammlung und gezielte Behandlung).

6.2 Datenlage und Datenunsicherheiten

Generell war es für die ausgewählten Rohstoffe (Neodym, Niob, Palladium) nicht möglich, alle Prozesse zu bilanzieren bzw. jeden Fluss im Stoffflussdiagramm quantitativ zu erfassen. Zum Teil waren die Daten zur Bilanzierung einzelner Flüsse nicht vorhanden oder nicht zugänglich, da Geschäftsinteressen einzelner Firmen zur Geheimhaltung von Produktionsdaten führte. Im Anschluss werden die Datenlage und die damit verbundenen Unsicherheiten im Rahmen der durchgeführten SFA diskutiert.

Sowohl für Neodym als auch für Palladium zeigte sich, dass die Unsicherheiten im Bereich der Elektro- und Elektronikprodukte groß sind (teilweise Standardabweichungen von > 30 %), da oft keine belastbaren Angaben zu den in Nutzung befindlichen Produkten und auch zu den insgesamt anfallenden Mengen am Ende der Nutzungsdauer verfügbar sind. Außerdem musste auch zur Ermittlung in Verkehr gesetzter Mengen in manchen Fällen auf Zahlen für Deutschland zurückgegriffen werden (z.B. Laptops, DVD-Player), die dann auf Österreich umgelegt wurden. Hinzu kommen große Unsicherheiten in Bezug auf die mittleren Stoffkonzentrationen in einzelnen Produktgruppen, welche oft von zahlreichen Faktoren abhängig sind (z.B. Gerätetyp, Alter, Hersteller), die die Bestimmung eines repräsentativen Wertes erschweren bzw. unmöglich machen.

Wohingegen eine Abschätzung zu den Stoffmengen in einzelnen Produkten bzw. Produktgruppen meist (wenn auch mit großen Unsicherheiten) möglich war (außer für Schmuckanwendungen), konnten Stoffumsätze der Industrie für alle Stoffe nur teilweise bzw. für Neodym überhaupt nicht quantifiziert werden. Besonders für Niob und Neodym ergaben sich durch diese fehlenden Daten Lücken und Unsicherheiten in der Bilanzierung des Gesamtsystems. Die mangelnde Bereitschaft der Industrie, konkrete Produktions- und Einsatzstatistiken der betreffenden Spezialstähle zur Verfügung zu stellen, bedingt die wesentlichsten Unsicherheiten in der Niob-Bilanz für Österreich, da die Stahlindustrie ca. 98 % des Niob-Umsatzes in Österreich bestimmt. Für die Neodym-Bilanz wird zwar angenommen, dass die Neodym-Flüsse in der verarbeitenden Industrie nicht wesentlich für die Beurteilung der Neodym-Rohstoffpotentiale sind, eine quantitative Einbindung des Prozesses in das Gesamtsystem wurde jedoch durch die verweigerte Datenweitergabe verhindert. Vor diesem Hintergrund ist zu betonen, dass die Kooperation der Industrie (durch die Weitergabe und Veröffentlichung entsprechender Daten) für die Bilanzierung von Hochtechnologie-Rohstoffen unumgänglich ist. Beispielsweise sind Daten der Industrie zum Einsatz von Niob in der Stahlproduktion und dem Verbleib der betreffenden Produkte als Grundlage für eine gezielte Bewirtschaftung von Niob-hältigen Spezialstählen anzusehen, ohne die ein Recycling dieser Spezialstähle in geschlossenen Kreisläufen kaum realisierbar sein wird.

Eine Gemeinsamkeit aller Rohstoffhaushalte ist die spärliche Datenlage in Bezug auf die Abfallwirtschaftssysteme. In erster Linie liegt das daran, dass derzeit Neodym und Niob praktisch nicht und Palladium nur teilweise aus Abfallströmen zurückgewonnen werden. In allen Fällen, ist ein besseres Verständnis der Abfallwirtschaftssysteme (anfallende Mengen, Sammel-, Verwertungs- bzw. Entsorgungswege, Stoffgehalte in Alt-Produkten und Abfallströmen, Materialeffizienz der

Aufbereitungstechnologien) als Voraussetzung für ein verstärktes Recycling der jeweiligen Rohstoffe zu sehen.

Obwohl statistische Daten zum Teil in hoher Detailtiefe vorhanden waren (z.B. Kfz-Daten für Österreich), war es für keinen der Rohstoffe möglich, den Rohstoff-Import anhand von Außenhandelsstatistiken abzuschätzen. Neodym wird in der European Mineral Statistic (Brown et al. 2012a), und der World Mineral Production (Brown et al. 2012b) gemeinsam mit allen anderen Seltenen Erden gelistet, auch Palladium wird in der Gruppe der Platingruppenmetalle geführt und sogar Niob wird gemeinsam mit Tantal in den betreffenden Statistiken erfasst. Diese Datenunschärfe (gemeinsam mit der spärlichen Datenweitergabe durch die betreffende Industrie), verhindert teilweise eine Überprüfung der „Bottom-up"-Schätzungen (Hochrechnen der Gesamtmengen anhand der Mengen in einzelnen Produkten) durch „Top-down"-Ansätze (Aufgliedern der Gesamtmengen auf Anwendungsbereiche). Um die Plausibilität von SFA zu überprüfen, ist eine Bilanzierung anhand beider Ansätze jedoch sinnvoll, ja sogar notwendig. Besonders in Anbetracht der Tatsache, dass für Hochtechnologierohstoffe bisher kaum Bilanzen erstellt wurden und somit kaum Vergleichswerte existieren.

Abschließend ist festzuhalten, dass im Rahmen aller SFA mit Datenlücken und massiven Datenunsicherheiten umzugehen war. Teilweise konnten Flüsse bzw. Prozesse nicht bilanziert werden, was den Screening-Charakter der durchgeführten Analysen unterstreicht. Dementsprechend sind die SFA im Rahmen dieser Arbeit als Basis für die gezielte Erhebung von Daten zur Verbesserung der Zuverlässigkeit der Bilanzen im Rahmen zukünftiger Arbeiten zu sehen.

6.3 Empfehlungen und Ausblick

Aus den Ergebnissen der SFA für Neodym, Niob und Palladium und der darauf aufbauenden Diskussion lassen sich folgende Empfehlungen für eine Optimierung der Nutzung entsprechender Rohstoffpotentiale ableiten:

- Die Ergebnisse der drei SFA sollten herangezogen werden, um die Datenlage zur Erstellung der jeweiligen Rohstoffhaushalte zu verbessern und eine verlässlichere Basis für die Identifikation und Nutzung vorhandener Sekundärrohstoffpotentiale zu schaffen.
- Die getrennte Sammlung bestimmter Produktgruppen wäre zu forcieren, um ein gezieltes Recycling der enthaltenen Wertstoffe zu ermöglichen.
  - In Bezug auf Neodym trifft das vor allem auf Permanentmagneten in unterschiedlichen Anwendungen zu (derzeit: v.a. Festplatten und Lautsprecher; zukünftig: Windkraftanlagen und Elektro- bzw. Hybridfahrzeuge).
  - In Bezug auf Niob könnten geschlossene Recycling-Systeme für spezielle Anwendung der Niob-haltigen Stähle etabliert werden (z.B. Pipelines).

- In Bezug auf Palladium wären in erster Linie Maßnahmen betreffend der Katalysatoren in Alt-Kfz (a. Exporte von nicht funktionstüchtigen Alt-Fahrzeugen unterbinden; b. effiziente Recyclingnetzwerke in und mit den jeweiligen Zielregionen der exportierten Alt-Fahrzeuge aufbauen) und der Elektroaltgeräte (möglichst vollständige Erfassung, getrennte Sammlung und gezielte Behandlung) zu setzen.

- Ein besseres Verständnis der Abfallwirtschaftssysteme in Bezug auf Hochtechnologierohstoffe ist als Voraussetzung für ein verstärktes Recycling unumgänglich.
  - Dazu sind Daten zu den anfallenden Mengen, den Sammel-, Verwertungs- bzw. Entsorgungswegen, den Stoffgehalten in Alt-Produkten und ausgewählten Abfallströmen sowie Prozessdaten zu unterschiedlichen Aufbereitungstechnologien zu erheben bzw. zu generieren.
- Generell wären dynamische SFA (Betrachtung der Systeme über einen längeren Zeitraum in Form einer routinemäßigen Stoffbuchhaltung) notwendig, um die bestehenden Lager zuverlässig zu charakterisieren und zukünftig verfügbare Rohstoffpotentiale zu bestimmen. Die dafür notwendigen Werkzeuge sind vorhanden, die Umsetzung scheitert lediglich am dafür notwendigen Datenbedarf.

Aus den obigen Empfehlungen lassen sich zahlreiche Maßnahmen (z.B. Steigerung der Sammelmengen von EAG, Weiterentwicklung von Recyclingtechnologien, Optimierung des Designs der Geräte für das Recycling usw.) identifizieren, die zu einer verstärkten Nutzung der vorhandenen Sekundärrohstoffpotentiale beitragen können. Es lässt sich auch festhalten, dass ein verbessertes Systemverständnis notwendig ist, um solche Maßnahmen zielorientiert zu setzen. Diese Basis für eine optimierte Bewirtschaftung wäre in Zukunft anhand belastbarer SFA zu legen. Die groben Rohstoff-Bilanzen, die in dieser Studie für Neodym, Niob und Palladium erstellt wurden, stellen einen ersten Schritt in diese Richtung dar, sind jedoch keineswegs ausreichend.

7 Literatur, Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

7.1 Literaturverzeichnis

Achzet, B.; Reller, A.; Zepf, V. (2011): Materials critical to the energy industry. An introduction. ON Communication.

Amatayakul, W.; Ramnäs, O. (2001): Life cycle assessment of a catalytic converter for passenger cars, Journal of Cleaner Production, 9(5), 395–403.

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. Fraunhofer-ISI „Innovationspotenziale“. Stuttgart, Deutschland: Fraunhofer Verlag.

Baccini P. und Bader H.-P. (1996): Regionaler Stoffhaushalt. Erfassung, Bewertung und Steuerung. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford.

Baccini P. und Brunner P.H. (1991): Metabolism of the Antroposphere. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Bardt, H. (2011): Recycling gegen Rohstoffrisiken? Rohstoffsicherung als Herausforderung für den Industriestandort Deutschland. Recycling und Rohstoffe, Band 4, Thome-Kozmiensky, K. J. and D. Goldmann (Hrsg.). Neuruppin, Deutschland: TK Verlag Karl Thome-Kozmiensky, 15–21.

BDI, Bundesverband der deutschen Industrie (2007): Rohstoffsicherheit - Anforderungen an Industrie und Politik.

BGS, British Geological Survey (2011): Rare Earth Elements Profile.

BITKOM (2011a): Presseinformation - Tablet Computer erobern den Massenmarkt.

BITKOM (2011b): Presseinformation - 83 Millionen Alt-Handys.

BITKOM (2010): Die Zukunft der digitalen Consumer Electronics - 2010.

bmvit (2010): Strategie und Instrumente sowie prioritäre Anwender-und Einsatzbereiche für den Nationalen Einführungsplan Elektromobilität.

Bradsher, Keith (2010): After China's Rare Earth Embargo, a New Calculus. The New York Times 2010, 29.10.2010.

Bringezu, Stefan et al. (2011): Metallische Rohstoffe, weltweite Wiedergewinnung von PGM und Materialien für Infrastrukturen, Abschlussbericht des Arbeitspakets 2 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung” (MaRess).
http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/abschlussberichte_der_aps/index.html.

Brown, T. J.; Idoine, N. E.; Mills, A. J.; Shaw, R. A.; Hobbs, S. F.; Bide, T. (2012a): European Mineral Statistics 2006–2010 (A product of the World Mineral Statistics Database), British Geological Survey. Keyworth, Nottingham.
http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/europeanStatistics.html.

Brown, T. J.; Walters, A. S.; Idoine N. E.; Shaw, R. A., Wrighton, C.E.; Bide, T. (2012b): World Mineral Production 2006–2010, British Geological Survey.
http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldStatistics.html.

Brunner, Paul H.; Rechberger, Helmut (2004): Practical Handbook of Material Flow Analysis. CRC Press, Raton, Florida, USA: Lewis Publishers (2004).

Brunner, Paul H.; Rechberger, Helmut et al. (2012): VU Urbaner Stoffhaushalt – Methodik, *https://tiss.tuwien.ac.at/education/course/documents.xhtml?windowId=5ff&courseNr=225023&semester=2012S*.

Bryce, Robert (2010): The Lanthanides, China, and High-Tech Autos. (Actually High-Tech Everything).

Bublies, T. (2006): Ressourcengeographie des Metalls Indium – Raum-zeitliche Verflechtungen und Stoffströme.Manuskripte - Geographica Augustana, 1. Augsburg, Deutschland: Institut für Geographie, Universität Augsburg.

Buchert, Matthias; Jenseit, Wolfgang; Dittrich, Stefanie; Hacker, Florian (2011): Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität.

Buchert, Matthias; Manhart, Andreas; Bleher, Daniel; Pingel, Detlef (2012): Recycling critical raw materials from waste electronic equipment. Öko-Institut e.V., Darmstadt.

Buckley, Chris (2010): China's dream for rare earths rests on grim costs. Hg. v. Reuters.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2007): Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe für Metall- und Nichtmetallrohstoffe. Hannover: BGR.
http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Rohstoffwirtschaft/rohstoffwirtschaft_node.html

Bundesministerium für Gesundheit (2009): Gesundheit und Krankheit in Österreich. Gesundheitsbericht Österreich 2009.

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2011): Bundesabfallwirtschaftsplan (BAWP) 2011, 68 f. *http://www.bundesabfallwirtschaftsplan.at/.*

Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend (2010): Österreichisches Montan-Handbuch 2010. Bergbau-Rohstoffe-Grundstoffe-Energie.

Castor, Stephen B.; Hedrick, James B. (2006): Rare Earth Elements. Industrial Minerals and Rocks.

Chancerel, P. et al. (2009): Assessment of precious metal flows during preprocessing of waste electrical and electronic equipment. Journal of Industrial Ecology, 13, 791–810.

Chancerel, P. (2010): Substance flow analysis of the recycling of small waste electrical and electronic equipment. Institut für Technischen Umweltschutz, TU Berlin.

Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions - Tackling the challenges in commodity markets and on raw materials.
http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/communication_en.pdf.

degudent.de (2012)

Department of Mining and Tunnelling, University of Leoben (2004): Minerals Planning Policies and Supply Practices in Europe.

Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde (2000): Wissenschaftliche Stellungnahme: Palladiumlegierungen.
http://www.agz-rnk.de/agz/download/3/palladiumlegierung.pdf.

Döberl, G., Fehringer, R., Müller, B., Brandt, B. und Brunner, P. H. (2004): Verknüpfung Rohstofflager – anthropogene Lager – letzte Senken. Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, TU Wien, Bericht für Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit.

D'Souza et al. (2011): Life Cycle Assessment of Electricity Production from a Vestas V112 Turbine Wind Plant.

Du, Xiaoyue; Graedel, T. E. (2011a): Global In-Use Stocks of the Rare Earth Elements: A First Estimate. Environmental Science and Technology, 45, 4096–4101.

Du, Xiaoyue; Graedel, T. E. (2011b): Global Rare Earth In-Use Stocks in NdFeB Permanent Magnets. Journal of Industrial Ecology 15 (6), 836–843.

Eggert, Peter (2012): Niob - ein junges Legierungsmetall hat sich auf dem Weltmarkt etabliert, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung DIW Berlin.
http://www.diw.de/deutsch/99_45_2/30967.html.

Elsner, Harald (2011): Kritische Versorgungslage mit schweren Seltenen Erden … Entwicklung „Grüner Technologien“ gefährdet?

Emsley, John (2001): Nature's building blocks. An A-Z guide to the elements. Oxford, New York: Oxford University Press.

Environmental Performance Index, Yale University. *http://epi.yale.edu/* (2012).

Erdmann, Lorenz; Graedel, Thomas E. (2011): Criticality of Non-Fuel Minerals: A Review of Major Approaches and Analyses. Environ. Sci. Technol 45 (18), 7620–7630.

European Commission (2008): The raw materials initiative - meeting our critical needs for growth and jobs in Europe.

European Commission (2010): Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials.
http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index_de.htm

Eurostat (2010): External Trade.

Fellner, J. et al. (2007): Entwicklung innovativer Konzepte für die Etablierung einer stoffstrom-orientierten Abfallwirtschaft (EIKESA). Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, TU Wien, Auftraggeber: Abteilung Umweltwirtschaft und Raumordnungsförderung – RU3 der Niederösterreichsichen Landesregierung.

finanzen.net (2012): Rohstoff Charts.

Gattringer, Claudia (2012): Stoffflussanalyse von Neodym in Hochtechnologieanwendungen für Österreich, Diplomarbeit am Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, TU Wien.

Gerst, M. D.; Graedel,T. E. (2008): In-Use Stocks of Metals: Status and Implications. Environmental Science & Technology, 42(19), 7038-7045.

Gille, Gerhard; Meier, Andreas (2012): Recycling von Refraktärmetallen, Vortrag auf der Recycling- und Rohstoffkonferenz 2012 in Berlin (Band 5 der Recycling- und Rohstoffkonferenz 2012).

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.

Graedel, T. E., Bertram, M., Fuse, K., Gordon, R. B., Lifset, R., Rechberger, H. und Spatari, S. (2002). The contemporary European copper cycle: The characterization of technological copper cycles. Ecological Economics, 42(1-2), 9-26.

Graedel, T. E. (2010): Metal Stocks in Society. UNEP Report.

Graedel, T. E.; Nassar, Nedal T.; Barr, Rachel; Browning, Matthew; Diao, Zhouwei; Friedlander, Elizabeth et al. (2011): Criticality of the Geological Copper Family. Environ. Sci. Technol 46 (2), 1071–1078.

Graedel, T. E. (2011): On the Future Availability of the Energy Metals. Annual Review of Materials Research 41 (1), 323–335.

Graedel, T. E. et al. (2011a): What do we know about metal recycling rates? Journal of Industrial Ecology, 15, 355–366.

Greve, B.; Raulin, C. (2011): Der Nd:YAG-Laser im Wandel der (Impuls-) Zeiten - Einsatzgebiete in der Dermatologie.

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. Adv. Mater 23 (7), 821–842.

Hagelüken, Christian (2005): Der Kreislauf der Platinmetalle – Recycling aus Katalysatoren. Sonderdruck aus: Hagelüken et al., Autoabgaskatalysatoren, Expert Verlag 2005. *http://www.preciousmetals.umicore.com/PMR/Media/spentAutocats/show_derKreislaufDerPlatinmetalle.pdf.*

Hagelüken, Christian (2008): Recycling von Autoabgaskatalysatoren, Metallurgisches Seminar Schriftenreihe der GDMB, Heft 115, 69-85.

Hagelüken, Christian (2009): Recycling von Autoabgaskatalysatoren, Metallurgisches Seminar Schriftenreihe der GDMB, Heft 121.

Hagelüken, C.; Buchert, M. (2010): Kritische MEtalle für Zukuntstechnologien und ihr Recyclingpotenzial. Präsentation: Materialforum Rhein-Main, Hanau 18.01.2010. *www.preciousmetals.umicore.com/PMR/Media/sustainability/show_kritischeMetalle.pdf.*

Hamor, Tamas (2004): Sustainable Mining in the European Union: The Legislative Aspect. Environmental Management 33 (2), 252–261.

Haring, Tapio; Forsman, Kimmo; Huhtanen, Tero; Zawadzki, Mark (2003): Direct drive – Opening a new era in many applications.

Hausmann, Markus (2005): Potential thermischer Verfahren zur stofflichen Abfallverwertung.

Hedbrant, J.; Sörme, L. (2001): Data vagueness and uncertainties in urban heavy-metal data collection. Water, Air, and Soil Pollution 1, 43–53.

Heinritzi, Johannes (2008): Seltene Substanzen vor Nachfrageboom. Hg. v. Focus.

Hornak, Joseph (2011): The Basics of MRI.

IG Windkraft (2011): Windkraft in Österreich. Die Energie des 21. Jahrhunderts.

info.worldbank.org/governance/wgi/sc_country.asp

Interaktives RohstoffInformationsSystem – Metallogenetische Karte von Österreich. http://geomap.geolba.ac.at/IRIS/einstieg.html.

Johnson, Matthey: Platinum 2004, Interim Review, London, Nov. 2004.

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

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

Key to metals (Datenbank für Metalle): *www.keytometals.com*

Kletzmayr, Walter (2012): VDI-Vortrag „Aktuelle Situation der SLF- und Altfahrzeugverwertung in Österreich".

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

Kooroshy, Jaakko; Meindersma, Christa; Podkolinski, Richard; Rademaker, Michel; Sweijs, Tim; Diederen, André et al. (2009): Scarcity of Minerals. A strategic security issue.

Kristof, Kora; Hennicke, Peter et al. (2010): Endbericht des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung" (MaRess). *http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/index.html*.

Kuriki, Shingo; Daigo, Ichiro; Matsuno, Yasunari; Adachi, Yoshihiro (2010): Recycling Potential of Platinum Group Metals in Japan, J. Japan Inst. Metals, Vol. 74, No. 12, 801–805.

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 machtvolles Instrument entdeckt. Das Ziel: Weltmarktführer im Hochtechnologiesektor werden. In: Die Zeit.

Leoni (2005): Leoni in Team. Automotive & Standard Cables (4).

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

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

Lutz, Ferdinand (2010): Die künftige Verfügbarkeit knapper, strategisch wichtiger Metalle, Risiken und Herausforderungen, Denkwerk Zukunft – Stiftung kuturelle Erneuerung, 2010 Major, R.H (Hg.) (1938): Santorio Santorio.
www.denkwerkzukunft.de/downloads/Verfügbarkeit_von_Metallen.pdf.

Mattenberger, H. et al. (2008): „Urban Mining" – Phosphor und Schwermetalle aus heimischer Produktion. DepoTech 2008 (Abfallwirtschaft, Abfalltechnik, Deponietechnik und Altlasten), Lorber, K. E. et al. (Hrsg.). Leoben, Österreich: Lehrstuhl für Entsorgungs- und Deponietechnik, Montanuniversität Leoben, VGE Verlag GmbH, Essen, Leoben, 153–158, 183-188.

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

Meskers, C. et al. (2009): Impact of pre-processing routes on precious metal recovery from PCs. Proceedings of the European Metallurgical Conference 2009, Harre, J. (Hrsg.). Innsbruck, Österreich: GDMB Informationsgesellschaft mbH, 527–540.

Meyer, Gerd (2001): Die (ungleichen) Didymium-Zwillinge: Praseodym und Neodym. Chemie in unserer Zeit 35 (2).

Mineral Commodity Summaries 2011. *http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2011/mcs2011.pdf*

Minerals Yearbook 2009.
http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tungsten/myb1-2009-tungs.pdf.

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

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.

MREL (2012): Metall Rare Earth Limited.

MRT open (2012).

Murphy&Spitz Research (2011): Position zu Neodym und Windkraftanlagen.

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

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?

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.

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

ÖNORM (2005a): ÖNORM S2096-1 Stoffflussanalyse Teil 1: Anwendung in der Abfallwirtschaft – Begriffe. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

ÖNORM (2005b): S 2096-2 Stoffflussanalyse: Anwendung in der Abfallwirtschaft – Methodik. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

ÖWAV (2003): ÖWAV Regelblatt 514 - Die Anwendung der Stoffflussanalyse in der Abfallwirtschaft. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (Hrsg.), Wien.

Oguchi, M., Murakami, S., Sakanakura, H., Kida, A. und Kameya, T. (2011): A preliminary categorization of end-of-life electrical and electronic equipment as secondary metal resources. Waste Management, 31(9-10), 2150–2160.

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. *http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0257.pdf.*

Raith, J. G. und S. Schmidt (2010): Tungsten deposit Felbertal, Salzburg, Austria. Acta Mineralogica-Petrographica, Field guide series 3, 1–24.

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

Rechberger, H. et al. (2008): Sustainable and safe re-use of municipal sewage sludge for nutrient recovery (SUSAN). Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft (IWRA), TU Wien, Bericht für Europäische Kommission.

Reck, B. K., Müller, D. B., Rostkowski, K. und Graedel, T. E. (2008): Anthropogenic Nickel Cycle: Insights into Use, Trade, and Recycling. Environmental Science and Technology, 42(9), 3394–3400.

Reischl, Gerald (2012): 3,3 Millionen Handys in einem Jahr. futurzone.at.

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

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

Runge, Antonia (2010): Modellierung der Lebensdauer von Systemen.

Rutherford (2006): Lexikon der Elemente. Häufigkeit der Elemente. *http://www.uniterra.de/rutherford/.*

Salhofer, S. et al. (2009): Verfahrensvergleich zur Gewinnung von Wertstoffen aus Elektroalt-geräten. Brennpunkt ElektroG: Umsetzung-Defizite-Notwendigkeiten, Bilitewski, B. (Hrsg.). Dresden, Deutschland: Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten, TU Dresden, 23–29.

Saurat, M. and Bringezu, S. (2008): Platinum Group Metal Flows of Europe, Part I. Journal of Industrial Ecology, 12, 754–767.

Saurat, M. and Bringezu, S. (2009): Platinum Group Metal Flows of Europe, Part II. Journal of Industrial Ecology, 13, 406–421.

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

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

Schneider, Jürgen; Karigl Brigitte et al. (2010): End of life vehicles: Legal aspects, national practices and recommendations for future successful approach, Directorate – General for Internal Policies – Policy Department, Economic and Scientific Policy, Environment, Public Health and Food Safety.
http://www.europarl.europa.eu/committees/en/studiesdownload.html?languageDocument=EN&file=34868

Schöller, G., Oberleitner, C., Fehringer, R., Döberl, G. und Brunner, P. H. (2006): Verknüpfung Rohstofflager – anthropogene Lager – letzte Senken im Bundesland Steiermark. Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfall-wirtschaft, TU Wien, Auftraggeber: Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung 19D.

Schüler, D., Buchert, M., Liu, R., Dittrich, S. und Merz, C. (2011): Study on Rare Earths and Their Recycling. Öko-Institut e.V., Darmstadt (Final Report for the Greens/EFA Group in the European Parliament).

scinexx.de/dossier-detail-443-12.html

Statista (2012a): *http://de.statista.com/statistik/daten/studie/171950/umfrage/anzahl-der-fernseher-im-haushalt/*.

Statista (2012b): *http://de.statista.com/statistik/daten/studie/198338/umfrage/anteil-der-tv-haushalte-in-deutschland-mit-flachbildfernseher-seit-2010/*.

Statistik Austria (2011a): Fahrzeug-Bestand am 31.12.2011.

Statistik Austria (2011b): Haushalte mit Computer 2011.

Statistik Austria (2011c): Ausstattungsgrad der privaten Haushalte - Zeitvergleich.

Statistik Austria (2012): Statistiken – Straße – Kraftfahrzeuge. *http://www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/index.html.*

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

Swiss Metal Assets S.A. (2012).

Tesar, M., Öhlinger A. (2012): Flachbildschirmaltgeräte – Anforderungen an die Behandlung und Status in Österreich, Umweltbundesamt.

Thalmann, F. et al. (1989): Geochemischer Atlas der Republik Österreich 1:1.000.000 Böhmische Masse und Zentralzone der Ostalpen (Bachsedimente < 0,18 mm). Wien: Geologische Bundesanstalt.

thewindpower.net (2012).

Tiess, Guenter (2010): Minerals policy in Europe: Some recent developments. Resources Policy 35 (3), 190–198.

Treibacher Industrie AG (2012).

USGS National Minerals Information Center (2012): Mineral Commodity Summaries 2012.

USGS National Minerals Information Center (2012): Rare earths.

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

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

Voestalpine (2012): Geschäftsbericht 2011/2012. *http://reports.voestalpine.com/1112/gb*.

Wäger, Patrick A.; Lang, Daniel J. (2010): Seltene Metalle. Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften.

Wang, T., Müller, D. B. und Graedel, T. E. (2007): Forging the Anthropogenic Iron Cycle-Environmental Science & Technology, 41(14), 5120-5129.

Wathanyu Amatayakul, Olle Ramnäs (2001): Life cycle assessment of a catalytic converter for passenger cars, Journal of Cleaner Production, Volume 9, Issue 5, 395-403.

Weber, L. (1997): Handbuch der Lagerstätten der Erze, Industrieminerale und Energierohstoffe Österreichs. Wien: Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt.

Weber, L.; Zsak, G.; Reichl, C.; Schatz, M. (2011): World-Mining-Data (26). Welt-Bergbau-Daten. Rohstoffproduktion, 26. Wien: Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, International Organizing Committee for the World Mining Congresses.

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

Wimmer, Harald (2012): Einflussfaktoren auf die Akzeptanz von Hybridautos. Zusammenfassung.

Wirtschaftskammer Österreich (WKO), Fachverband der Fahrzeugindustrie Österreichs (2012): Statistikjahrbuch des Fachverbandes der Fahrzeugindustrie Österreichs. http://wko.at/fahrzeuge/main_frame/statistik/JB/einstiegsseite.htm.

WISE-Uranium (2010). *http://www.wise-uranium.org/mdafko.html*.

World Steel Association, Statistics archive. *worldsteel.org/statistics/statistics-archive.html* (2012).

7.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Auflistung der kritischen Rohstoffe auf EU-Ebene (in alphabetischer Reihenfolge) 9

Tabelle 2 Schwankungsbereiche nach Kategorien und Berechnung der jeweiligen Standardabweichung 19

Tabelle 3 Produktionsdaten von Neodym (Quellen: Angerer et al. 2009, Lutz 2010; USGS 2012) 20

Tabelle 4 Molmassenkonzentration NdFeB in Permanentmagneten 23

Tabelle 5 Hersteller in Österreich installierter WKA inkl. Marktanteil und berechneter Leistung 26

Tabelle 6 Abschätzung des Magnetbedarfs für Permanentmagnet-Generatoren in WKA 26

Tabelle 7 Recherchierte Information zur Verwendung von NdFeB-Permanentmagneten verschiedener Hersteller 27

Tabelle 8 Behandlung der einzelnen Komponenten einer WKA nach der Demontierung (D'Souza et al 2011) 28

Tabelle 9 Quantifizierte Flüsse und Lager im Prozess Windkraftwerke im System Neodym in Österreich (2011) 29

Tabelle 10 Projektion des globalen Rohstoffverbrauchs für die Herstellung von Nd:YAG-Kristallen zur Laser-Materialverarbeitung (Angerer et al. 2009). 30

Tabelle 11 Der Literatur entnommene Schätzungen zu den Neodym-Gehalten der Hybrid-Fahrzeuge 34

Tabelle 12 Verkaufszahlen Elektrofahrräder in Österreich nach Jahren (VCÖ 2011) 34

Tabelle 13 Quantifizierte Flüsse und Lager der Elektroautos im Prozess Private Haushalte im System Neodym in Österreich (2011) 35

Tabelle 14 Quantifizierte Flüsse und Lager der Hybridautos im Prozess Private Haushalte im System Neodym in Österreich (2011) 35

Tabelle 15 Quantifizierte Flüsse und Lager der Elektrofahrräder im Prozess Private Haushalte im System Neodym in Österreich (2011) 36

Tabelle 16 Magnetgehalte von Festplatten 36

Tabelle 17 Quantifizierte Flüsse und Lager für Festplatten im Prozess Private Haushalte im System Neodym in Österreich (2011) 38

Tabelle 18 Geschätzte Neodym-Mengen eines Smartphones (Buchert et al. 2012). 39

Tabelle 19 Quantifizierte Flüsse und Lager der Mobiltelefone im Prozess Private Haushalte im System Neodym in Österreich (2011) 40

Tabelle 20 Quantifizierte Flüsse und Lager für Lautsprecher im Prozess Private Haushalte im System Neodym in Österreich (2011) 41

Tabelle 21 Flüsse und Lager DVD-Player und -Laufwerke im Prozess Private Haushalte im System Neodym in Österreich (2011) 42

Tabelle 22 Geschätzte Abfallmengen pro Produktgruppe im Prozess Abfallwirtschaft, geschätzt über das Anfallpotential im System Neodym in Österreich (2011) 47

Tabelle 23 Angenommene Entwicklung des Hybridauto-Lagers bis 2020 im „realistischen Szenario“ und im „Worst-case-Szenario“ 54

Tabelle 24 Perzentilwerte zur Abbildung der Lebensdauer verschiedener Produktgruppen als Grundlage zur Ermittlung der entsprechenden Weibull-Verteilungen 56

Tabelle 25 Recyclingpotential für Neodym im Prozess Windkraft und in einigen Produkten aus dem Prozess Private Haushalte nach Jahren 57

Tabelle 26 Produktionsdaten von Niob (Quelle: Lutz 2010) 60

Tabelle 27 Niobgehalte von Niob-hältigen Stahlsorten nach ihrer Verwendung 63

Tabelle 28 Rohstahlproduktion, Ferroniob- und Niob-Bedarf in der Voestalpine und in ganz Österreich im Jahr 2011 64

Tabelle 29 Zahlen zu Rohstahlproduktion, Ferroniob und Niob in der Stahlindustrie in ganz Österreich im Jahr 2011 64

Tabelle 30 Quantifizierte Flüsse und Lager der Niob-hältigen Stähle im Prozess Industrie & Gewerbe im System Niob in Österreich (2011) 65

Tabelle 31 Quantifizierte Flüsse der Niob-Verarbeitung bei der Firma Plansee im Prozess Industrie & Gewerbe im System Niob in Österreich (2011) 66

Tabelle 32 Quantifiziertes Lager der NMR-Geräte im Prozess Industrie & Gewerbe im System Niob in Österreich (2011) 69

Tabelle 33 MR-Geräte > 1 Tesla und < 1 Tesla in Österreich aufgeschlüsselt nach Bundesländern 72

Tabelle 34 Quantifizierter Fluss und Lager der NMR-Geräte im Prozess Industrie & Gewerbe im System Niob in Österreich (2011) 74

Tabelle 35 25-Euro-Bimetallmünzen 74

Tabelle 36 Quantifizierte Flüsse und Lager der NMR-Geräte im Prozess Industrie & Gewerbe im System Niob in Österreich (2011) 75

Tabelle 37 Quantifizierte Flüsse und Lager der Niob-hältigen Stähle im Prozess Private Haushalte & Infrastruktur im System Niob in Österreich (2011) 76

Tabelle 38 Quantifizierter Fluss und Lager der Niob-hältigen Stähle im Prozess Private Haushalte & Infrastruktur im System Niob in Österreich (2011) 77

Tabelle 39 Produktionsdaten von Palladium (Quellen: Lutz 2010; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2007) 86

Tabelle 40 Daten zum Pkw-Bestand und den Pkw-Neu- und Gebrauchtzulassungen von Statistik Austria, Pkw-Abmeldungen wurden daraus berechnet. 91

Tabelle 41 Daten zu den „endgültigen“ Pkw-Abmeldungen, berechnet aus Daten von Statistik Austria 92

Tabelle 42 Daten zum österreichischen Import und Export von neuen Pkw im Jahr 2011 vom Fachverband der Fahrzeugindustrie Österreichs der WKO aus deren Außenhandelsdatenbank 93

Tabelle 43 Bestand an Pkw Kl. M1 nach Antriebsart (in Stück) (Quelle: WKO 2012, Statistik Austria 2012) 94

Tabelle 44 Daten zum österreichischen Import und Export von gebrauchten Pkw im Jahr 2011 vom Fachverband der Fahrzeugindustrie Österreichs der WKO aus deren Außenhandelsdatenbank 94

Tabelle 45 „Das Autojahr 2011 in Österreich“ aus dem VDI-Vortrag „Aktuelle Situation der SLF- und Altfahrzeugverwertung in Österreich“ von Ing. Walter Kletzmayr im Juni 2012 ... 95

Tabelle 46 Bestand an Pkw Kl. M1 nach Antriebsart (in Stück) (Quelle: WKO 2012, Statistik Austria 2012) 97

Tabelle 47 Bestand an Pkw Kl. M1 nach Antriebsart (in Stück) (Quelle: WKO 2012, Statistik Austria 2012) 98

Tabelle 48 Quantifizierte Flüsse und Lager der Kfz-Katalysatoren im Prozess Private Haushalte im System Palladium in Österreich (2011) 100

Tabelle 49 Quantifizierte Flüsse und Lager der Mobiltelefone im Prozess Private Haushalte im System Palladium in Österreich (2011) 103

Tabelle 50 Palladium in Leiterplatten von Notebooks (Quelle: Buchert et al., Öko-Institut 2012)103

Tabelle 51 Quantifizierte Flüsse und Lager der Notebooks im Prozess Private Haushalte im System Palladium in Österreich (2011) 104

Tabelle 52 Verkaufszahlen für LCD-Bildschirme in Deutschland aus der Literatur und die daraus hochgerechneten Werte für Österreich 105

Tabelle 53 Quantifizierte Flüsse und Lager der Flachbildschirme im Prozess Private Haushalte im System Palladium in Österreich (2011) 106

Tabelle 54 Quantifizierte Flüsse der Kfz-Katalysatoren im Prozess Industrie & Gewerbe im System Palladium in Österreich (2011) 109

Tabelle 55 Quantifizierte Flüsse und Lager der Kfz-Katalysatoren im Prozess Industrie & Gewerbe im System Palladium in Österreich (2011) 112

7.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Darstellung der wirtschaftlichen Bedeutung und des Versorgungsrisikos kritischer Elemente für die EU (Abbildung aus Critical raw materials for the EU (Europäische Kommission 2010)) 9

Abbildung 2 Darstellung der wirtschaftlichen Bedeutung und des Versorgungsrisikos kritischer Elemente für Österreich und die EU (Abbildung auf Grundlage von Daten aus Angerer et al. (2009) und Weber et al. (2011). 14

Abbildung 3 Globale Verwendung von Neodym im Jahr 2010 (Buchert et al. 2011) 21

Abbildung 4 Anwendungen der NdFeB-Magnete 2009 (Moss et al. 2011) 21

Abbildung 5 Zeitliche Entwicklung der Permanentmagnete gegen die Energiedichte (Gutfleisch et al. 2011) 23

Abbildung 6 Installierte Leistung Windkraft in Österreich nach Herstellern, Stand Dezember 2011 (IG Windkraft, 2011). 25

Abbildung 7 Lebenszyklus einer Windturbine (D'Souza et al. 2011) 28

Abbildung 8 Stoffflussbild Neodym in Österreich (2011) 49

Abbildung 9 Subsystem Private Haushalte im System Neodym in Österreich (2011) 50

Abbildung 10 Subsystem Abfallwirtschaft im System Neodym in Österreich (2011) 51

Abbildung 11 Weibull-Verteilung für Elektrofahrzeuge 53

Abbildung 12 Recyclingpotential Hybridautos im „realistischen Szenario“ (blau) und im „Worst-case-Szenario“ (rot) 55

Abbildung 13 Darstellung des zukünftigen Recyclingpotentials aller erstellten Szenarien 56

Abbildung 14 Verwendung von Niob (Angerer et al. 2009; Gille, Maier 2012) 61

Abbildung 15 Stoffflussbild Niob in Österreich (2011) 80

Abbildung 16 Subsystem Industrie & Gewerbe im System Niob in Österreich (2011) 81

Abbildung 17 Subsystem Private Haushalte & Infrastruktur im System Niob in Österreich (2011) .. 82

Abbildung 18 Anwendungsgebiete von Palladium (Angerer et al. 2009) 87

Abbildung 19 Bruttobedarf an Platin, Palladium und Rhodium für Autokatalysatoren in Europa 90

Abbildung 20 Bestand an Pkw Kl. M1 in den Jahren 1980 – 2011 nach Antriebsart (Anteile in %) (Quelle: WKO 2012) 99

Abbildung 21 Stoffflussbild Palladium in Österreich (2011) 113

Abbildung 22 Subsystem Private Haushalte im System Palladium in Österreich (2011) 115

Abbildung 23 Subsystem Industrie & Gewerbe im System Palladium in Österreich (2011) 116