



# Kritische Rohstoffe für die Hoch- technologieanwendung in Österreich

S. Luidold et al.

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

# 11/2013

## **Impressum:**

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Leiter: DI Michael Paula

[www.NachhaltigWirtschaften.at](http://www.NachhaltigWirtschaften.at)

# Kritische Rohstoffe für die Hoch- technologieanwendung in Österreich

Dipl.-Ing. Dr.mont. Stefan Luidold et al.

Lehrstuhl für Rohstoffmineralogie der MUL

Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und  
Bergwirtschaft der MUL

Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredelung der MUL

Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie der MUL

Institut für nachhaltige Abfallwirtschaft und  
Entsorgungstechnik der MUL

Außeninstitut der MUL

Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und  
Abfallwirtschaft der TU Wien

Institut für Abfallwirtschaft der BOKU Wien

Wien, April 2013

Bearbeitung:

**Lehrstuhl für Rohstoffmineralogie, Montanuniversität Leoben**

M. Kozlik  
J. G. Raith

**Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft, Montanuniversität Leoben**

A. Janisch  
P. Moser  
R. Treimer

**Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredelung, Montanuniversität Leoben**

H. Flachberger  
C. Streicher

**Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie, Montanuniversität Leoben**

T. Angerer  
H. Antrekowitsch  
M. Kaindl  
S. Luidold (Mail: stefan.luidold@unileoben.ac.at; Tel.: +43 (0) 3842 402 5220)  
A. Poscher  
P. Stuhlpfarrer

**Institut für nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik, Montanuniversität Leoben**

M. Lampert  
R. Pomberger  
M. Prommegger  
R. Sarc

**Außeninstitut, Montanuniversität Leoben**

R. Hermann

**Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, Technische Universität Wien**

C. Gattringer  
D. Laner  
H. Rechberger  
G. Schlosser

**Institut für Abfallwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien**

P. Mostbauer  
S. Salhofer

## Vorbemerkung

Die Verfügbarkeit der fossilen Energieträger Öl, Gas und Kohle ist bereits seit den Ölpreisschocks 1973 und 1979/80 ein vielbeachtetes Thema, während das Risiko der Rohstoffversorgung erst in den letzten Jahren in der Politik und Öffentlichkeit in den Blickpunkt des Interesses rückte. Hohe Preise, starke Preisschwankungen, Lieferengpässe sowie restriktive Handelspolitiken verdeutlichen die Risiken für die österreichische Rohstoffversorgung und die Bedeutung einer sicheren Rohstoffversorgung für Produktion und Wachstum. Ziel ist es die Abhängigkeit der heimischen Industrie von Kritischen Rohstoffen und potentiell Kritischen Rohstoffen zu verringern.

Mit dieser im Rahmen des Programms „Produktion der Zukunft“ finanzierten Studie, wurde der Grundstein für den Forschungsschwerpunkt „Rohstoffe, Recycling und Substitution“ in Österreich gelegt. Durch die Einbindung relevanter Institute und Lehrstühlen an österreichischen Universitäten konnte ein umfassender Überblick über die Situation in Hinblick weltweiter Entwicklungen ausführlich dargestellt werden.

Wir möchten hiermit allen involvierten Stakeholdern herzlich für die Mitwirkung zu diesem Endergebnis danken und wünschen Ihnen nun viel Freude am Lesen!

DI Theodor Zillner

Leitung Thementeam Ressourcen

MMag. Fritz Fahringer

stv. Leitung Thementeam Ressourcen



<b>1.</b>	<b>Kurzfassung .....</b>	<b>5</b>
1.1	Geologie ausgewählter kritischer Rohstoffe .....	6
1.2	Bergbau .....	7
1.3	Aufbereitung .....	8
1.4	Primärmetallurgie .....	9
1.5	Anwendungen .....	10
1.6	Stoffflussanalysen .....	10
1.7	Abfallwirtschaft .....	11
1.8	Verwertung/Sekundärmetallurgie .....	14
1.9	Handlungsbedarf und -empfehlungen .....	15
1.10	Literatur .....	17
<b>2.</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>18</b>
<b>3.</b>	<b>Relevanz der Rohstoffe für die österreichische Industrie.....</b>	<b>20</b>
3.1	Ermittlung der wirtschaftlichen Bedeutung .....	22
3.2	Ermittlung des Versorgungsrisikos .....	22
3.3	Ermittlung des umweltpolitischen Risikos.....	23
3.4	Auswahl der im Detail untersuchten Rohstoffe.....	24
3.5	Literatur .....	27
<b>4.</b>	<b>Geologie ausgewählter kritischer Rohstoffe .....</b>	<b>28</b>
4.1	Antimon .....	29
4.2	Germanium.....	33
4.3	Grafit.....	36
4.4	Niob und Tantal .....	39
4.5	Platingruppenelemente .....	43
4.6	Seltene Erdelemente .....	46
4.7	Vanadium .....	49
4.8	Wolfram .....	53
4.9	Danksagung .....	58

4.10	Literatur .....	58
<b>5.</b>	<b>Bergbau .....</b>	<b>64</b>
5.1	Allgemeines zur bergtechnische Charakterisierung .....	67
5.2	Bergtechnische Charakterisierung ausgewählter Mineralrohstoffvorkommen in Österreich .....	70
5.3	„Deposit-to-Mill“-Konzepte – Bergbauplanungskonzepte ausgewählter Mineralrohstoffvorkommen in Österreich.....	105
5.4	Danksagung .....	112
5.5	Literatur .....	112
<b>6.</b>	<b>Aufbereitung.....</b>	<b>115</b>
6.1	Wolfram .....	115
6.2	Seltene Erden.....	117
6.3	Tantal und Niob .....	120
6.4	Vanadium .....	122
6.5	Cobalt .....	123
6.6	Strategieentwicklung .....	123
6.7	Literaturverzeichnis .....	130
<b>7.</b>	<b>Primärmetallurgie .....</b>	<b>132</b>
7.1	Gewinnung der Refraktärmetalle.....	133
7.2	Gewinnung der Seltenen Erden .....	139
7.3	Produktion von Edelmetallen.....	142
7.4	Literatur .....	144
<b>8.</b>	<b>Einsatzgebiete von kritischen Rohstoffen.....</b>	<b>146</b>
8.1	Anwendungsfelder von Refraktärmetallen.....	146
8.2	Verwendung von Seltenen Erden.....	150
8.3	Einsatzgebiete der Edelmetalle .....	153
8.4	Literatur .....	156
<b>9.</b>	<b>Stoffflussanalysen .....</b>	<b>158</b>
9.1	Hintergrund.....	159
9.2	Ziele und Fragestellungen .....	160

9.3	Kritikalitätsbeurteilung für Österreich und Auswahl der Stoffe für die Stoffflussanalysen (SFA).....	161
9.4	Methode .....	163
9.5	Stoffflussanalyse für Neodym.....	165
9.6	Stoffflussanalysen für Niob.....	178
9.7	Stoffflussanalyse für Palladium .....	186
9.8	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	194
9.9	Literatur .....	199
<b>10.</b>	<b>Abfallwirtschaft .....</b>	<b>203</b>
10.1	Altfahrzeuge .....	204
10.2	Elektroaltgeräte als Rohstoff .....	221
10.3	Windkraftanlagen .....	232
10.4	Workshop „Seltene Rohstoffe“ .....	237
10.5	Literatur .....	242
<b>11.</b>	<b>Verwertung/Sekundärmetallurgie .....</b>	<b>249</b>
11.1	Recycling von Wolfram.....	252
11.2	Sekundärmetallurgie von Niob und Tantal .....	254
11.3	Recycling von Seltenen Erden .....	256
11.4	Sekundärmetallurgie der Edelmetalle.....	258
11.5	Literatur .....	262
<b>12.</b>	<b>Handlungsbedarf und -empfehlungen .....</b>	<b>264</b>
12.1	Empfehlungen hinsichtlich Forschung und Entwicklung:.....	264
12.2	Weitere Empfehlungen: .....	265

## **Anhang:**

<b>1.</b>	<b>Allgemeine Lagerstättentypen der ausgewählten kritischen Rohstoffe .....</b>	<b>268</b>
1.1	Antimon .....	268
1.2	Germanium.....	269

1.3	Grafit.....	270
1.4	Niob und Tantal .....	271
1.5	Platingruppenmetalle.....	272
1.6	Elemente der Seltenen Erden .....	273
1.7	Vanadium .....	275
1.8	Wolfram .....	276
1.9	Literatur .....	278
<b>2.</b>	<b>Stoffflüsse ausgewählter kritischer Rohstoffe.....</b>	<b>281</b>
2.1	Neodym .....	281
2.2	Niob .....	305
2.3	Palladium.....	321
2.4	Literatur .....	345

# 1. Kurzfassung

Rohstoffe sind für die Wirtschaft und somit in weiterer Folge für die moderne Gesellschaft von enormer Bedeutung, da sie nicht nur für die Industrie, sondern auch für die Infrastruktur und die Produkte des alltäglichen Lebens erforderlich sind. Während die Verfügbarkeit der Energieträger Öl, Gas und Kohle seit den Ölkrisen in den 1970er viel Beachtung fand, wurde die Notwendigkeit einer gesicherten Rohstoffversorgung aufgrund einer langanhaltenden Periode stabiler und niedriger Preise vernachlässigt. Aus diesem Grund konzentrierte sich die primäre bergbauliche Produktion auf bestimmte Lagerstätten in einigen wenigen Ländern. Die sich daraus ergebende Importabhängigkeit der meisten westlichen Staaten wurde bereits 2000 anhand einer Preisexplosion für Tantal und 2010–2011 für Seltene Erden aufgezeigt.

Um zukünftig Versorgungsengpässe zu vermeiden, starteten nunmehr zahlreiche Aktivitäten, beispielsweise auf EU-Ebene und auch in Österreich. Dabei ist zu bedenken, dass die geologischen Ressourcen grundsätzlich nahezu unbegrenzt sind, da derzeit erst einige Prozent der Erdoberfläche und des oberflächennahen Untergrunds (bis wenige km Tiefe) im Detail erkundet sind und daher enormes Potenzial für die Entdeckung neuer Lagerstätten gegeben ist. Jedoch kann die bergbauliche Produktion nicht rasch und flexibel dem Bedarf folgen, da die Entwicklung entsprechender Projekte lange Zeiträume (10–25 Jahre) in Anspruch nimmt und darüber hinaus speziell einige Metalle für den Hochtechnologiebereich (In, Ga, Ge, etc.) keine eigenen Erze bilden, sondern sich nur als Nebenprodukt bei der Herstellung von Massenmetallen (wie Kupfer, Zink, Blei oder Aluminium) gewinnen lassen. Der Bericht einer Arbeitsgruppe der EU [Ad-hoc Working Group 2010] ergab, dass sich die 41 untersuchten mineralischen Rohstoffe in drei wesentliche Gruppen einteilen lassen, wobei insgesamt 14 (Seltene Erden, Platingruppenmetalle, Germanium, Niob, Antimon, etc.) bezüglich ihrer Versorgungssicherheit als kritisch eingestuft wurden. Darüber hinaus soll nun diese EU-Studie im Rahmen der Ausschreibung No 147/PP/ENT/CIP/12/F/S01C02 "Raw Materials: Study on Critical Raw Materials at EU Level" der Europäischen Kommission auf Gold, Hafnium, Silber, Selen, Kalilauge, Phosphatgestein, Zinn und bis zu fünf weiteren nichtenergetischen Rohstoffen ausgedehnt werden.

Nachdem die Sicherung der Rohstoffverfügbarkeit auch für Österreich von besonderer Wichtigkeit ist, startete das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Jahr 2011 die Forschungs-, Technologie- und Innovations-Initiative „Intelligente Produktion“, welche sich unter anderem mit der Bedeutung der kritischen Rohstoffe für die industrielle und technologische Entwicklung in Österreich beschäftigt. Die heimische Sachgüterindustrie erwirtschaftet mit rund 640.000 Beschäftigten rund 50 Milliarden Euro an Bruttowert-

schöpfung und daher ist die Herstellung von international konkurrenzfähigen Produkten ein wesentlicher Beitrag zur Aufrechterhaltung des erreichten nationalen Wohlstands. Im Rahmen dieser Studie wurde der Istzustand der Hochtechnologierohstoffe in Österreich über den gesamten Produktlebenszyklus dieser Rohstoffe von den geologischen und urbanen Lagerstätten über den Abbau und die Aufbereitung, ihre Verarbeitung (Metallurgie) und Anwendung bis hin zum Recycling bzw. der Entsorgung oder Dissipation in der Umwelt erhoben. Darauf aufbauend erfolgte die Ausarbeitung von Maßnahmen und Handlungsempfehlungen, um zukünftigen Versorgungsengpässen bestmöglich entgegenzuwirken.

## **1.1 Geologie ausgewählter kritischer Rohstoffe**

Basierend auf einer Auswahl von kritischen Ressourcen für Österreichs Hochtechnologie-Industrie wurden neun der als kritisch eingestuften mineralischen Rohstoffe hinsichtlich der im internationalen Kontext bedeutendsten Lagerstättentypen beschrieben. In einem weiteren Schritt erfolgte die Abschätzung des jeweiligen geologischen Potenzials (Geopotenzial) dieser Rohstoffe für Österreich. Es fand eine Zuordnung der untersuchten Rohstoffe hinsichtlich des Geopotenzials zu drei Gruppen statt.

Die erste Gruppe umfasst Rohstoffe mit hohem Geopotenzial, wie z.B. Wolfram und Grafit. Sie werden auch heute noch in Österreich bergbaulich gewonnen und für diese kann, entsprechende Investitionen in Prospektion und Exploration vorausgesetzt, damit gerechnet werden, neue Lagerstätten zu finden und zu erschließen. Dies lässt sich am Beispiel von Wolfram zeigen. Österreich stellt global einen der größten Wolframproduzenten dar und erzeugte im Jahr 2010 insgesamt 2 % der Jahresweltproduktion [USGS 2012]. Die zweite Gruppe umfasst Rohstoffe, für die das Geopotenzial vernachlässigbar bzw. nicht gegeben ist. Auf Grund der geologischen Gegebenheiten kann z.B. nicht damit gerechnet werden, dass es in Österreich Lagerstätten der Seltenen Erdelemente in Karbonatiten oder Alkaligesteins-Komplexen gibt. Auch die seltenen Vorkommen von Platingruppenelementen in ultramafischen Gesteinen sind lediglich von mineralogischem Interesse. Bei dieser zweiten Gruppe ist davon auszugehen, dass Österreich auch in Zukunft zu 100 % auf Importe aus dem Ausland angewiesen sein wird (die Gewinnung aus Sekundärrohstoffen wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt). Die dritte Gruppe umfasst Rohstoffe, bei denen das geologische bzw. wirtschaftliche Potenzial sich nicht so einfach abschätzen lässt. Sie beinhaltet einerseits Metalle wie Antimon, bei denen es historischen Bergbau in Österreich gab, wobei aber der Typus von Lagerstätten (z.B. strukturgebundene Vererzungen) im internationalen Vergleich heute eher unbedeutend ist. Hier könnte allerdings das mögliche Auftreten von Antimon in Verbindung mit Edelmetallen wie Gold in polymetallischen Lagerstätten interessant sein. Weitere Rohstoffe mit wenig bekanntem und daher zu untersuchendem Geopotenzial sind

die an Pegmatite und Granite gebundenen Elemente Niob und Tantal. Es bleibt zu klären, ob es in Österreich größere Nb-Ta-Vorkommen gibt und inwieweit diese Elemente in den Lithiumpegmatiten in den Ostalpen angereichert sind. Auch für die Sondermetalle Germanium, Gallium, Indium ist ein gewisses Geopotenzial vorhanden. Eine wirtschaftliche Gewinnung dieser Sondermetalle aus Primärquellen scheint allerdings nur für den Fall einer Wiederaufnahme des Pb-Zn-Bergbaus in Österreich möglich. Das Geopotenzial hinsichtlich orthomagmatischer V-Lagerstätten wird als eher gering eingestuft. Alternative primäre Quellen wie Öl- und Schwarzschiefer sollten allerdings genauer untersucht werden. Aufgrund der zu erwartenden steigenden Rohstoffnachfrage, vor allem im Bereich der Hochtechnologie-Anwendungen, muss zukünftig trotz steigender Bemühungen zur Nutzung sekundärer Rohstoffe (z.B. durch Recycling) die Primärrohstoffproduktion forciert werden. Vor allem wird es als notwendig erachtet, bekannte als „bedingt sicherungswürdig“ und „sicherungswürdig“ eingestufte Lagerstätten detaillierter zu explorieren und in weiterer Folge standortspezifische Modellberechnungen bezüglich des jeweiligen „break-even-points“ zu erstellen, unter welchen marktwirtschaftlichen Bedingungen eine Gewinnung dieser potenziellen Lagerstätten rentabel wäre.

## 1.2 Bergbau

Im Rahmen der Studie erfolgte in diesem Bereich einerseits die Untersuchung der geologischen Einflussgrößen auf die Gewinnung einiger Mineralrohstoffvorkommen anhand von Literaturdaten und andererseits die Ausarbeitung eines groben Überblicks von möglichen Gewinnungsszenarien. Hierbei gab das interaktive Rohstoffinformationssystem IRIS des BMWFJ Auskunft über sämtliche Vorkommen mineralischer Rohstoffe aus den Bereichen Energierohstoffe, Metalle und Industriemineralien in Österreich. Anhand dieser Datenbank und aufgrund der Meinungen namhafter Lagerstättenexperten ließ sich eine Auswahl an Vorkommen mineralischer Rohstoffe treffen, die hinsichtlich möglicher zukünftiger bergbaulicher Aktivitäten interessant erscheinen. So fand die Auswahl dreier für Österreich kritischer Rohstoffe statt (Wolfram, Antimon und Grafit), deren in Österreich vorhandenen Vorkommen anhand der zur Verfügung stehenden Literatur hinsichtlich Lagerstättenbonität, -qualität und -quantität bergtechnisch charakterisiert wurden:

- Wolframerzvorkommen auf der Taffinalpe und Hochrast/Gumriaul in Osttirol
- Antimonerzvorkommen der Rabantserie in Osttirol und Kärnten
- Grafitvorkommen in der Bunten Serie im Waldviertel in Niederösterreich
- Grafitvorkommen in Sunk in der Steiermark

Aufgrund der Auswertung der bergtechnischen Parameter wurde keines der analysierten Vorkommen gegenwärtig als bauwürdig eingestuft. Ein weiterer Teil setzte sich unter dem Titel „Deposit-to-Mill“-Konzepte mit einer groben Abschätzung der Bergbauplanung auseinander, wobei die wesentlichen Parameter der Bergbauplanung – Bergrecht, wirtschaftlicher Rahmen und eine grobe Abschätzung des Abbauverfahrens – Betrachtung fanden.

### **1.3 Aufbereitung**

Die Evaluierung der Aufbereitung der betrachteten kritischen Rohstoffe ergab ein erwartetes Bild. Hinsichtlich der in Österreich betriebenen Anlagen sticht vor allem die Scheelit-Aufbereitung in Mittersill hervor, welche zu den größten Wolfram-Produktionsstätten der Welt gehört. Als Hauptprozess werden dort verschiedene Verfahren der Dichtesortierung sowie Flotation eingesetzt. Die Dichtesortierung ist hierbei schon sehr weit ausgereift und abgestimmt und bietet daher ein geringeres Entwicklungspotenzial als die Flotation. Letztere reagiert empfindlicher auf Änderungen der Zusammensetzung der Aufgabe und daher auch auf Schwankungen der Qualität des aus der Lagerstätte geförderten Rohgutes. Dies führt dazu, dass hier ein stärkeres Potenzial für Optimierungen zu sehen ist. Grafit stellt den zweiten primären Rohstoff, welcher in Österreich abgebaut und aufbereitet wird, dar. Die Lagerstätte befindet sich in Kaisersberg in der Steiermark. Die Aufbereitung erfolgt hauptsächlich über Zerkleinerung und darin integrierter Trocknung. Bei Bedarf können die amorphen Grafite auch flotativ aufbereitet werden.

Die Aufbereitung der weiteren betrachteten Rohstoffe ist in Österreich vor allem in der Sparte der Sekundärrohstoffe angesiedelt. In dieser sind oftmals sehr große verfahrenstechnische Verbesserungspotenziale vorhanden, es handelt sich zumeist jedoch auch um große Herausforderungen. In dieser Hinsicht erfordert besonders die schwankende Zusammensetzung der Aufgabe bei den Aufbereitungsanlagen im Sekundärrohstoff-Bereich entsprechende Beachtung.

Weitere Betrachtungen beschäftigten sich mit dem breiten Spektrum an aufbereitungstechnischen Verfahren, die in diesem Industriezweig zur Anwendung gelangen und der komplexen Abstimmungen dieser im Zusammenhang mit den implementierten Prozessketten. Besondere Beachtung ist hier z.B. auch dem Zerkleinerungsprozess zu schenken. Bei der Zerkleinerung primärer Rohstoffe lässt sich meistens auf einen reichen Erfahrungsschatz zurückgreifen, wohingegen bei sekundären Materialien oftmals ganz neue Herausforderungen an den Aufbereiter gestellt werden. Auch die Belange des Umweltschutzes haben einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die zur Aufbereitung einsetzbaren Technologien und vor allem den damit verbundenen Kosten. Besonders am Beispiel der Gewinnung von Metallen der Seltenen Erden lässt sich erkennen, dass auch chemische

Prozesse, welche oft von einer hohen Umweltrelevanz geprägt und mit der Notwendigkeit von hohen Sicherheitsvorkehrungen verbunden sind, in der Aufbereitung von kritischen Rohstoffen zur Anwendung kommen und daher einen nicht unwesentlichen Teil der Betrachtungen ausmachen.

## 1.4 Primärmetallurgie

Hinsichtlich ihrer Gewinnung aus Erzen sowie Konzentraten zeigte sich, dass die kritischen Rohstoffe beziehungsweise Technologiemetalle keineswegs eine einheitliche Gruppe darstellen, welche anhand eines Prozesses oder einiger weniger Verfahrensrouten verarbeitbar sind. Vielmehr bilden sie eine Sammlung von Elementen mit höchst unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften (Seltene Erden, Refraktär-, Edel- sowie einige weitere Metalle). Ihnen ist jedoch gemeinsam, dass ihre Produktionsmengen im Vergleich zu den Massenmetallen und anderen mineralischen Rohstoffen sehr gering ausfallen und dass ihre Herstellung spezielle metallurgische Methoden als auch zumeist sehr komplexe Prozessketten erfordert. Eine weitere Herausforderung in diesem Bereich bildet die Tatsache, dass einige dieser Grundstoffe (Indium, Gallium, etc.) keine eigenständigen Erze aufweisen, sondern nur als Nebenprodukte bei der Gewinnung anderer Wertstoffe (Blei, Zink, Aluminium) anfallen, weshalb sich deren Produktion bei einem enorm steigenden Bedarf nicht ohne weiteres im entsprechenden Ausmaß erhöhen lässt. Zusätzlich erschwert wird die Situation dadurch, dass die Infrastruktur der Bergbau- und Hüttenbetriebe oftmals in erster Linie auf die klassischen Massenmetalle ausgerichtet wurde, während die weiteren Wertstoffe bisher wenig bis überhaupt keine Berücksichtigung fanden. Die Sicherstellung einer ausreichenden Versorgung mit den kritischen Rohstoffen erfordert jedoch auf absehbare Zeit zwingend die Primärmetallurgie, weil selbst eine optimale Kreislaufwirtschaft nicht die in den letzten Jahren aufgetretenen und auch für die Zukunft prognostizierten Bedarfssteigerungen über das Recycling abdecken kann. Darüber hinaus benötigt auch letzteres oftmals die Primärmetallurgie, weil die Rückgewinnung von Technologiemetallen häufig darin besteht, die Reststoffe und Abfallfraktionen durch einige Prozessschritte soweit aufzubereiten, dass sich diese an einer geeigneten Stelle in die Primärroute einschleusen lassen. Aus diesen Gründen besteht auch im Bereich der Primärmetallurgie von Technologiemetallen, welche grundsätzlich über gut entwickelte Gewinnungsmethoden verfügt, erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf. In Hinsicht auf die diesbezüglichen Herausforderungen bilden hierbei die sinkenden Qualitäten der Einsatzmaterialien (Erze bzw. Konzentrate als auch steigende Anteile an Sekundärmaterialien bzw. Schrotte sowie andere Abfallfraktionen) in Verbindung mit den stetig steigenden Anforderungen seitens der

letztendlich daraus gewonnenen Produkte einen wesentlichen Schwerpunkt für die entsprechende Technologieentwicklung.

## **1.5 Anwendungen**

Die Entwicklungen im Bereich der Einsatzgebiete und Anwendungen der kritischen Rohstoffe haben in zweifacher Weise einen wesentlichen Einfluss auf die Sicherstellung ihrer Verfügbarkeit. Diese bestimmen zum einen die benötigten Mengen und Qualitäten an den jeweiligen Materialien. Als Beispiel hierfür dienen der massive Ausbau der Windkraftanlagen sowie die Markteinführung von Elektro- bzw. Hybridfahrzeugen, welche zu einem enormen Anstieg des Bedarfs an Neodym für Permanentmagneten in Generatoren bzw. Motoren führte. Besonders neue Technologien bzw. Produkte können zu wesentlichen Verschiebungen führen, wie sich unter anderem in der Beleuchtungsindustrie zeigte. Während die mittlerweile vom Markt verdrängten Glühlampen nur geringe Mengen an Wolfram erforderten, sind für die Leuchtstofflampen darüber hinaus auch noch wesentliche Anteile an SE-haltigen Leuchtstoffen notwendig, während die seit kürzerer Zeit erhältlichen LEDs mit deutlich geringeren Leuchtstoffmassen das Auslangen finden.

Zum anderen beeinflussen die Anwendungen der kritischen Rohstoffe die Versorgungslage, weil diese das theoretische Potenzial für deren Rückgewinnung über die jeweiligen Recyclingketten bilden. In diesem Bereich führt der enorm breit gestreute Einsatz der betreffenden Wertstoffe in Verbindung mit den oftmals geringsten Konzentrationen in den einzelnen Produkten zu erheblichen Schwierigkeiten. Zusätzlich zur ständig steigenden Komplexität der jeweiligen Erzeugnisse, welche ohnehin bereits eine enorme Herausforderung für die Entwicklung von Recyclingprozessen darstellt, bewirken die ständig kürzer werdenden Produktlebenszyklen, dass kaum mehr ausreichend Zeit für die Etablierung geeigneter und auch optimierter Recyclingrouten zur Verfügung steht. Nachdem darüber hinaus die wenig vorhersehbare langfristige Preisentwicklung innovationshemmend wirkt, sind gerade in diesem Bereich entsprechende Anreize für Forschung und Entwicklung zu schaffen.

## **1.6 Stoffflussanalysen**

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, um damit Ineffizienzen zu erkennen und zu beheben und zweitens Potenziale für

zukünftiges Recycling zu bestimmen. Zur Prüfung, 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 fand die von der Ad-hoc-Arbeitsgruppe der EU entwickelte Methode auf Österreich Anwendung, woraus sich folgende drei relevante Stoffe ergaben: Neodym (Nd) als Vertreter der Seltenen Erden, Palladium (Pd) als Element 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 sich für keinen der drei Stoffe eine befriedigende Bilanz erstellen lässt, 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 in Bereichen, wo statistische Daten vorhanden sind, gibt es Schwierigkeiten, da beispielsweise in den Produktionsstatistiken Neodym gemeinsam mit allen anderen Elementen der Seltenen Erden, Palladium mit den Platingruppenmetallen und auch Niob gemeinsam mit Tantal ausgewiesen werden. Darüber hinaus sind die Verbrauchs- und Produktionszahlen der Industrie oft aus Gründen des Datenschutzes nicht zugänglich. Diese Datenlücken verhindern die Überprüfung der „Bottom-up“-Schätzungen (Hochrechnen der Gesamtmengen anhand der Massen 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, unzureichend erhobenen und vorhandenen, jedoch nicht verfügbaren Daten. Eine gezielte Analyse der identifizierten Defizite war im Rahmen dieses Projektes nicht möglich und stellt daher zukünftigen Forschungsbedarf dar. Weiters zeigte sich, dass die drei Stoffe sehr unterschiedlich genutzt werden und daher stoffspezifische Ansätze zur Hebung der Ressourceneffizienz notwendig sind. So wird unter anderem Neodym in einer Reihe von Anwendungen und Produkten eingesetzt, Niob dagegen hauptsächlich als Stahlveredler und Palladium trotz der zahlreichen Anwendungsbereiche hauptsächlich in Autokatalysatoren. Die Rückgewinnung dieser Stoffe ist daher an sehr unterschiedliche Anforderungen geknüpft.

## **1.7 Abfallwirtschaft**

Weil die kritischen Rohstoffe auch im Bereich der Abfallwirtschaft eine komplexe Thematik darstellen, erfolgt deren Erläuterung anhand einiger ausgewählter Abfall-Fraktionen (Alt-KFZ,

Elektroaltgeräte und Windkraftanlagen), welche aufgrund ihrer derzeitigen und zukünftig zu erwartenden Mengenströme für die im Rahmen dieser Studie betrachteten Wertstoffe von besonderer Bedeutung sind.

Hinsichtlich der Altfahrzeuge ist das in Hybrid- und Elektrofahrzeugen eingebaute Potenzial an kritischen Rohstoffen in Österreich derzeit insgesamt noch gering und wird frühestens in ca. 5 bis 10 Jahren von Bedeutung sein. Dennoch sind bereits Bemühungen zur Schließung von Stoffkreisläufen für kritische Rohstoffe – z.B. Leasing von Elektro kraftfahrzeugbatterien – vorhanden, welche die zukünftige Rückgewinnung erleichtern könnten. Für KFZ-Katalysatoren liegen derzeit folgende Schätzungen der Menge aus der Demontage von Kraftfahrzeugen vor dem Schredder (die Demontage erfolgt auch teilweise bereits früher, z.B. in KFZ-Werkstätten) in Österreich vor:

- Platin und Palladium: jeweils ca. 40 bis 130 kg/a
- Rhodium: ca. 8 bis 25 kg/a

Das sonstige in herkömmlichen Benzin- und Dieselfahrzeugen in anderen Bauteilen enthaltene Potenzial ist momentan schwierig abzuschätzen. Ein möglicher Weg, diese Wissenslücke zu schließen, wäre die Erweiterung von Demontageinformationssystemen. Diese Systeme (z.B. IDIS, [www.idis2.com](http://www.idis2.com)) sollten so adaptiert werden, dass kritische Rohstoffe erkannt, größenordnungsmäßig quantifiziert und leichter demontiert werden können. Die Rückgewinnung und weitere Aufbereitung von Nichteisenmetall-Fraktionen, welche überwiegend aus Cu und Al bestehen, nach den Schredderanlagen ist bereits etabliert. Beispielsweise werden derartige Kupferschrottfractionen am Metallmarkt auch auf Basis der Edelmetallgehalte (Au, Pt und Ag) gehandelt. Das Recycling von Katalysatoren konnte sich ebenso längst durchsetzen. Das Potenzial für kritische Rohstoffe und Edelmetalle in anderen Komponenten stellt sich nach aktuellen Schätzungen aber als „eher gering“ dar. Dies gilt auch für Indium in ITO-beschichteten Scheiben, da diese einen sehr geringen Marktanteil aufweisen und in dieser Anwendung deutlich geringere Schichtdicken Verwendung finden als beispielsweise in der Photovoltaik. Die telefonische Umfrage bei den Schredderbetrieben in Österreich ergab folgende Liste der derzeitigen Recycling-Aktivitäten in Bezug auf kritische Rohstoffe:

- Einzelne Aktionen gegen illegale grenzüberschreitende Verbringung
- Beinahe lückenlose Verwertung der KFZ-Katalysatoren
- Verstärkte Bemühung um die Rückgewinnung der NE-Metalle in den letzten Jahren (verringert auch die Dissipation kritischer Rohstoffe)
- Überlegungen zur Demontage der Lambda-Sonden bei einem Schredderbetrieb

Derzeit sind darüber hinaus bei den Schredderbetrieben in Österreich keine weiteren konkreten Bestrebungen zur Schließung von Stoffkreisläufen bei kritischen Rohstoffen zu erkennen. Daten zum Massenanteil (d. h. Potenzial bei forcierter Demontage) und zur Zusammensetzung von Leiterplatten im Altfahrzeug sind in Österreich nicht verfügbar, es ist jedoch bei den Schredderbetrieben die Meinung vorherrschend, dass diese Wissenslücke in Zukunft geschlossen werden sollte.

In Elektroaltgeräten wird ein breites Spektrum an kritischen Ressourcen eingesetzt, allerdings in sehr unterschiedlichen Konzentrationen und Mengen. Von größerer Bedeutung sind die Metalle der Seltenen Erden (wie Yttrium, Europium und andere) als Bestandteil des Leuchtstaubs in Leuchtstoffröhren, Kathodenstrahlröhren und Flachbildschirmen als auch Neodym als Magnetmaterial, Tantal in Kondensatoren, Platin und andere Edelmetalle auf Leiterplatten und Kontakten sowie Antimon als Flammschutzmittel. Die Gehalte an Edelmetallen variieren stark nach Anwendungsbereich. Vor allem in Geräten der Informations- und Kommunikationstechnik (PC, Laptop, Mobiltelefone), aber auch in Gegenständen der Unterhaltungselektronik sind höhere Gehalte zu finden. Seltene Erden finden sich in CRT-Geräten (7 bis 15 g Leuchtstaub pro Bildschirm), Leuchtstoffröhren (0,3 bis 1,7 % des Gewichts) und Flachbildschirmen. Neodym wird als Magnetwerkstoff für Festplatten, CD-Laufwerke, Lüfter und Lautsprecher eingesetzt, wobei bei PCs rund 5 g Nd und bei Laptops 2,1 bis 3,5 g Nd zu erwarten sind. Eine ähnliche Anwendung für kleine Motoren findet sich auch in Mobiltelefonen, allerdings mit deutlich geringeren Mengen von etwa 0,05 g. Die getrennte Sammlung und Verwertung von Elektroaltgeräten in Österreich wurde in Österreich 2005 flächendeckend eingeführt. Im Jahr 2011 ließen sich zirka 18.500 t an Bildschirmgeräten, 23.700 t Elektrokleingeräte und 880 t Leuchtstoffröhren getrennt erfassen. Allerdings wurde für den gleichen Zeitraum eine Menge von 8.400 bis 11.200 t an Elektrokleingeräten als Bestandteil des Restmülls entsorgt, das heißt das Potenzial für die getrennte Sammlung ist noch nicht ausgeschöpft.

Betreffend alternative Energiequellen waren Anfang 2012 in Österreich bereits 656 Windkraftanlagen (WKA) mit einer Leistung von 1.084 MW in Betrieb (Homepage der IG Windkraft, Dez. 2012). Jährlich werden mehr als 100 WKAs in Österreich errichtet. Buchert et al. (2011) schätzten, dass im Jahr 2010 ca. 2 % der global hergestellten Fe-Nd-B-Magnete in Windkraftanlagen verbaut wurden. Schätzungen im Rahmen der vorliegenden Studie zeigen jedoch, dass dieser Anteil größer sein könnte (bis ca. 12 %). Fe-Nd-B-Magnete enthalten 28–30 % Nd und ca. 2–4 % Dy (Dysprosium). Die spezifische Nd-Masse, bezogen auf die elektrische Leistung, beläuft sich bei jenen Anlagen, welche Fe-Nd-B-Magnete verwenden, auf zirka 0,15–0,30 t Nd/MW. Gemäß Gattringer (2012) beträgt der derzeit beste Schätzwert für das Nd-Lager in Österreich 42 t  $\pm$  33 %. Zu beachten ist jedoch, dass hierbei nur drei Rückmeldungen einer Fragebogenaktion vorliegen und fünf Hersteller von WKA, die auch

am österreichischen Markt sehr aktiv sind, nicht geantwortet haben. Der Marktanteil der neu installierten WKA, in denen Nd verwendet wird, nimmt global ab, da es bewährte technische Alternativen zu Fe-Nd-B-Generatoren gibt, die bei vielen der neueren, größeren WKA auch in Österreich bereits zum Einsatz kommen. Die Lebensdauer von WKA beträgt ca. 20 bis 30 Jahre, sofern nicht im Einzelfall früher ein sogenanntes „Repowering“ (Umbau und Leistungssteigerung am gleichen Standort) durchgeführt wird. Die Fe-Nd-B-Magnete aus WKA stehen damit im Allgemeinen mit entsprechender zeitlicher Verzögerung als Sekundärrohstoff zur Verfügung. Jedoch konnte die Altersstruktur der WKA in Österreich im Rahmen der vorliegenden Studie aufgrund der Vielzahl der Anlagen (> 110 Standorte und > 700 WKA) nicht ermittelt werden, welche jedoch für Maßnahmen zur Schließung von Stoffkreisläufen bzw. für einen allfälligen Rohstoffversorgungsengpass von Bedeutung wäre. Es wird daher unter anderem empfohlen, diese Altersstruktur in Zusammenarbeit mit der Interessensgemeinschaft Windkraft (IG Windkraft) zu erheben.

## 1.8 Verwertung/Sekundärmetallurgie

In Bezug auf das Recycling beziehungsweise der Rückgewinnung von kritischen Rohstoffen aus gebrauchten Konsumgütern und ähnlichen Abfallfraktionen lässt sich als wesentliches Ergebnis festhalten, dass die Recyclingquoten für diese Materialien nahezu ausschließlich noch extrem geringe Werte aufweisen. Darüber hinaus ist zu beachten, dass für die Gesamteffizienz der stofflichen Wiederverwertung der Systemansatz entscheidend ist, weil eine Reihe von Prozessstufen (Sammlung, Sortierung/Zerlegung, Aufbereitung, Verwertung/Sekundärmetallurgie) zu durchlaufen sind und der Gesamtwirkungsgrad das Produkt der Teilwirkungsgrade darstellt. Aus diesem Grund weist der schwächste Schritt gleichzeitig die größte Auswirkung auf. Für die Recyclingfähigkeit eines Produkts sind viele Einflussfaktoren von entscheidender Bedeutung, wie beispielsweise:

- Inhalt an Wertmetallen und deren Preise
- Zusammensetzung, Rückgewinnungsrate, Technologie sowie Kosten
- Anwendungssegment, Lebenszyklus als auch die Logistik

So stehen mit Ausnahme der Edelmetalle bisher kaum Recyclingtechnologien für die kritischen Rohstoffe zur Verfügung. Diese beschränken sich derzeit noch überwiegend auf Produktionsabfälle oder einige wenige spezielle Segmente (beispielsweise Hartmetalle) oder bestehen daraus, die jeweiligen Fraktionen nach einer geeigneten Vorbehandlung in die Primärroute einzuschleusen. Daher entsteht der Nachteil, dass trotz des im Vergleich zu den Primärrohstoffen oftmals aus der Aufbereitung resultierenden hohen Wertmetallgehalts

wiederum die gesamte komplexe und aufwändige Prozesskette durchlaufen werden muss. Darüber hinaus ist zu beachten, dass sich die Rückgewinnung von verschiedenen kritischen Rohstoffen aus bestimmten Fraktionen zum Teil konkurriert. So enthalten unter anderem die Elektronikschrotte neben den Edelmetallen auch Tantal, wobei die derzeitige etablierte Recyclingroute über die Kupfermetallurgie zwar hohe Ausbeuten an den Edelmetallen ermöglicht, aber keine Rückgewinnung des Tantals zulässt. Somit kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass für eine wesentliche Anhebung der Recyclingraten für die kritischen Rohstoffe als Beitrag zur Verbesserung der Verfügbarkeit dieser Materialien noch enormer Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht.

## **1.9 Handlungsbedarf und -empfehlungen**

Aus den vorhin zusammengefassten und in den nachfolgenden Kapiteln im Detail beschriebenen Ergebnissen der Studie lassen sich die folgenden Maßnahmen zur Verbesserung der Verfügbarkeit der für die österreichische Industrie besonders kritischen Rohstoffe ableiten.

### **1.9.1 Empfehlungen hinsichtlich Forschung und Entwicklung:**

- Geowissenschaftliche Untersuchungen zur eindeutigen Bewertung der derzeit als „bedingt sicherungswürdig“ eingestuften Rohstoffvorkommen
- Entwicklung verbesserter Explorationsverfahren
- Entwicklung und Optimierung von Aufbereitungsverfahren für Sekundärrohstoffe, wie beispielsweise sensorgestützte Verfahren für Fraktionen aus gebrauchten Konsumgütern
- Erweiterung der thermodynamischen Datenbanken (SE- bzw. refraktärmetallhaltige Schlackenphasen, etc.)
- Grundlagenuntersuchungen zu den neuartigen Stoffsystemen, welche im Produktlebenszyklus der kritischen Rohstoffe auftreten
- Entwicklung von metallurgischen Prozessen und Technologien, welche flexibel mit komplexen Reststoffen schwankender Zusammensetzung arbeiten können
- Entwicklung von Prozessketten, welche die Gewinnung einer möglichst hohen Anzahl an Rohstoffen aus Primär- und Sekundärquellen ermöglichen
- Entwicklung von Recyclingtechnologien für bisher nicht nutzbare primäre bzw. sekundäre Rohstoffquellen
- Optimierung der bestehenden Recyclingtechnologien zur Anhebung der Ausbeuten an kritischen Rohstoffen

- Aufbau eines Recyclingkompetenzzentrums
- Erstellung von dynamischen Stoffflussanalysen
- Detailuntersuchung der Abfallwirtschaftssysteme hinsichtlich Hochtechnologierohstoffe (Erarbeitung einer Sekundärrohstofflandkarte für Österreich)
- Ausarbeitung standardisierter Materialbilanzen
- Verstärkung der Ausbildung hinsichtlich Recycling entlang der gesamten Wertschöpfungskette
- Optimierung von Sammelsystemen für Elektroaltgeräte, insbesondere durch Pilotprojekte
- Entwicklung und Optimierung von Methoden zur Identifizierung und zum Screening von kritischen Rohstoffen in Abfällen

### **1.9.2 Weitere Empfehlungen:**

- Aufrechterhaltung und Ausbau der Primärgewinnung
- Verstärkte Prospektion und Exploration für kritische Rohstoffe mit hohem (Wolfram, Grafit, ...) oder unsicherem (Niob/Tantal, ...) Geopotenzial
- Erhöhung der Ressourceneffizienz
- Bewertung der geologischen Lagerstätten hinsichtlich bisher für den Betreiber nicht relevanter Nebenprodukte
- Standortspezifische Modellrechnungen, ab welchem Rohstoffpreis eine Förderung aus sicherungswürdigen Vorkommen wirtschaftlich ist
- Ausbau der metallurgischen Infrastruktur im Bereich der Technologiemetalle
- Stärkere Vernetzung der einzelnen Akteure entlang der Wertschöpfungskette (Informationsweitergabe, etc.)
- Intensivierung der Sammlung durch Förderung der haushaltsnahen Sammlung, stärkere Erfassung beim Handel und/oder Nutzung der Problemstoffsammlung für Elektrokleingeräte
- Getrennte Sammlung bestimmter Produktgruppen (Permanentmagnete, etc.)
- Unterbindung des Exports bestimmter Abfallfraktionen (Alt-KFZ, etc.)
- Verbesserung der Datenlage hinsichtlich Stoffflussanalysen
- Schließung des Recyclingkreislaufs
- Klärung der Besitzfrage von Abfall und anderen Rechtsunsicherheiten
- Vermehrte Einführung von Leasing- oder Pfandsystemen
- Aufbau von Materialdatensystemen, welche auch für Klein- und Mittelunternehmen einsetz- und verwendbar sind

- Formulierung von Ressourcenzielen
- Schaffung von Anreizsystemen für Forschung und Entwicklung
- Bewusstseinsbildung, Information und Beratung der betreffenden Personengruppen (Konsumenten, etc.)
- Verstärkung der innerbetrieblichen Kreislaufführung und Verbesserung des Recyclings
- Formulierung von qualitativen neben quantitativen Recyclingzielen in der Gesetzgebung
- Einhebung von ökosozialen Lenkungssteuern
- Verstärktes „Design for Recycling“ durchsetzen

## 1.10 Literatur

Ad-hoc Working Group, 2010: Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. Internet: [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index\\_de.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index_de.htm).

Buchert, M. et al., 2011: Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität. Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Ökologie-Institut Darmstadt e.V.

Gattringer, C. A., 2012: Stoffflussanalyse von Neodym in Hochtechnologieanwendungen für Österreich. Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien.

USGS, 2012: Mineral commodity summaries 2012. Internet: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2012/mcs2012.pdf>.

## 2. Einleitung

Rohstoffe sind für die Wirtschaft und somit in weiterer Folge für die moderne Gesellschaft von enormer Bedeutung, da sie nicht nur für die Industrie, sondern auch für die Infrastruktur und die Produkte des alltäglichen Lebens erforderlich sind. Während die Verfügbarkeit der Energieträger Öl, Gas und Kohle seit den Ölkrisen in den 1970er viel Beachtung fand, wurde die Notwendigkeit einer gesicherten Rohstoffversorgung aufgrund einer langanhaltenden Periode stabiler und niedriger Preise vernachlässigt. Aus diesem Grund konzentrierte sich die Minenproduktion für bestimmte Vorkommen auf einige wenige Länder. Die sich daraus ergebende Importabhängigkeit der meisten westlichen Staaten wurde bereits 2000 anhand einer Preisexplosion für Tantal und 2010–2011 für Seltene Erden aufgezeigt.

Um zukünftig Versorgungsengpässe zu vermeiden, starteten nunmehr zahlreiche Aktivitäten, beispielsweise auf EU-Ebene und auch in Österreich. Dabei ist zu bedenken, dass die grundsätzliche geologische Verfügbarkeit nahezu unbegrenzt ist, da derzeit erst einige Prozent der Erdoberfläche und des Untergrunds im Detail erkundet sind und daher enormes Potenzial für die Entdeckung neuer Lagerstätten gegeben ist. Jedoch kann die Minenproduktion nicht rasch und flexibel dem Bedarf folgen, da die Entwicklung entsprechender Projekte lange Zeiträume (10–25 Jahre) in Anspruch nimmt und darüber hinaus speziell einige Metalle für den Hochtechnologiebereich (In, Ga, etc.) keine eigenen Erze bilden, sondern sich nur als Nebenprodukt bei der Herstellung von Massenmetallen (wie Kupfer, Blei oder Aluminium) gewinnen lassen.

Der Bericht einer Arbeitsgruppe der EU ergab, dass sich die 41 untersuchten Rohstoffe in drei wesentliche Gruppen einteilen lassen, wobei insgesamt 14 (Seltene Erden, Platingruppenmetalle, Germanium, Niob, Antimon, etc.) bezüglich ihrer Versorgungssicherheit als kritisch gesehen wurden. Darüber hinaus soll nun diese EU-Studie im Rahmen der Ausschreibung No 147/PP/ENT/CIP/12/F/S01C02 "Raw Materials: Study on Critical Raw Materials at EU Level" der Europäischen Kommission auf Gold, Hafnium, Silber, Selen, Pottasche, Phosphatgestein, Zinn und bis zu fünf weiteren nichtenergetischen Rohstoffen ausgedehnt werden.

Nachdem die Sicherung der Rohstoffverfügbarkeit auch für Österreich von besonderer Wichtigkeit ist, startete das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Jahr 2011 die Forschungs-, Technologie- und Innovations-Initiative „Intelligente Produktion“, welche sich unter anderem mit der Bedeutung der kritischen Rohstoffe für die industrielle und technologische Entwicklung in Österreich beschäftigt. Die heimische Sachgüterindustrie erwirtschaftet mit rund 640.000 Beschäftigten rund 50 Milliarden Euro an Bruttowertschöpfung und daher ist die Herstellung von international konkurrenzfähigen Produkten ein

wesentlicher Beitrag zur Aufrechterhaltung des erreichten Wohlstands. Im Rahmen dieser Studie sollte der Istzustand der Hochtechnologierohstoffe in Österreich erhoben werden, um darauf aufbauend Maßnahmen vorzuschlagen, die zukünftigen Versorgungsengpässen bestmöglich entgegenwirken. Um ein optimales Ergebnis zu erhalten, fand der gesamte Produktlebenszyklus dieser Rohstoffe von den geologischen und urbanen Lagerstätten über den Abbau und die Aufbereitung, ihre Verarbeitung (Metallurgie) und Anwendung bis hin zum Recycling bzw. der Entsorgung oder Dissipation in der Umwelt Berücksichtigung.

### 3. Relevanz der Rohstoffe für die österreichische Industrie

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 [Ad-hoc Working Group 2010] für die Definition kritischer Rohstoffe. Da Zahlen zur globalen Reserve an Rohstoffen keine verlässlichen Indikatoren für Langzeitverfügbarkeit sind, gingen die Autoren davon aus, dass die geologische Knappheit im betrachteten Zeitraum (von beispielsweise einem Jahrzehnt) keine Auswirkungen auf die Verfügbarkeit von Primärressourcen hat und damit nicht relevant ist für die Bestimmung der Kritikalität von Rohstoffen. Als relevant hingegen wurden Veränderungen der geopolitisch-ökonomischen Rahmenbedingungen eingeschätzt, die starke Auswirkungen auf die Versorgung und die Nachfrage nach Rohstoffen haben. Letztere wird als kritisch bezeichnet, wenn das Risiko für Versorgungsengpässe und deren Auswirkungen auf die Wirtschaft größer sind als bei den meisten anderen Grundstoffen. Es handelt sich dabei also um ein relatives Konzept der Kritikalität. Es fanden hierbei zwei Arten von Risiken Beachtung:

- Das Versorgungsrisiko (supply risk) berücksichtigt die politisch-ökonomische Stabilität der produzierenden (abbauenden) Länder, das Ausmaß der Konzentration der Produktion, das Substitutionspotenzial 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.

Die 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, sowie dessen Erweiterung um das Verhältnis des Imports nach Österreich zur Weltproduktion als einfach zu erhebenden Indikator zur groben Abschätzung der für die österreichische Industrie besonders relevanten Materialien. Die 14 Rohstoffe bzw. -gruppen im Cluster rechts oben (wirtschaftliche Bedeutung > 5, Versorgungsrisiko > 1) wurden als kritisch eingestuft. Der Faktor umweltpolitisches Risiko ändert die Liste der kritischen Rohstoffe (Tabelle 1) hier nicht und wird deshalb auch nicht extra dargestellt.

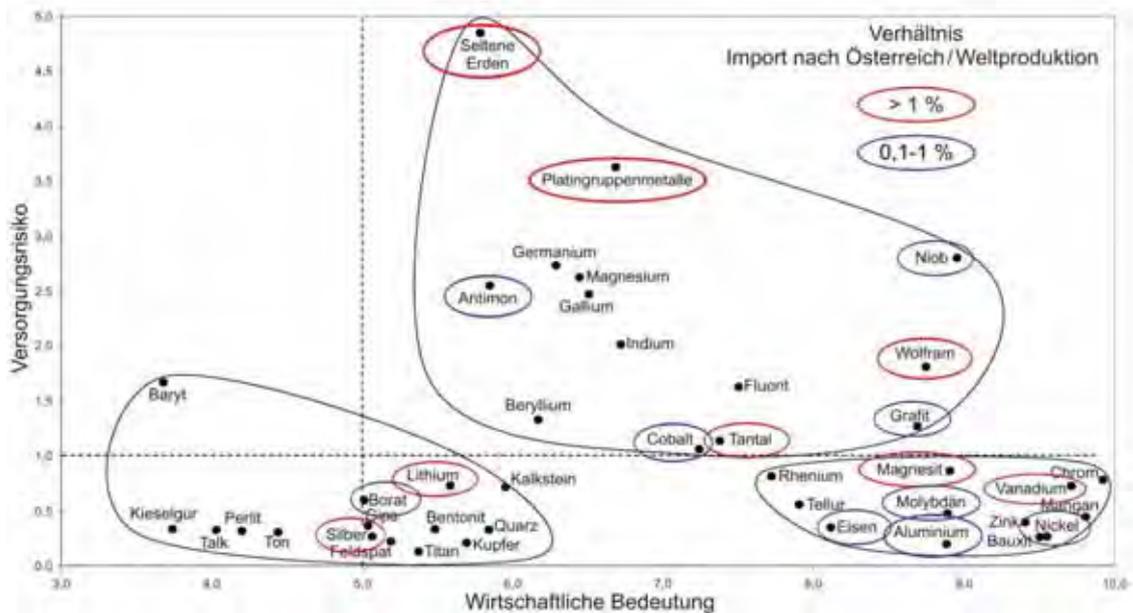


Abbildung 1: Darstellung der wirtschaftlichen Bedeutung und des Versorgungsrisikos kritischer Elemente für die EU (Abbildung aus Critical raw materials for the EU [Ad-hoc Working Group 2010], welche um das Verhältnis des Imports nach Österreich zur Weltproduktion erweitert wurde

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

Element	Chemisches Zeichen
Antimon	Sb
Beryllium	Be
Cobalt	Co
Flussspat	CaF <sub>2</sub>
Gallium	Ga
Germanium	Ge
Grafit	C
Indium	In
Magnesium	Mg
Niob	Nb
Platingruppenmetalle (PGM)	Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt
Selten-Erd-Elemente (SEE)	Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu
Tantal	Ta
Wolfram	W

Wie der Tabelle 1 zu entnehmen ist, handelt es sich bei den Platingruppenmetallen und bei den Metallen der Seltenen Erden jeweils um Rohstoffgruppen. Da dieses Modell der Ad-hoc-Arbeitsgruppe der EU auch auf das System Österreich angewendet wurde (siehe Kapitel 9.3), erfolgt nachstehend eine nähere Erläuterung der Methodik zur Bestimmung der Kritikalität von Rohstoffen.

### 3.1 Ermittlung der wirtschaftlichen Bedeutung

Die wirtschaftliche Bedeutung eines Rohstoffes wird bestimmt, indem zunächst die Ermittlung der Hauptanwendungsbereiche erfolgt. Diese Bereiche lassen sich nun zu Wirtschaftssektoren, sogenannten „Megasektoren“, zusammenfassen und als (Brutto)Wertschöpfung im Verhältnis zum Bruttoinlandsprodukt ausdrücken. Die bei dieser Methode verwendeten Wertschöpfungsketten bestehen aus wirtschaftlichen Bereichen, die voneinander abhängen und beschreiben, wie sich Versorgungsengpässe auf die Wirtschaft auswirken. Ein Beispiel für eine derartige Kette ist der Sektor „Metalle“, der aus den Bereichen „Elementare Metalle“, „Gefertigte Metalle“ und „Recycelte Metalle“ besteht und im Jahr 2006 in der EU 11 % der Produktionswertschöpfung darstellte.

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

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

Gleichung 1: Berechnung der wirtschaftlichen Bedeutung  $EI_i$  eines Rohstoffes  $i$

### 3.2 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 Materials  $i$  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 2 setzt sich zusammen aus  $S_{ic}$ , dem Anteil des Landes  $c$  an der Weltproduktion (Daten aus [Weber et al. 2011]), und dem Worldwide Governance Indicator  $WGI_c$  des Landes  $c$  als Maß für die Stabilität eines Landes (Daten aus [World Bank Group 2012]). 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  $\sigma_i$  eines Rohstoffes  $i$  wird beschrieben durch die Substituierbarkeit  $\sigma_{is}$  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 Substituierbarkeiten  $\sigma_{is}$  eines Rohstoffes  $i$  in den Megasektoren  $s$  zur Gesamt-Substituierbarkeit  $\sigma_i$  des Rohstoffes  $i$  summiert.

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

Gleichung 3: Berechnung der Substituierbarkeit  $\sigma_i$

Die Substituierbarkeit  $\sigma_{is}$  nimmt dabei folgende Werte an: 0,0 – leicht und vollständig ohne zusätzliche Kosten zu ersetzen, 0,3 – mit niedrigen Kosten ersetzbar, 0,7 – mit hohen Kosten und/oder Leistungseinbußen ersetzbar, 1,0 – nicht ersetzbar. Der Faktor Recycling fließt als Recyclingrate  $\rho_i$  ein und entspricht dem Verhältnis von zurückgewonnenem Material („Sekundärrohstoff“) zum Verbrauch an primärem Rohstoff. Die drei Parameter  $HHI_{WGI}$ ,  $\sigma_i$  und  $\rho_i$  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 große Werte annimmt, 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 ausfallen.

### 3.3 Ermittlung des umweltpolitischen Risikos

Um das umweltpolitische Risiko abzuschätzen, wurde ein Environmental Country Index (EM<sub>i</sub>) eingeführt, der die Risiken darstellen soll, die aus umweltpolitischen Gründen entstehen können. Dieser Index lässt sich analog zum Versorgungsrisiko berechnen 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  $EM_i$

Die Berechnung des Herfindahl-Hirschmann-Index  $HHI_{EPI}$  erfolgt analog zum  $HHI_{WGI}$  (Gleichung 2).

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

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

$S_{ic}$  entspricht wiederum dem Anteil des Landes  $c$  an der Weltproduktion (Daten aus [Weber et al. 2011]), während  $EPI_c$  den Environmental Performance Index (Daten auf <http://epi.yale.edu/>) des Landes  $c$  darstellt. 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 somit eine Skala dar, wie nahe die einzelnen Länder an der Erfüllung von weltweit etablierten umweltpolitischen Zielen sind. (Österreich wurde 2012 beispielsweise als 7. Land hinter CH, LV, NOR, L, CR und F gereiht). 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.

### 3.4 Auswahl der im Detail untersuchten Rohstoffe

Um am Beginn der Studie relativ rasch eine entsprechende Auswahl zu treffen, wurden vorerst für die Entscheidung, welche Rohstoffe aus dem Hochtechnologiebereich speziell für Österreich wesentlich sind, folgende Kriterien für eine pragmatische Abschätzung herangezogen, ob diese für die heimische Industrie mehr oder weniger kritisch sind:

- Die Gegenüberstellung der österreichischen Importe [European Mineral Statistics] zu der globaler Produktion [Brown et al. 2012] eines bestimmten Rohstoffes beschreibt dessen Wichtigkeit und die Größe der jeweiligen österreichischen Industrie, welche darauf angewiesen ist.
- Die Verteilung der weltweiten Produktion über die jeweiligen Länder, angegeben durch den modifizierten Herfindahl-Hirschman Index ( $HHI_{mod}$ ) [Weber et al. 2012],

ermöglicht eine Bewertung der Marktkonzentration und sich daraus ergebender Monopolstellungen.

Die Auswertung dieser Daten ergab, dass zahlreiche Rohstoffe für Österreich von Bedeutung sind (Tabelle 2). Obwohl der modifizierte HHI einen ausgezeichneten Faktor darstellt, um die Marktkonzentration zu beschreiben, ist darüber hinaus auch noch die Stabilität und Zuverlässigkeit der jeweiligen Nationen zu berücksichtigen. Ein Beispiel hierfür zeigt der Vergleich von Cobalt mit Lithium (Abbildung 2).

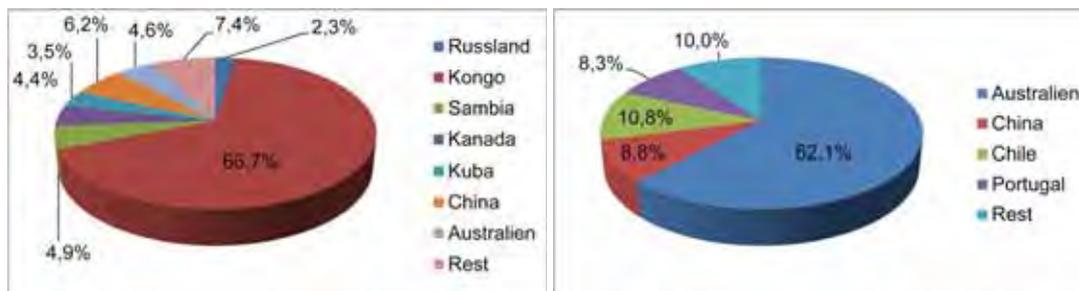


Abbildung 2: Minenproduktion von Cobalt (links) und Lithium (rechts) [Brown et al. 2012]

Wenngleich der  $HHI_{mod}$  für Lithium nur etwas niedriger ist als jener für Cobalt, muss die Versorgungslage für letzteres als wesentlich kritischer eingestuft werden, da dieses zum überwiegenden Anteil im Kongo, einem Land mit einem instabilem politischen System und hohem Risiko für Konflikte und anderen schwerwiegenden Problemen, hergestellt wird. Dies bedeutet, dass auch die Situation in den größten Produzentenländern bezüglich der Beurteilung eines gesicherten Zugangs zu Rohstoffen zumindest in groben Zügen Berücksichtigung finden sollte. Aufgrund des erheblichen Umfangs dieser Rohstoffliste erfolgte für die weiteren Untersuchungen im Rahmen der Rohstoff-Studie eine Schwerpunktsetzung auf die Seltenen Erden, Tantal und Niob, Wolfram, Vanadium und die Platingruppenmetalle, wobei vor allem die Ergebnisse aus zahlreichen Gesprächen mit der Industrie beachtet wurden. Darüber hinaus ist zu erwähnen, dass die Potenziale zur Sicherung der Rohstoffverfügbarkeit für die österreichischen Betriebe primär- (Geologie, Bergbau, Aufbereitung, Metallurgie) und sekundärseitig (Abfälle und Reststoffe, Aufbereitung und Recycling inkl. Metallurgie) unterschiedlich gelagert sind, wodurch auf diesen beiden Seiten die Auswahl der detailliert zu betrachtenden Rohstoffe etwas unterschiedlich ausfällt.

Tabelle 2: Produktion einiger kritischer Rohstoffe und ihre Bedeutung für Österreich (Daten aus [Brown et al. 2012, European Mineral Statistics, Weber et al. 2012])

Rohstoff	Welt- produktion 2010 [t]	Rohstoff	Import AUT 2010 [t]	HHI
Oxide der Seltenen Erden (SE)	122.100	SE-Verbindungen Metalle der SE	5.141 550	9.586
Ta-Inhalt im Konzentrat Nb-Inhalt im Konzentrat	700 107.500	Ta FeNb	17 1.061	8.559
Minenproduktion der Platingruppenmetalle (PGM-Inhalt)	482	PGM	1,4	3.767 6.156 7.467
Minenproduktion an W-Inhalt	61.700	W WC	632 1.268	7.297
Minenproduktion an Sb-Inhalt	147.000	Sb Sb-Oxid	37 249	7.533
Natürlicher Grafit	2.100.000	Graphit	18.501	5.547
Magnesit	21.800.000	Magnesit Magnesia	848 272.232	4.866
Minenproduktion an Co-Inhalt	105.000	Cobalt Cobaltoxid	653 10	4.424
Minenproduktion an V-Inhalt inkl. Schlacken, aber ohne Schweröl	67.000	V-hältige Rückstände	46.000	3.230
Zr-Mineraie	1.392.000	Zr-Konzentrate	1.680	3.173
Li-Inhalt in Mineralen und Salzen	20.100	Li-Karbonat	402	3.073
Minenproduktion an Sn-Inhalt	276.000	Rohzinn und Legierungen	2.923	2.757
Cr-Erze und -konzentrate	30.000.000	Cr-Erze und -konzentrate Cr	54.945 6.109	2.503
Minenproduktion an Mo-Inhalt	250.000	Mo	548	2.269
Primäraluminium	41.500.000	Bauxit Tonerde Tonerdehydrat Leg. und Schrott	8.489 47.681 12.914 686.089	1.764
Minenproduktion an Cu-Inhalt	16.200.000	Cu Cu-Legierungen Cu-Schrott	46.579 1.412 145.903	1.439
TiO <sub>2</sub> -Inhalt in Ti-Mineralen	5.700.000	Ti-Mineraie Ti Titanoxid	477 1.381 28.288	1.355
Minenproduktion an Ag-Inhalt	23.713	Ag	482	935
Minenproduktion an Ni-Inhalt	1.552.000	Stein, Sinter, etc. Rohnickel Ni-Schrott Nickeloxid	255 6.894 440 15	842
Minenproduktion an Au-Inhalt	2.540	Au Au-Abfall und Schrott	56,6 1,4	620

### 3.5 Literatur

- Ad-hoc Working Group, 2010: Critical raw materials for the EU: Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. Internet: [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index\\_de.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index_de.htm).
- Brown, T. J. et al., 2012: World Mineral Production. Keyworth, Großbritannien: British Geological Survey.
- European Mineral Statistics. Internet: <http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/europeanStatistics.html> (Zugriff: 27.04.2012).
- Weber, L. et al., 2011: World-Mining-Data. Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Heft 26.
- Weber, L. et al., 2012: World-Mining-Data. Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, Heft 27.
- World Bank Group, 2012: Worldwide Governance Indicators. Internet: [http://info.worldbank.org/governance/wgi/sc\\_country.asp](http://info.worldbank.org/governance/wgi/sc_country.asp).

## 4. Geologie ausgewählter kritischer Rohstoffe

Aufgrund des abzusehenden geologischen Potenzials wurde die im Rahmen dieser Studie behandelte Gruppe der für Österreich besonders kritischen Grundstoffe hinsichtlich ihrer Geologie um Antimon, Grafit und Germanium erweitert. Die Evaluierung des Geopotenzials der einzelnen Rohstoffe basiert auf der Erfassung und Darstellung des aktuellen Kenntnisstands über deren Geologie und Lagerstätten bzw. Vorkommen in Österreich und der vergleichenden Betrachtung mit den international wichtigsten Lagerstättentypen (siehe Anhang: Kapitel 1 „Allgemeine Lagerstättentypen der ausgewählten kritischen Rohstoffe“) und ihres geologischen Rahmens.

Die Auswertung der fachspezifischen Literatur und die Befragung von Experten zeigten, dass der derzeitige Kenntnisstand hinsichtlich des geologischen sowie auch wirtschaftlichen Potenzials für die einzelnen Rohstoffe sehr verschieden zu bewerten ist. Sie werden daher hinsichtlich ihres Geopotenzials in drei Gruppen unterteilt. Für einige metallische Rohstoffe wie Wolfram und die Industriemineralien Grafit und Magnesit, die aus heimischen Lagerstätten gewonnen werden, stellt sich der geologische und lagerstättenkundliche Kenntnisstand als durchaus positiv dar und das Potenzial für weitere Lagerstätten in Österreich wird für diese Gruppe als hoch eingestuft. Hingegen wurde den Sondermetallen (Niob, Tantal, Germanium, Indium, Gallium, Seltene Erden usw.), die meist nur als Nebenprodukt bei der Gewinnung anderer Metalle anfallen, bisher kaum Beachtung bei Prospektions- und Explorations-tätigkeiten in Österreich geschenkt. Daher ist die Kenntnis über diese speziellen Rohstoffe meist unzureichend und konkrete Aussagen über ihr wirtschaftliches Potenzial können schwer gemacht werden. Bei diesen Rohstoffen wird zwischen solchen mit nicht vorhandenem bzw. einem möglichen/schwer abzuschätzenden Geopotenzial unterschieden. Jeder zu betrachtende Rohstoff wird in einem eigenen Kapitel mit einer zusammenfassenden tabellarischen Darstellung der wichtigsten relevanten Daten behandelt. Dabei wurde jeder Grundstoff einer der drei erwähnten Gruppen zugeordnet und farblich in Form einer Ampel-darstellung gekennzeichnet. Eine grüne Farbgebung bedeutet, dass für das ausgewählte Rohmaterial in Österreich ein wirtschaftlicher Vorrat besteht (erste Gruppe), während Rot ein vernachlässigbares Potenzial (Gruppe 2) definiert. Für den Fall, dass ein geologisches Reservoir indiziert ist, derzeit aber keine eindeutige Aussage zur Wirtschaftlichkeit möglich ist (Gruppe 3), wurde ein gelber Farbton verwendet.

## 4.1 Antimon

Das wichtigste Antimonmineral zur Gewinnung und Herstellung von metallischem Antimon (Sb) oder Antimonoxid ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ) ist das Sulfid Stibnit ( $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ). Andere Minerale wie etwa Tetrahedrit (Antimon-Fahlerz) oder Sb-führende Sulfosalze sind vergleichsweise unbedeutend. Antimonerze können, abhängig vom Lagerstättentyp, als wertsteigernde Nebenelemente Gold und Silber, aber auch die unerwünschten wertmindernden Elemente Arsen und Quecksilber führen. Die durchschnittlichen Häufigkeiten von Antimon in Gesteinen der Erdkruste liegen bei ca. 0,1–1,0 ppm. Die Bauwürdigkeitsgrenze für reine Antimon-Lagerstätten wird mit ca. 3 % Sb angegeben [Pohl 2011].

Der Beginn des Antimonbergbaus in Österreich lässt sich bis ins 17. Jahrhundert zurückverfolgen. Die wirtschaftlich bedeutendste Lagerstätte, die bis 1990 in Betrieb war, ist Schlaining. Der gesamte Lagerstätteninhalt wird mit ca. 100.000 Tonnen Antimon angegeben. Die jährlichen Abbaumengen beliefen sich auf ca. 20.000 Tonnen Roherz mit einem Antimongehalt von durchschnittlich 5 Gew.-% Sb [Weber et al. 1997].

Die Vorkommen in Osttirol und Kärnten sind an polymetamorphe Einheiten der Kreuzeckgruppe sowie der westlichen Goldeckgruppe gebunden (Abbildung 3). Bei dem Antimonit-Vorkommen Rabant handelt es sich um die größte Sb-Lagerstätte der Kreuzeckgruppe, welche bis in die Fünfzigerjahre des zwanzigsten Jahrhunderts bergbaulich in Betrieb war [Lahusen 1972]. Die bestehenden Vorräte werden mit 13.000 t Erz mit 7 Gew.-% Sb angegeben, wobei aber nur 9–10.000 t mit 4–4,5 Gew.-% als gewinnbar ausgewiesen werden [Weber 1989]. Die starke Zerrüttung und das stark wasserführende Nebengestein bewirken eine verringerte Standfestigkeit des Gebirges, wodurch heute bereits sämtliche der damaligen Einbauten verbrochen sind [GBA 2005/2009, Mali 1996]. In unmittelbarer Umgebung zu Rabant treten perlschnurartig aufgereiht die Antimon-Vorkommen Gomig, Mariengrube, Johannigrube, Edengang und Gurskerkammer auf, die parallel zur Iselstörung liegende Gangvererzungen darstellen. Allerdings sind die Antimon-Vorkommen Gomig und Mariengrube in den stratigraphisch tiefergelegenen Augengneisen anzutreffen und sind nicht wie die Vererzungen bei Rabant, Johannigrube, Edengang und Gurskerkammer an die phyllitischen Glimmerschiefer der Rabantserie gebunden [Lahusen 1972, Mali 1996]. Die Prozesse, die zur Lagerstättenbildung entlang der Iselstörung geführt haben, sind nach Mali (1996) rein epigenetischer Natur und die Vererzungen werden von diesem als strukturgebunden interpretiert. Diese genetische Interpretation steht im Gegensatz zu der Deutung von Lahusen (1972) sowie Reimann und Stumpfl (1985), die diese Vorkommen als schichtgebunden deuteten und der Sb-W-Hg-Formation zurechneten, für die eine syngenetische Anlage postuliert wurde [Maucher 1965].

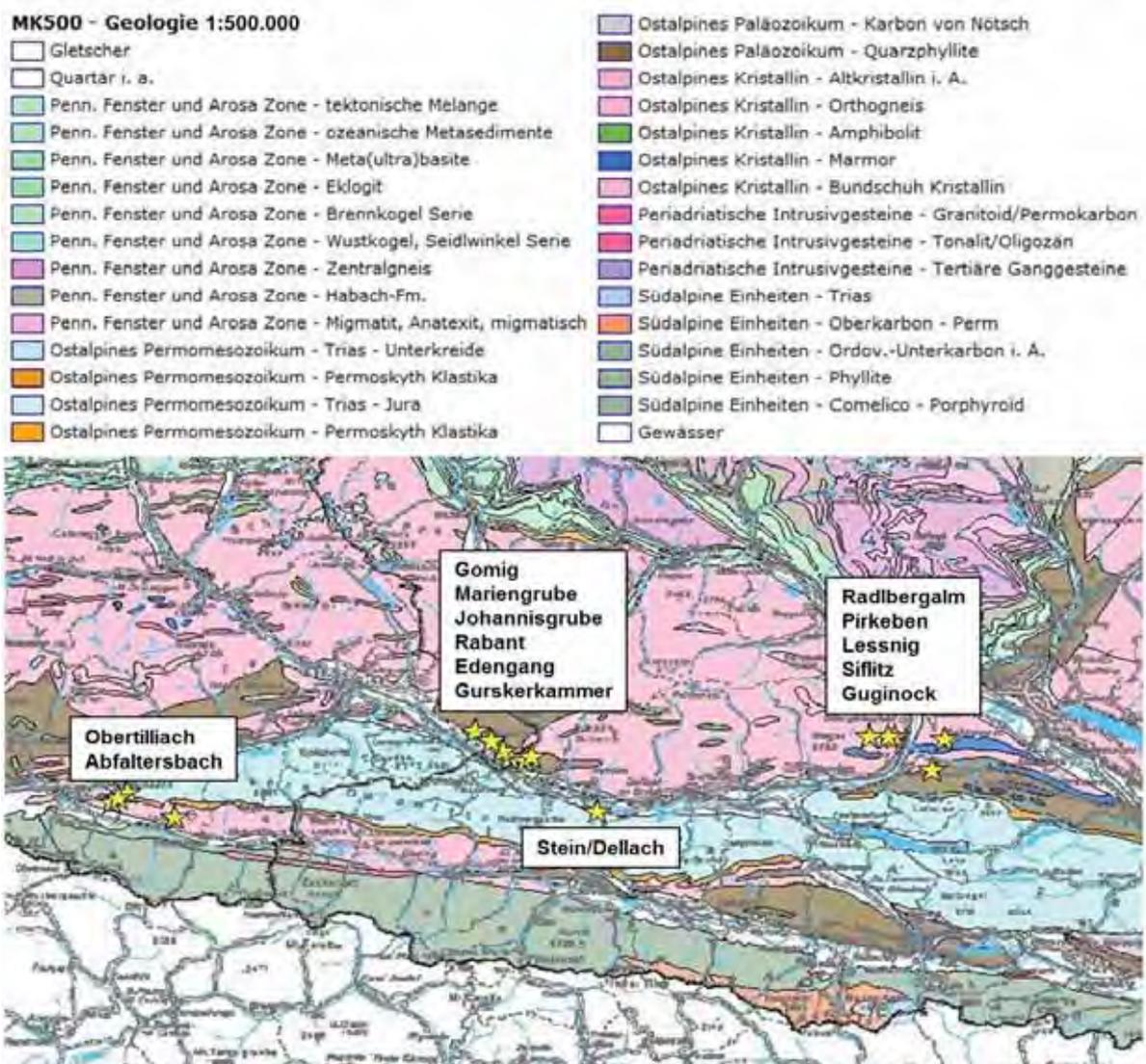


Abbildung 3: Ausschnitt der geologischen Übersichtskarte Österreichs mit den Antimon-Lagerstätten der Kreuzeckgruppe an der Grenze Osttirol/Kärnten und der Goldeckgruppe südlich von Spittal a. d. Drau [abgeändert nach GBA 2005/2009]

Als Hoffungsgebiete werden heute die Antimonit-Vererzungen Rabant, Gomisgrube und Gurskerkammer in der Kreuzeckgruppe angesehen. In der IRIS Datenbank [GBA 2005/2009] wird die Unterfahrung der Lagerstätte Rabant ausgehend von der Talsohle in Richtung Nordwesten empfohlen, um eine bessere Lagerstättenentwicklung zu ermöglichen. Die dabei notwendige Standfestigkeit des Unterbaustollens würde durch eine Auffahrung im Wettersteinkalk gewährleistet sein [GBA 2005/2009]. Auch Exel (1986) ist der Ansicht, dass eine wirtschaftliche Nutzung der Antimonit-Vorkommen von Rabant in Zukunft nicht auszuschließen ist. Bei der Beurteilung des wirtschaftlichen Potenzials dieser Vorkommen sind die zur erwartenden geotechnischen Herausforderungen (Gebirgszerreißung, geringe Standfestigkeit, Wasserführung, wie sie z.B. aus der Lagerstätte Rabant bekannt sind) besonders zu berücksichtigen. Die klufförmig ausgeprägten Antimonitvererzung des Vorkommens in

Gomig sind derzeit noch unzureichend untersucht, jedoch lassen hohe Antimonkonzentrationen im Hangenden der Augengneise auf das Vorhandensein weiterer Vererzungen im Augengneis selbst vermuten [Weber 1989].

Bei einer zukünftigen Neubewertung der polymetallischen Sb-führenden Vorkommen in Österreich ist der Gehalt an Edelmetallen, vor allem der von Gold ein wesentlicher Faktor. Erhöhte Gehalte an Gold sind aus der Sb-Lagerstätte Gurskerkammer beschrieben [Mali 1996]. Auch in der Goldeckeckgruppe sind goldführende As-(Sb)-Vererzungen bekannt (z.B. Guginock, Siflitz). Polymetallische Cu-Lagerstätten in der östlichen Grauwackenzone führen häufig Antimon in Form von Tetrahedrit (Sb-Fahlerz). Einige dieser historischen Lagerstätten (z.B. Mitterberg, Larzenbach) sind für ihre Goldführung bekannt geworden [Kucha & Raith 2009]. Eine systematische Studie zur Goldführung dieser Lagerstätten liegt den Autoren nicht vor. Abschließend zeigt die Tabelle 3 eine Zusammenstellung zur Geologie von Antimon.

Tabelle 3: Übersicht zur Geologie von Antimon

Antimon				
<b>Ökonomisch relevante Erzminerale</b> [Pohl 2011]	<b>Erzmineral</b>		<b>Chemische Formel</b>	<b>Max. Erzgehalt [Gew.-%]</b>
	Stibnit		$Sb_2S_3$	71 % Sb
	Tetrahedrit		$(Cu,Ag,Fe,Zn)_{12}(Sb,As,Bi)_4S_{13}$	variabel
<b>Mittlere Häufigkeit in der Erdkruste</b> [Dill 2010]	0,65 ppm			
<b>Produktion 2011</b> [USGS 2012a]	169.000 t			
<b>Reserven 2011</b> [USGS 2012a]	1.800.000 t			
<b>R/P-Verhältnis</b> <sup>1</sup> [eigene Berechnungen]	11 Jahre			
<b>Bauwürdigkeitsgrenze</b> [Pohl 2011]	~3 % Sb			
<b>Lagerstätten Typen</b> [Dill 2010] [Pohl 2011]	Magmatische und metamorphe Lagerstätten; Verdrängungserzkörper in Karbonatgesteinen; an felsische Intrusionen gebundene Sn-, W-Ganglagerstätten; orogene Goldsysteme (Gänge, Scherzonen) inkl. Carlin-Typ Gold-Lagerstätten; epithermale Lagerstätten des High- und Low- Sulfidation Typs; Sb-Vererzungen assoziiert mit Grüngesteinen; sedimentäre Lagerstätten; sedimentär-exhalative Lagerstätten; polymetallische Sb-Vererzungen in Schwarzschiefern			
<b>Wichtigste Produzenten</b> [Ahlfeld 1974] [Dill 1998] [Pearton und Viljoen 1986] [Pohl 2011]	<b>Nation</b>	<b>Lokalität</b>	<b>Lagerstättentypus</b>	<b>Ø Erzgehalt [Gew.-%]</b>
	China	Xikuashan	Polymetallische Sb-Vererzungen in Schwarzschiefern	4,5 % Sb
	Bolivien	Caracota	Strukturgebundene hydrothermale Sb-Gangvererzungen	25 % Sb
	Südafrika	Murchison	Sb-Vererzungen in Scherzonen assoziiert mit Grüngesteinen	3,5 % Sb
<b>Geologisches Potenzial für Österreich</b>	Antimon-Vererzungen in der Kreuzeckgruppe und Goldeckgruppe, sowie vereinzelt kleinere Vorkommen im Koralm-Saualmkristallin (Brückl, Loben-Erzberg); historischer Sb-Distrikt Schlaining			
<b>Wirtschaftliches Potenzial für Österreich</b>	Möglicherweise Schlaining, Burgenland; Rabant, Gomig und Gurskerkammer, Kärnten			
<b>Weiterer Forschungs- und Untersuchungsbedarf</b>	Evaluierung der Tonnage, Erzgehalt und Wirtschaftlichkeit, sowie von Möglichkeiten zur Wiedergewältigung des historischen Bergbaus in der Kreuzeckgruppe; systematische Untersuchung der Au-Führung in Sb-(As)-Lagerstätten der Kreuzeck- und Goldeckgruppe bzw. in polymetallischen Cu-(Sb)-Lagerstätten der Grauwackenzone			

<sup>1</sup> Verhältnis der derzeit geschätzten globalen Reservemenge (R) zur globalen Produktionsmenge des Jahres 2011 (P)

## 4.2 Germanium

Germanium kommt weltweit in unterschiedlichen Lagerstätten vor, wird derzeit allerdings ausschließlich als Nebenprodukt des Zink-, Blei-, Kupfer- oder Kohlebergbaus gewonnen. In Zinkblenden (Sphalerit) epigenetischer, niedrigthermaler Zn-Pb-Lagerstätten kann Germanium für Zink substituieren, wodurch diese bis zu 3.000 ppm Ge in die Kristallstruktur aufnehmen können [Bernstein 1985]. Ungewöhnlich ist vor allem, dass Germanium sowohl siderophile, als auch lithophile, chalkophile und biophile geochemische Eigenschaften aufweist und somit als Spurenelement in den häufigsten Gesteinsarten enthalten ist [Bernstein 1985]. Mit einer durchschnittlichen Häufigkeit von 1,6 ppm liegt Germanium im Bereich zwischen Wolfram (1 ppm) und Tantal (2,4 ppm).

Karbonatgebundene Pb-Zn-Lagerstätten beschränken sich in Österreich auf die oberostalpinen mesozoischen Einheiten des Drauzugs (Bleiberg/Kreuth) und der Nördlichen Kalkalpen. Weitere Vorkommen sind aus den paläozoischen und kristallinen Einheiten der Ostalpen beschrieben. Im Jahr 1993 wurde die Bergbautätigkeit im kärntnerischen Bleiberg/Kreuth, das als Typuslokalität für Blei-Zink-Vererzungen der alpinen Trias gilt, eingestellt. In mehr als 700 Jahren Bergbau wurden 1,1 Millionen Tonnen Blei und 1,1 Millionen Tonnen Zink gefördert. Zudem wurden insgesamt 172 t Germanium aus dem Zinkerz gewonnen, wodurch Österreich einen der wichtigsten Germaniumproduzenten des vergangenen Jahrhunderts darstellte [Schroll 2006]. Für die heimischen Pb-Zn-Lagerstätten wurde das Vorratspotenzial an Germanium berechnet (Tabelle 4).

Tabelle 4: Berechnetes Vorratspotenzial von Germanium in ostalpinen Pb-Zn-Vorkommen [Cerny und Schroll 1995]. Kursiv gekennzeichnet sind in Produktion gestandene Lagerstätten

<b>Bergbau</b>	<b>Vorratsklasse*</b>	<b>Durchschnittlicher Erzgehalt [ppm Ge]</b>	<b>Lagerstättenvorrat [t Ge]</b>
<i>Bleiberg/Kreuth</i>	A, B, C1	200	35,7
Radnig	C2	320	2,1
Jauken	C2	1.500	7,8
Pirkach	C2	400	11,2
Hochobir	C2	900	16,6
Lafatsch	C2	150	12,6
Metnitz	C2	370	15,6

\*A, B, C1: gesicherte bergbauliche Vorräte, C2: geschätzte geologische Vorräte

Mit Ausnahme des Vorkommens in Metnitz, das eine gangförmige Lagerstätte im Kristallin der Gurktaler Decke des ostalpinen Paläozoikums repräsentiert, sind alle potenziell wirtschaftlich relevanten Konzentrationen an Germanium mit karbonatgebundenen Pb-Zn-Vererzungen innerhalb der triassischen Einheiten Österreichs (Gailtaler Alpen, Karawanken, Nordtiroler Kalkalpen) assoziiert. Davon war Bleiberg/Kreuth der einzige aktive Bergbau der

letzten Jahrzehnte. Cerny und Schroll (1995) sehen allerdings in den errechneten Mengen der Bleiberger Erzkörper nur mehr ein geologisches Potenzial, da diese aufgrund der nicht mehr existierenden Zinkelektrolyse in Arnoldstein, der für einen modernen Bergbau nicht ausreichenden Metallgehalte der Hauptelemente Pb und Zn sowie der Vorratssituation als nicht greifbar erscheinen [Cerny und Schroll 1995]. Das Vorratspotenzial an Germanium in heimischen Pb-Zn-Lagerstätten wird daher als subökonomisch eingeschätzt.

Eine Primärgewinnung von Germanium könnte nur in Kombination mit einer Wiederaufnahme des Pb-Zn-Bergbaus erfolgen. Die Lagerstätte Jauken scheint durch ihre sehr hohen Ge-Gehalte eventuell untersuchungswürdig. Voraussetzungen für eine weiterführende Exploration in potenziell hoffigen Gebieten sind das Studium von Tektonik und Paläogeographie, geophysikalische Untersuchungen, sowie die Erstellung geologischer Detailkartierungen und ein Abteufen von Explorationsbohrungen.

Eine weitere mögliche Quelle für Germanium könnten Kohlen sein. Geochemische Untersuchungen der Aschen ausgewählter österreichischer Braunkohlen zeigten in einzelnen Abschnitten des Salzach-Braunkohlereviere (110 ppm Ge) und in den Glanzbraunkohlen der Melker Sande (bis zu 200 ppm Ge) erhöhte Germaniumkonzentrationen [Augustin-Gyurtis und Schroll 1988]. Bezüglich sekundärer Quellen für Germanium sollten die Halden des langzeitigen Pb-Zn-Bergbaus erfasst und evaluiert werden. Abschließend zeigt die Tabelle 5 eine Zusammenstellung zur Geologie von Germanium.

Tabelle 5: Übersicht zur Geologie von Germanium

Germanium				
<b>Ökonomisch relevante Erzminerale</b> [Höll et al. 2007]	<b>Erzmineral</b>	<b>Chemische Formel</b>		<b>Max. Erzgehalt [Gew.-%]</b>
	Argyrodit	Ag <sub>8</sub> GeS <sub>6</sub>		7 % Ge
	Briartit	Cu <sub>2</sub> (Fe,Zn)GeS <sub>4</sub>		14–18 % Ge
	Germanit	Cu <sub>13</sub> Fe <sub>2</sub> Ge <sub>2</sub> S <sub>16</sub>		6–10 % Ge
	Reniérit	(Cu,Zn) <sub>11</sub> Fe <sub>2</sub> (GeAs) <sub>2</sub> S <sub>16</sub>		4–8 % Ge
	Stottit	FeGe(OH) <sub>6</sub>		32 % Ge
<b>Mittlere Häufigkeit in der Erdkruste</b> [Taylor und McLennan 1985]	1,6 ppm			
<b>Produktion 2011</b> [USGS 2012a]	118 t			
<b>Reserven 2011</b> [USGS 2012a]	k.A.*			
<b>Bauwürdigkeitsgrenze</b> [Höll et al. 2007]	Üblicherweise mehrere 100 ppm als Nebenprodukt des Pb-Zn-Bergbaus			
<b>Lagerstättentypen</b> [Höll et al. 2007]	Volcanic-hosted massive sulfide Lagerstätten (VHMS); porphyrische und Gang-Stockwerk Cu-Mo-Au Lagerstätten; porphyrische und Gang-Stockwerk Sn-Ag-Lagerstätten; sediment-hosted massive sulfide Lagerstätten (SHMS); karbonatgebundene Pb-Zn-Lagerstätten (z.B. Mississippi Valley-Type); Kohle- und Lignit-Lagerstätten			
<b>Wichtigste Produzenten</b> [Du et al. 2009] [Höll et al. 2007] [Slack et al. 2004]	<b>Nation</b>	<b>Lokalität</b>	<b>Lagerstättentypus</b>	<b>Ø Erzgehalt [Gew.-%]</b>
	China	Shengli	Kretazische Kohlelagerstätte	137 ppm Ge
	Russland	Novikovskoye	Kohle- und Tonschieferlagerstätte	276–348 ppm Ge
	USA	Red Dog	Zn-Pb-Ag-Lagerstätte des SHMS-Typs	106 ppm Ge
<b>Geologisches Potenzial für Österreich</b>	Pb-Zn-Lagerstätten der Trias (Gailtaler Alpen, Karawanken, Nordtiroler Kalkalpen) und des Paläozoikums (Gurktaler Decke); vereinzelt Braunkohlereviere (Trimmelkam, Glanzbraunkohle der Melker Sande)			
<b>Wirtschaftliches Potenzial für Österreich</b>	Möglicherweise Radnig, Jauken, Pirkach, Hochobir, Lafatsch, Metnitz			
<b>Sekundäre Rohstoffquellen geogenen Ursprungs</b>	Möglicherweise Haldenmaterial des langzeitigen Pb-Zn-Bergbaus in Österreich; Braunkohleaschen			
<b>Weiterer Forschungs- und Untersuchungsbedarf</b>	Geologische und geophysikalische Detailuntersuchungen der bekannten Vorkommen; Evaluierung der Halden			

\*keine Angaben

## 4.3 Grafit

Grafit stellt eine natürliche, kristalline Form des Kohlenstoffs dar und wird der Gruppe der Industrieminerale zugeordnet. Im Gegensatz zu Diamant, der zweiten natürlichen kristallinen Phase des Kohlenstoffs, ist Grafit ein sehr weiches Mineral mit einer ausgezeichneten Spaltbarkeit parallel zur Basisfläche und eignet sich aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften hervorragend als Wärme- und Elektrizitätsleiter. Eine hohe Schmierfähigkeit, Säureresistenz, sowie seine Temperaturstabilität unter reduzierenden Bedingungen bis zu 3.000 °C machen Grafit zu einem wirtschaftlich bedeutenden Rohstoff für die heimische Industrie. Der Einsatz von Grafit richtet sich nach dessen Korngröße und Form, sowie nach dem Kohlenstoffgehalt des Konzentrates (üblicherweise > 80 % C). Für die Qualität von Grafit ist, wie auch für Kohle, der Gehalt an gebundenem Kohlenstoff ausschlaggebend, welcher den Verlust durch volatile Kohlenwasserstoffe berücksichtigt. Hochwertiger Flockengrafit ist bei Minimumgehalten von 3 bis 5 Gew.-% Grafit im Gestein wirtschaftlich gewinnbar, während die Bauwürdigkeitsgrenze von mikrokristallinem Grafit bei > 45 Gew.-% liegt [Pohl 2011].

Grafit-Vorkommen sind in Österreich auf zwei unterschiedliche geologische Einheiten beschränkt. In der Böhmischen Masse stellt die Bunte Serie im niederösterreichischen Waldviertel die Trägereinheit zahlreicher Grafit-Lagerstätten dar, während in den steirischen Anteilen der Grauwackenzone die Veitscher Decke als Grafitbezirk ausgewiesen wurde (Abbildung 4) [Weber et al. 1997]. Die Grafit-Mineralisationen in der Bunten Serie treten in Form von linsigen oder spindelförmig gestauchten Grafitgneisen, -schiefern und -quarziten auf und werden als Produkt einer metamorphen Überprägung von Sapropelen gedeutet [Weber 1997]. Als Ursache für die Ablagerung von Faulschlamm wird das Einsetzen von submarinem Vulkanismus mit konsequenterweise vermehrtem Absterben mariner Organismen gedeutet. Zudem bewirkte die magmatische Aktivität eine Zufuhr von hydrothermalen Lösungen – unter anderem reich an Bor – die wiederum zur Bildung von lokalen Turmalin- und Buntmetall-Mineralisationen führten [Weber et al. 1997]. Diese geochemische Bor-Anomalität manifestiert sich des Weiteren in den Bachsedimenten entlang der Vorkommen. Die niederösterreichischen Grafit-Lagerstätten wurden seit Beginn des 19. Jahrhunderts im Kleinbergbau beschürft, jedoch sind sie heute kaum mehr von wirtschaftlicher Bedeutung. Dies lässt sich unter anderem auch auf die schwierige Aufbereikbaarheit dieser SiO<sub>2</sub>-reichen Grafite zurückführen, die jedoch zur Gewährleistung der Qualität des Grafits für heutige industrielle und kommerzielle Anwendungen essenziell ist [Holzer 1964].

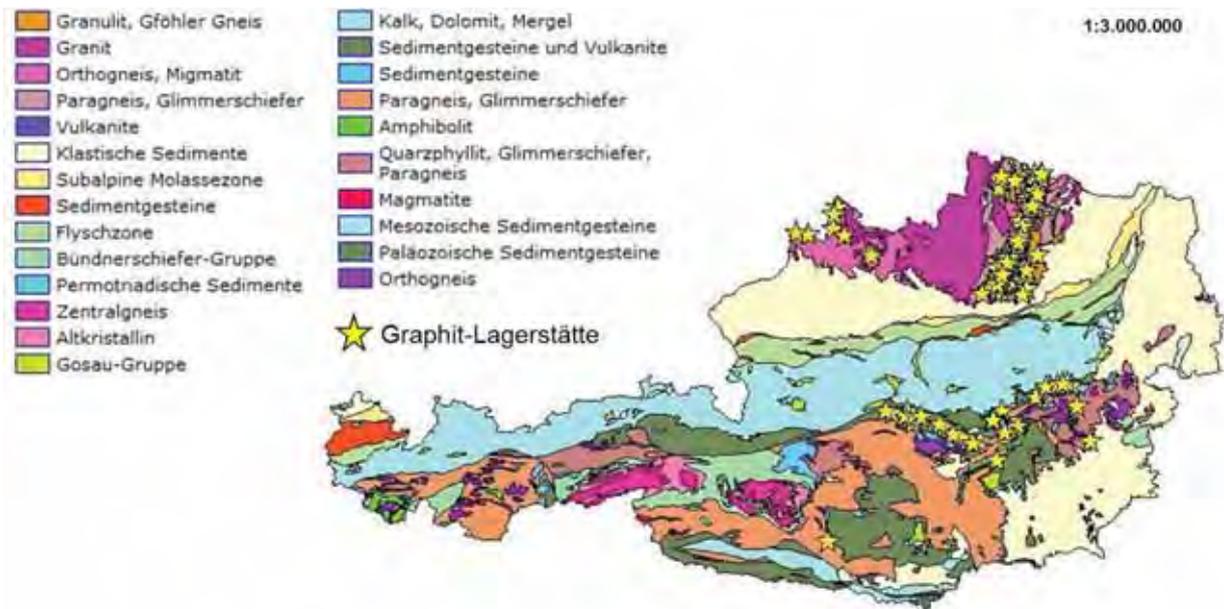


Abbildung 4: Geologische Übersichtskarte Österreichs. Gelbe Sterne markieren ein Vorkommen von Grafit [abgeändert nach GBA 2005/2009]

Die Grafitlagerstätten in der Veitscher Decke der östlichen Grauwackenzone sind durch metamorphe Überprägung von Steinkohlen hervorgegangen und sind heute in Form von Grafit-schiefern und -phylliten aufgeschlossen. Bergbaulich spielten vor allem die Lagerstätten Sunk bei Trieben und Kaisersberg bei St. Stefan ob Leoben eine bedeutsame Rolle. Letztere ist seit 2008 wieder in Betrieb und förderte im Jahr 2010 im untertägigem Bergbau insgesamt 420 t Rohgrafit mit einem Kohlenstoffgehalt von ca. 60 % [bmwfj 2011, Mali 2012 persönliche Mitteilung]. Zu prüfen wäre hier vor allem eine Erweiterung der Lagerstätte, da derzeit für den Handel Grafit zugekauft werden muss. Aufgrund der hohen Qualität des Grafits der Lagerstätte Sunk bei Trieben (81–87 % C) [Mali 2012 persönliche Mitteilung], sollte die Möglichkeit einer Wiedergewältigung des ehemaligen Bergbaues untersucht werden. Abschließend zeigt Tabelle 6 eine Zusammenstellung zur Geologie von Grafit.

Tabelle 6: Übersicht zur Geologie von Grafit

<b>Grafit</b>				
<b>Produktion 2011</b> [USGS 2012a]	925.000 t			
<b>Reserven 2011</b> [USGS 2012a]	77.000.000 t			
<b>R/P-Verhältnis</b> [eigene Berechnungen]	83 Jahre			
<b>Bauwürdigkeitsgrenze</b> [Pohl 2011]	3–5 Gew.-% Flockengrafit im Gestein > 45 Gew.-% mikrokristalliner Grafit im Gestein			
<b>Lagerstättentypen</b> [Pohl 2011]	Regionalmetamorphe Bildung von Grafit Kontaktmetamorphe Skarnlagerstätten Epigenetische Grafit-Lagerstätten An alkalische Intrusionen gebundene Lagerstätten			
<b>Wichtigste Produzenten</b> [IBM 2010] [Taylor Jr. 2006] [Wilde et al. 1997] [Wilde et al. 1999]	<b>Nation</b>	<b>Lokalität</b>	<b>Lagerstättentypus</b>	<b>Gebundener Kohlenstoff</b>
	China	Heilongjiang	Amphibolit- bis granulitfazielle Schiefer und Marmore	10–20 %
	Indien	Odisha (Orissa)	Vererzungen assoziiert mit Khondaliten (Sillimanit-Granuliten), Quarziten, Kalksilikaten, Charnockiten	10–20 %
	Brasilien	Minas Gerais	Grafitreiche Laterite	5–20 %
<b>Geologisches Potenzial für Österreich</b>	Grafitbezirke Bunte Serie in der Böhmischen Masse (Waldviertel) und Veitscher Decke in der östlichen Grauwackenzone (Steiermark)			
<b>Wirtschaftliches Potenzial für Österreich</b>	Aktiver Bergbau Kaisersberg Sunk bei Trieben (Veitscher Decke): hohe Qualität des Grafits (81–87 % C) Waldviertel: Potenzial gegeben, aber abhängig von der Qualität des Grafits			
<b>Sekundäre Rohstoffquellen geogenen Ursprungs</b>	Keine			
<b>Weiterer Forschungs- und Untersuchungsbedarf</b>	Weitere Exploration der Grafit-Lagerstätte Kaisersberg Untersuchung der Lagerstätte Sunk bei Trieben und der kleineren Vorkommen im Waldviertel auf Qualität und Tonnage, Modellberechnungen zur Wirtschaftlichkeit			

## 4.4 Niob und Tantal

Aufgrund des sehr ähnlichen geochemischen Verhaltens von Niob und Tantal liegen beide Elemente in der Natur meist kogenetisch vor und werden aus diesem Grund in einem gemeinsamen Kapitel behandelt. Bezogen auf die durchschnittliche Verteilung der Elemente in der Erdkruste tritt Niob (~20 ppm) häufiger auf als Tantal (~2 ppm). Bei der magmatischen Differentiation alkalischer und karbonatitischer Magmen wird Niob gegenüber Tantal angereichert. Im Gegensatz dazu kommt es bei der fortschreitender Fraktionierung kalkalkalischer granitischer Schmelzen zu einer relativen Anreicherung von Tantal gegenüber Niob.

Die wichtigste Mineralgruppe zur Gewinnung von Niob und Tantal ist die Mischkristallreihe Niobit-Tantalit (Columbit-Reihe). Minerale der Columbit-Reihe waren bis in die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts die einzige wirtschaftlich bedeutende Niob- und Tantalquelle. Heute sind zudem Minerale der Pyrochlor-Gruppe (Pyrochlor, Mikrolith) ökonomisch relevant. Des Weiteren können Wodginit oder Loparit in bestimmten Lagerstätten wichtige Trägerminerale sein. Auch bei Strüverit und Ilmenorutil – zwei Minerale der Rutil-Gruppe – ist es möglich, erhebliche Mengen an Niob und Tantal einzubauen. Geringe, meist ökonomisch uninteressante Gehalte können in Kassiterit ( $\text{SnO}_2$ ), Rutil ( $\text{TiO}_2$ ) oder Ilmenit ( $\text{FeTiO}_3$ ) enthalten sein.

Der Abbau und Handel mit Tantalenerzen (Coltan), aber auch Wolfram, Zinn und Gold aus zentralafrikanischen Ländern, insbesondere aus den östlichen Provinzen der Demokratischen Republik Kongo, dient teilweise zur Finanzierung bewaffneter Konflikte. Zur Erhöhung der Sorgfaltspflicht der rohstoffverarbeitenden Industrie in Bezug auf den industriellen Einsatz mineralischer Konfliktrohstoffe, existieren Bestrebungen hinsichtlich einer Rohstoffzertifizierung. Ziel dieser Maßnahmen ist es die Finanzierung bewaffneter Konflikte über den Verkauf von natürlichen Ressourcen zu unterbinden, indem ein Herkunftsnachweis jener Konfliktrohstoffe die Transparenz entlang der gesamten Lieferkette erhöht und konfliktfreie Rohstoffe nach gewissen Mindeststandards zertifiziert werden. Diesbezüglich wurde in Deutschland durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) ein Herkunftsnachweis – analytischer Fingerprint – für Tantalenerze am Beispiel der Demokratischen Republik Kongo zur Zertifizierung von Handelsketten im Bereich mineralischer Rohstoffe konzipiert und entwickelt [DERA 2011, DERA 2012].

Wirtschaftlich interessante Niob-Tantal-Vorkommen sind in den Alpen bisher nicht bekannt. Es gibt allerdings immer wieder Berichte und mineralogische Notizen über den Fund von Nb-Ta-Mineralen in Pegmatiten des ostalpinen Kristallins. So wurde etwa mehrfach von Mineralfunden in Pegmatiten im Bereich des Millstätter Seerückens berichtet [z.B. Luecke und Učík 1986]. Auch in den weit verbreiteten Spodumen-(Lithium)-Pegmatiten kommen Nb-Ta-Sn-Phasen akzessorisch vor (siehe Abbildung 5) [Černý et al. 1989a, Černý et al. 1989b, Göd 1989, Mali 2004, Postl und Golob 1979].

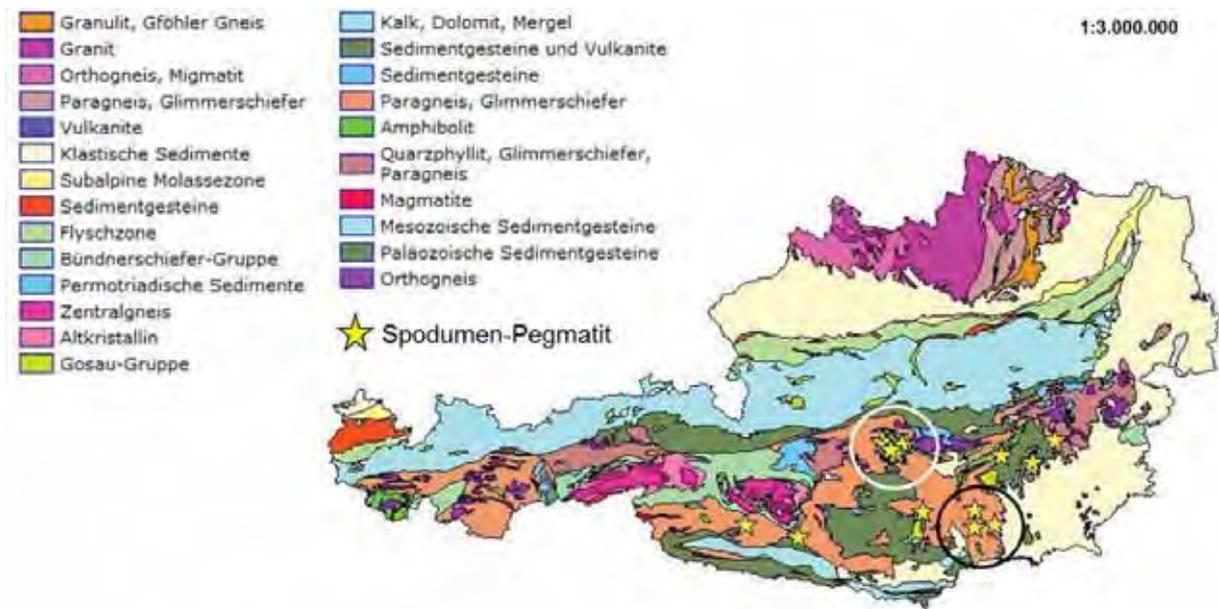


Abbildung 5: Geologische Übersichtskarte Österreichs. Gelbe Sterne markieren Spodumen-Pegmatit Lokalitäten. Schwarzer Kreis: Pegmatite der Weinebene. Weißer Kreis: Pegmatite der Wölzer Tauern [abgeändert nach GBA 2005/2009]

Zu diesen Vorkommen sind die Lithium-Lagerstätte auf der Weinebene, Koralpe (Kärnten) [Göd 1989], die zahlreichen Spodumen-Pegmatite der Wölzer Tauern (Pusterwald-Bretstein-Lachtal, Steiermark) oder auch das Pegmatitvorkommen auf der Hohen Kreuzspitze, Passeier Tal (Südtirol) zu rechnen [Melcher et al. 2010]. In den mittel- bis hochgradig metamorph überprägten Einheiten der Koralpe wurden auf der Weinebene bis zu 5,5 m mächtige Spodumen-Pegmatite nachgewiesen, die vermutlich in einer spät-tektonischen Phase während der variszischen Orogenese intrudiert sind und heute das größte bekannte Lithium-Vorkommen in den Ostalpen darstellen [Göd 1989, Mali 2004]. Neben Spodumen als Li-Träger wurden als Niob-Tantalminerale Columbit-(Fe) und niobhaltiger Rutil identifiziert [Černý et al. 1989a]. Je nach Nebengestein sind Niob und Tantal in unterschiedlichen Konzentrationen im Pegmatit angereichert. So weisen Pegmatite in eklogitisierten Amphiboliten durchschnittliche Gehalte von 19 ppm Tantal und 55 ppm Niob auf (Mittelwert über 14 Analysen). Im Gegensatz dazu enthalten die Pegmatite in den Kyanit-führenden Glimmerschiefern etwas höhere durchschnittliche Gehalte von 24 ppm Tantal und 85 ppm Niob (Mittelwert von 11 Analysen) [Göd 1989]. Wenn sich diese niedrigen Elementkonzentrationen in Folgeuntersuchungen bestätigen, würde sich die Gewinnung von Niob- und Tantal wohl als nicht wirtschaftlich rentabel erweisen [Göd 2012 persönliche Mitteilung].

In den Lithium-Pegmatiten der Wölzer Tauern wurden folgende zahlreiche Nb-Ta-Oxide nachgewiesen: Columbit-(Mn), Tantalit-(Mn), Pyrochlor, Mikrolith, Fersmit, Aeschynit, Wodginit, Ixiolith, und Tapiolith [Mali 2004, Melcher et al. 2010, Mali 2012 persönliche Mitteilung]. Des Weiteren finden sich in Pegmatiten vom Scharnitzfeld Einschlüsse von Niob-

Tantalmineralen in Kassiterit. Bei durchschnittlichen Gehalten von ca. 30 ppm Tantal und 50 ppm Niob (Anzahl der Analysen unklar) scheint das wirtschaftliche Potenzial der Pegmatite in den Wölzer Tauern allerdings gering [Mali 2012 persönliche Mitteilung].

Weitere Niob- und Tantal-Mineralisationen sind aus peraluminösen Muskovit-Graniten der Böhmisches Masse beschrieben. Die im nördlichen Waldviertel direkt an der Grenze zu Tschechien aufgeschlossenen Phyrabruck und Homolka Granite weisen Anreicherungen von Niob und Tantal vor. Columbit-(Fe) tritt auch hier vorwiegend als disseminierte Einschlussphase in Kassiterit auf. Gesamtgesteinsanalysen des Homolka Granits ergaben 30–150 ppm Niob und bis zu 60 ppm Tantal [Breiter und Scharbert 1995] sowie bis zu 340 ppm Niob für den Phyrabruck Granit [Breiter und Scharbert 1998]. Zudem wurden Cassiterit, Columbit und weitere Nb-Ta-Ti-Phasen in Bachsedimenten und eluvialen Seifen beschrieben, was sich unter anderem in zahlreichen Niob-Anomalien in den Bachsedimenten im Wald- und Mühlviertel manifestiert (siehe Abbildung 6). Wirtschaftlich relevante Mineralisationen liegen jedoch soweit bekannt nicht vor [Breiter und Scharbert 1998]. Auch Columbit-Vererzungen im östlichen Mühlviertel stellen nach dem aktuellen Kenntnisstand kein wirtschaftliches Potenzial dar [Hoffmann und Malecki 2002].

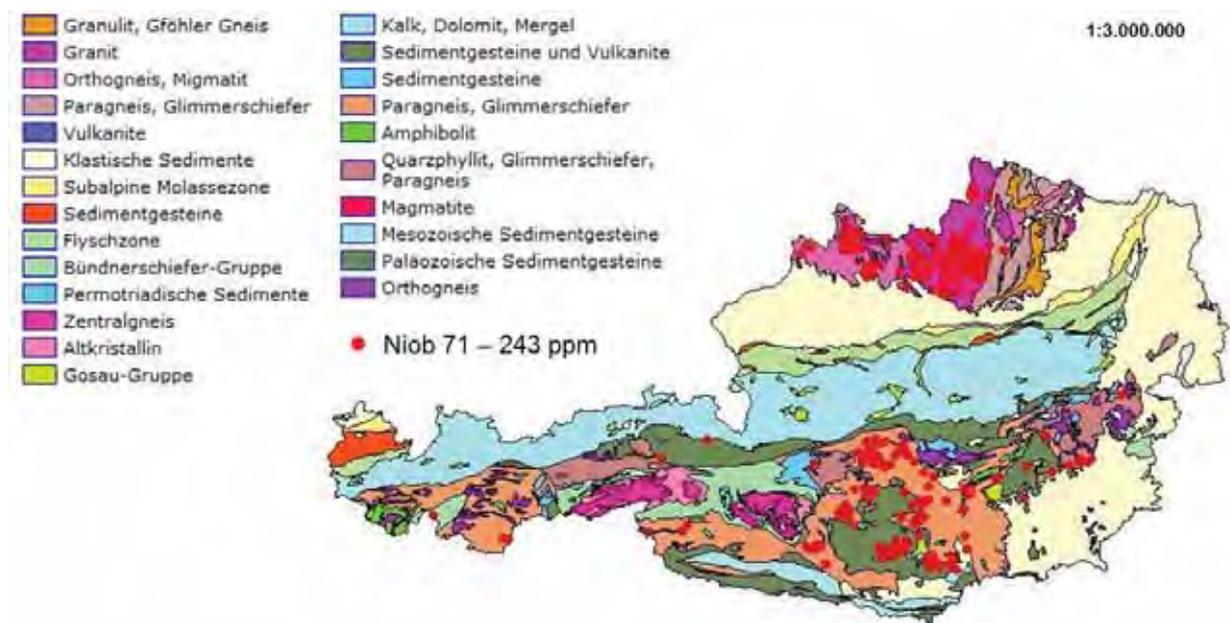


Abbildung 6: Geologische Übersichtskarte Österreichs. Rote Punkte markieren eine Geochemie-Anomalie des Elements Niob [abgeändert nach GBA 2005/2009]

Auch in den ostalpinen Einheiten lieferte die chemische Analytik der Bachsedimente im Zuge der geochemischen Beprobung Österreichs zahlreiche geochemische Anomalien von Niob (siehe Abbildung 6). In diesen Anomaliegebieten korrelieren erhöhte Gehalte an Niob und Tantal zum Teil mit Titan,  $\pm$  Wolfram  $\pm$  Zinn,  $\pm$  Vanadium. Folgeuntersuchungen konnten zeigen, dass diese Anomalien hauptsächlich durch die Titanoxide Rutil und Ilmenit

verursacht werden, in denen Niob, Tantal etc. für Titan substituieren [Neinavaie 1989]. Diese Ergebnisse wurden für ein Gebiet in der südlichen Saualpe (Haimburg-Wandelitzen) unlängst bestätigt [Baumgartner 2010]. Die untersuchten Rutilen führen bis 9.000 ppm Nb und 400 ppm Ta. Als Liefergesteine der Rutilen in den Bachsedimenten konnten die metamorphen Nebengesteine identifiziert werden, wobei die höchsten Gehalte interessanterweise vermutlich in Rutil aus SiO<sub>2</sub>-reichen Metavulkaniten auftreten. Inwieweit diese nicht-pegmatitischen Gesteine ein mögliches Potenzial für Nb-Ta-Vererzungen darstellen, müssen zukünftige Untersuchungen zeigen. Abschließend zeigen die Tabelle 7 und Tabelle 8 eine Zusammenstellung zur Geologie von Niob und Tantal.

Tabelle 7: Übersicht zur Geologie von Niob und Tantal

Niob – Tantal			
<b>Ökonomisch relevante Erzminerale</b> [Dill 2010, Pohl 2011]	Erzmineral	Chemische Formel	Erzgehalt [Gew.-%]
	Niobit	(Fe,Mn)(Nb>Ta) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	31–79 % Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	Tantalit	(Fe,Mn)(Ta>Nb) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	52–86 % Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	Pyrochlor	(Na,Ca) <sub>2</sub> (Nb,Ta,Ti) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (O,OH,F)	56–73 % (Nb,Ta) <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	Mikrolith	(Na,Ca) <sub>2</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (O,OH,F)	86 % Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	Wodginit	(Ta,Nb,Sn,Mn,Fe) <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	70 % Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	Loparit	(Na,Ca)(Ti,Nb)O <sub>3</sub>	10 % Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	Strüverit	(Ti,Ta,Fe)O <sub>2</sub>	11 % Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 38 % Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	Ilmenorutil	Fe <sub>x</sub> (Nb,Ta) <sub>2x4</sub> Ti <sub>1-x</sub> O <sub>2</sub>	variabel
	<b>Niob</b>	<b>Tantal</b>	
<b>Häufigkeit in der Erdkruste</b> [Dill 2010]	20 ppm	2,4 ppm	
<b>Produktion 2011</b> [USGS 2012a]	63.000 t	790 t	
<b>Reserven 2011</b> [USGS 2012a]	3.000.000 t	120.000 t	
<b>R/P-Verhältnis</b> [eigene Berechnungen]	48 Jahre	152 Jahre	
<b>Bauwürdigkeitsgrenze</b> [Pohl 2011]	~0,3 Gew.-% Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	~0,03 Gew.-% Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
<b>Lagerstättentypen</b> [Černý und Ercit 1989] [Dill 2010] [Pohl 2011]	Primäre Lagerstätten Li-Cs-Ta Pegmatite (Ta > Nb), Seltene-Elemente-Granite (Ta > Nb), Karbonatite (Nb > Ta), Peralkalische Granite und Syenite (Nb > Ta) Sekundäre Lagerstätten Lateritische Regolithe und Bauxite (Nb > Ta), Sn-Ta-Nb Seifenlagerstätten (Ta > Nb)		

Tabelle 8: Übersicht zur Geologie von Niob und Tantal

	<b>Niob</b>			
	<b>Nation</b>	<b>Lokalität</b>	<b>Lagerstättentypus</b>	<b>Ø Erzgehalt [Gew.-%]</b>
<b>Wichtigste Produzenten</b> [Warnsloh und Meyer 2007]	Brasilien	Araxá	Karbonatit mit Phoscoriten und lateritischer Überdeckung	1,5–2,5 % Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
		Catalão	wie Araxá	1,3–1,7 % Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	Kanada	Niobec, St. Honoré	Karbonatit mit Nb-reichen Dolomiten und Söviten	0,66 % Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
		Oka	Karbonatitische und alkali-silikatische Intrusiva	0,53–0,63 % Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	<b>Tantal</b>			
	Australien	Wodgina	Nb-reiche Albit-Spodumen-Pegmatite	0,018–0,037 % Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
		Greenbushes	Nb-reiche Albit-Quarz-Pegmatite	0,022 % Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	Brasilien	Mibra Nazareno/ Sao Joao del Rei	Granitische Selten-Metall-Pegmatite	0,0375 % Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 0,0092 % Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	Äthiopien	Kenticha	Granitische Selten-Metall-Pegmatite	0,015 % Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	DR Kongo	Kivu, Lubero, Katanga usw.	Pegmatite, eluviale und alluviale Seifenlagerstätten	-
<b>Geologisches Potenzial für Österreich</b>	Nachweis von Niob und Tantal-Mineralen in verschiedenen Spodumen-Pegmatiten der Ostalpen (Wölzer Tauern, Weinebene/Koralpe) und Graniten der Böhmisches Masse; zahlreiche geochemische Nb-Ta-Anomalien in Bachsedimenten der Ostalpen und der Böhmisches Masse			
<b>Wirtschaftliches Potenzial für Österreich</b>	Derzeit keine wirtschaftliche Bedeutung			
<b>Sekundäre Rohstoffquellen geogenen Ursprungs</b>	Keine			

## 4.5 Platingruppenelemente

Die Elemente Ruthenium (Ru), Rhodium (Rh), Palladium (Pd), Osmium (Os), Iridium (Ir) und Platin (Pt) werden aufgrund ihrer chemischen Ähnlichkeiten als Platingruppenelemente (PGE), bzw. ihre in der Natur vorkommenden Verbindungen als Platingruppenminerale (PGM) zusammengefasst. Die wichtigsten eigenständigen PGE-Erzminerale sind die Sulfide Cooperit und Braggit sowie das Arsenid Sperryolith, wobei in vielen Lagerstätten aber auch zahlreiche andere PGM wirtschaftlich bedeutende Träger der PGE sein können (derzeit sind

ca. 140 PGM bekannt). Des Weiteren sind auch die Sulfide Pentlandit, Chalkopyrit oder Pyrrhotin wichtige Trägerminerale von Platingruppenelementen, deren Abbau sich aufgrund der hohen Marktpreise der PGE auch schon bei geringen Elementkonzentrationen wirtschaftlich lohnt [Dill 2010]. Zudem sind natürliche Legierungen dieser Elemente mit Eisen üblich, was die siderophilen Eigenschaften der Platingruppenelemente belegt. Die durchschnittliche Verteilung von Platin und Palladium in der Erdkruste entspricht in etwa jener von Gold (0,004 ppm), wobei die PGE generell in ultramafischen und mafischen Gesteinen signifikant höher konzentriert sind als in sauren bis intermediären Magmatiten [Pohl 2011].

In Österreich wurden Platingruppenminerale in Chromititen des Ultramafitkomplexes von Kraubath bzw. Hochgrössen (Speik Komplex) und in der Lokalität Haidbachgraben im Felbertal in permomesozoischen Metabasiten des Habach Komplexes nachgewiesen [Malitch et al. 2003, Thalhammer und Stumpfl 1988, Weber et al. 1997]. Die PGE-Mineralisationen in den penninischen Einheiten der Unteren Schieferhülle (Lokalität Haidbachgraben) sind mit Ni-Cu-As-Vererzungen assoziiert. Die Palladium- und Platingehalte der etwa 300 t Ni-Metallerze liegen zwischen 0,6 ppm Pd und 0,22 ppm Pt [GBA 2005/2009, Weber et al. 1997]. Die Ultramafite des Speik-Komplexes werden als Relikte eines neoproterozoischen/altpaläozoischen Supra-Subduktionszonen-Ophioliths interpretiert. Hohe Aufschmelzraten durch mehrfaches partielles Aufschmelzen des Mantels, die Assoziation mit Chromititen und das Auftreten von PGE-Mineralisationen ist für diese Settings charakteristisch. Die österreichischen Vorkommen im Speik-Komplex weisen eine für einen Ophiolith untypisch hohe Diversität an PGM auf, die sich aber mit der magmatisch-metamorphen Entwicklung des Komplexes erklären lassen. Neben dem magmatischen Hochtemperatur-Vererzungsstadium treten Paragenesen, die sich bei niedrigeren Temperaturen, vermutlich im Zuge metamorpher Überprägung und Mobilisation gebildet haben, auf. Untersuchungen hinsichtlich der Genese der PGM-führenden Chromitite legen eine Bildung der ultramafischen Gesteine in der Übergangszone zwischen dem basalen Ophiolithanteilen und dem Oberen Erdmantel nahe [Malitch et al. 2003].

Die Konzentration an PGE mit 0,7 bis 0,8 ppm in den österreichischen Vorkommen ist im Vergleich mit anderen Ophiolithkomplexen relativ hoch. Sie sind trotz der hohen Preise der Platingruppenmetalle aber nur von akademischen Interesse und für eine Gewinnung der PGE nicht geeignet [Weber et al. 1997]. Abschließend zeigt die Tabelle 9 eine Zusammenstellung zur Geologie der Platingruppenelemente.

Tabelle 9: Übersicht zur Geologie der Platingruppenelemente

Platingruppenelemente				
<b>Ökonomisch relevante Erzminerale</b> [Pohl 2011]	<b>Erzmineral</b>	<b>Chemische Formel</b>		<b>Max. Erzgehalt [Gew.-%]</b>
	Cooperit	(Pt,Pd)S		~82 % Pt
	Braggit	(Pt,Pd,Ni)S		~59 % Pt, ~20 % Pd
	Sperryolith	PtAs <sub>2</sub>		54 % Pt
<b>Mittlere Häufigkeit in der Erdkruste</b> [Dill 2010]	0,0010 ppm Ru	0,0010 ppm Rh	0,0100 ppm Pd	
	0,0020 ppm Os	0,0002 ppm Ir	0,0050 ppm Pt	
<b>Produktion 2010</b> [USGS 2011]	207 t Pd; 192 t Pt; 73,2 t Os,Ir, Rh, Ru			
<b>Reserven 2010</b> [USGS 2012a]	66.000 t PGM			
<b>R/P-Verhältnis</b> [eigene Berechnungen]	140 Jahre			
<b>Bauwürdigkeitsgrenze</b> [Pohl 2011]	~3–10 ppm PGE in Primärlagerstätten ~0,5 ppm PGE in Seifenlagerstätten			
<b>Lagerstättentypen</b> [Dill 2010] [Pohl 2011]	Primäre Lagerstätten Orthomagmatische PGE-Vererzungen in lagigen mafischen Intrusionen; orthomagmatische PGE-Vererzungen in Flutbasalten; orthomagmatische PGE-Vererzungen in ultramafischen Ringkomplexen (Alaska-Typ); Orthomagmatische PGE-Vererzungen in Ophiolithen; orthomagmatische PGE-Vererzungen in archaischen Komatiiten; PGE als Bestandteil von stratiformen Kupfer-Lagerstätten in Schwarzschiefern; PGE-Vererzungen in Skarnen und Porphyrischen Kupfer-Lagerstätten			
	Sekundäre Lagerstätten Supergene lateritische Regolithe; residuale und kolluviale Seifenlagerstätten alluviale und küstennahe Seifenlagerstätten			
<b>Wichtigste Produzenten</b> [Dill 2010] [Pohl 2011] [USGS 2012b]	<b>Nation</b>	<b>Lokalität</b>	<b>Lagerstättentypus</b>	<b>Ø Erzgehalt [Gew.-%]</b>
	Südafrika	Bushveld	Orthomagmatische PGE-(Chromit)-Vererzungen in lagigen Mafischen Intrusionen	~4–8 ppm PGE (60 % Pt, 30 % Pd)
	Russland	Noril'sk	Cu-Ni-PGE-Vererzungen in kontinentalen Flutbasalten	5–6 ppm PGE
	USA	Stillwater	Orthomagmatische PGE-Vererzungen in lagigen mafischen Intrusionen	4–13 ppm PGE
<b>Geologisches Potenzial In Österreich</b>	Ultramafite im Ophiolith des Speik Komplexes, Chromitite von Hochgrössen und Kraubath; PGE-Mineralisationen in den penninischen Einheiten des Tauern Fensters, Lokalität Haidbachgraben			
<b>Wirtschaftliches Potenzial für Österreich</b>	Keine wirtschaftliche Bedeutung			
<b>Sekundäre Rohstoffquellen geogenen Ursprungs</b>	Keine			
<b>Weiterer Forschungs- und Untersuchungsbedarf</b>	Untersuchung penninischer Schwarzschiefer auf mögliche PGE-Gehalte			

## 4.6 Seltene Erdelemente

Der Begriff der Seltene Erdelemente (SEE) umfasst 15 Elemente der Gruppe der Lanthaniden plus Scandium und Yttrium. Anhand der Atommasse können die Seltene Erdelemente in zwei Gruppen unterteilt werden. Die Gruppe der leichten SEE umfasst Lanthan (La), Cer (Ce), Praseodym (Pr), Neodym (Nd), Promethium (Pm), Samarium (Sm), Europium (Eu) und Scandium (Sc), während Yttrium (Y), Gadolinium (Gd), Terbium (Tb), Dysprosium (Dy), Holmium (Ho), Erbium (Er), Thulium (Tm), Ytterbium (Yb) und Lutetium (Lu) zu den schweren SEE gezählt werden. Die meisten dieser Elemente sind dennoch nicht so selten wie es der Name vermuten lässt. So sind alle SEE mit Ausnahme von Promethium – das aufgrund seiner Radioaktivität heute nicht mehr natürlich vorkommt – häufiger in der Erdkruste vorhanden als zum Beispiel Gold oder Silber. Die durchschnittliche Häufigkeit der SEE in der Erdkruste beträgt 242 ppm [Lide 1997]; die elementspezifische Verteilung ist in der Tabelle 10 am Ende dieses Kapitels angeführt. Die wichtigsten Erzminerale für leichte SEE stellen Monazit und Bastnäsit dar, während Xenotim und Loparit allgemein höhere Konzentrationen an schweren SEE aufweisen [Möller et al. 1989]. Generell sind die Metalle der schweren Seltene Erden seltener als jene der leichten Seltene Erden, wobei das Verhältnis der leichten zu den schweren SEE durch die Lagerstätte (bzw. den Lagerstätten-typ) vorgegeben ist.

Im Unterschied zur Gewinnung anderer mineralischer Rohstoffe liegen bei den SEE zusätzliche Problematiken vor. Einzelne SEE können nicht selektiv abgebaut werden, da es sich in der Regel um polymetallische Lagerstätten mit komplexer Mineralogie handelt. Die Aufbereitung ist daher entsprechend schwierig bzw. herausfordernd. Die radioaktiven Elemente U und Th sind häufige Begleitelemente in vielen SEE-Lagerstätten, was zu einer erhöhten Umweltproblematik bei der Gewinnung dieser Rohstoffe beiträgt.

In Österreich sind keine SEE-Lagerstätten bzw. -Vorkommen bekannt. Da Karbonatite bzw. Alkaligesteinskomplexe in Österreich unbekannt und auf Grund der geologischen Verhältnisse auch nicht zu erwarten sind, muss das geologische Potenzial für „klassische“ SEE-Lagerstätten als negativ bewertet werden.

Alternative primäre Quellen für SEE in Österreich sind allerdings nicht bzw. kaum untersucht. In Anlehnung an die chinesischen Ionenaesorptionston-Lagerstätten wird empfohlen, die österreichischen Kaolin-Vorkommen in der Böhmisches Masse (Mühl- und Waldviertel) auf erhöhte SEE-Gehalte hin zu untersuchen. Dies ist nach Wissen der Autoren dieser Studie bisher nicht erfolgt.

In der Scheelit-Lagerstätte Felbertal wurden erhöhte Konzentrationen von SEE in Scheelit nachgewiesen. Scheelite im aktiven Westfeld der Lagerstätte führen 1.100–3.400 ppm SEE+Y, solche aus dem heimgesagten Ostfeld 750–1.500 ppm SEE+Y [Raith, unveröffentlichte Daten]. Im Zuge weiterführender Untersuchungen sollten die Stoffmengen und

Gehalte im Detail erfasst werden, um auf dieser Datenbasis dann zu beurteilen, ob die Gewinnung von SEE als Beiprodukt der Wolframgewinnung eventuell wirtschaftlich sinnvoll wäre.

Polymetallische Lagerstätten des Eisenoxid-Kupfer-Gold-Typs (Iron oxide copper gold, IOCG) könnten eine potenzielle alternative Quelle für SEE darstellen, aus denen es möglich ist, neben Kupfer und Gold die SEE eventuell als Nebenprodukte zu gewinnen. Moderne geowissenschaftliche Untersuchungen, inwieweit dieser Lagerstättentyp auch in den Ostalpen auftritt bzw. inwieweit die zahlreichen historischen Edelmetall- und Kupferlagerstätten in Österreich allenfalls SEE führen, fehlen.

Während der geologischen Entwicklung der Alpen kam es mehrfach zur Bildung von Ozeanen mit der Ablagerung tiefmariner pelagischer und auch exhalativer Sedimente (z.B. Penninischer Ozean im Jura). Diese ehemals ozeanischen Gesteinsabfolgen sind heute als metamorphe Gesteinsserien in das tektonisch komplexe Gebirge der Alpen eingebaut. Das geologische Potenzial dieser Abfolgen bezüglich SEE-Vererzungen in marinen (Meta)sedimenten ist unbekannt. Abschließend zeigt die Tabelle 10 eine Zusammenstellung zur Geologie von den Elementen der Seltenen Erden.

Tabelle 10: Übersicht zur Geologie von den Elementen der Seltene Erden

Seltene Erdelemente										
<b>Ökonomisch relevante Erzminerale</b> [Pohl 2011]	<b>Erzmineral</b>		<b>Chemische Formel</b>					<b>Max. Erzgehalt [Gew.-%]</b>		
	Monazit		(Ce,La,Y,Nd,Sm,Th)PO <sub>4</sub>					65 % SEE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
	Bastnäsit		(Ce,La,Y)CO <sub>3</sub> (F,OH)					75 % SEE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
	Xenotim		Y(HREE)PO <sub>4</sub>					61 % SEE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
	Loparit		(Ce,Na,Ca)(Ti,Nb)O <sub>3</sub>					36 % SEE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
<b>Mittlere Häufigkeit in der Erdkruste</b> [Lide 1997]	Element ppm	La 39	Ce 67	Pr 9,2	Nd 42	Sm 7,1	Eu 2,0	Gd 6,2	Tb 1,2	
	Element ppm	Dy 5,2	Ho 1,3	Er 3,5	Tm 0,5	Yb 3,2	Lu 0,8	Y 33	Sc 22	
<b>Produktion 2011</b> [USGS 2012a]	130.000 t SEE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>									
<b>Reserven 2011</b> [USGS 2012a]	110.000.000 t SEE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>									
<b>R/P-Verhältnis</b> [eigene Berechnungen]	846 Jahre									
<b>Bauwürdigkeitsgrenze</b> [Pohl 2011]	~ 2–6 % SEE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>									
<b>Lagerstättentypen</b> [Dill 2010] [Pohl 2011]	Primäre Lagerstätten; orthomagmatische, magmatisch-hydrothermale Vererzungen in Karbonatiten; orthomagmatische Vererzungen in Magnetit-Apatiterzen (Alkalikomplexe); karbonatitisch-hydrothermale Verdrängungslagerstätten; Skarnlagerstätten; Magmatisch-hydrothermale Eisenoxid-Kupfer-Gold-Lagerstätten; sekundäre Lagerstätten; residuale Verwitterungslagerstätten (Ionenadsorptionstone); Seifenlagerstätten; marine Tiefseeschlämme									
<b>Wichtigste Produzenten</b> [Castor 2008] [Pohl 2011] [Wu et al. 1996]	<b>Nation</b>	<b>Lokalität</b>		<b>Lagerstättentypus</b>				<b>Ø Erzgehalt [Gew.-%]</b>		
	China	Bayan Obo		Hydromthermale Vererzungen in Dolomit- Karbonatiten und oxidischen Eisenerzen				6 % SEE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
		Jiangxi		Ionenadsorptionstone				0,05–0,2 % SEE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
	Indien	Aluva/Kerala		Alluviale Seifenlagerstätten				-		
USA	Mountain Pass		Karbonatitischer, alkalischer Intrusionskomplex				8,9 % SEE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
<b>Geologisches Potenzial für Österreich</b>	Möglicherweise Kaolin-Vorkommen in Bereichen chemisch verwitterter Granite und Gneise (Böhmische Masse); Scheelit-Lagerstätte Felbertal									
<b>Wirtschaftliches Potenzial für Österreich</b>	Nicht zu erwarten									
<b>Sekundäre Rohstoffquellen geogenen Ursprungs</b>	Keine									
<b>Weiterer Forschungs- und Untersuchungsbedarf</b>	Evaluierung alternativer primärer SEE-Vorkommen (siehe Text)									

## 4.7 Vanadium

Vanadium ist der einzige in diesem Kapitel behandelte Rohstoff, der von der EU-Kommission nicht als kritisch erachtet wird. Die Aufnahme als kritischen Rohstoff in die vorliegende Studie liegt in der nationalen Bedeutung der österreichischen verarbeitenden Industrie. Österreich importiert und verarbeitet > 1 % der Weltproduktion an Vanadium und ist ein wichtiger internationaler Lieferant und Exporteur von Ferrovandium.

Das wirtschaftlich bedeutendste Vanadiummineral ist Coulsonit, ein Vertreter der Spinell-Gruppe. Coulsonit tritt als reines Endglied in der Natur nur äußerst selten auf, ist jedoch häufiger als chemische Komponente in Titanomagnetit-Mischkristallen enthalten. Daneben spielen Vanadium-Mineralisationen in der Oxidationszone von Uran-Lagerstätten in Form von Montroseit, Carnotit und Tyuyamunit eine wirtschaftliche Rolle. Die durchschnittliche Bauwürdigkeitsgrenze beläuft sich in reinen Vanadium-Lagerstätten auf etwa 1 Gew.-% V. Jedoch wird Vanadium meist als Nebenprodukt des Eisenbergbaus gewonnen, wo Vanadium-Konzentrationen von 0,02 Gew.-% V noch wirtschaftlich genutzt werden können [Pohl 2011].

Vanadium ist mit durchschnittlich 150 ppm ein relativ häufiges Element der Erdkruste. Bedingt durch seinen geochemischen Charakter wird es bevorzugt in die Kristallstruktur von Fe-Ti-Cr-Phasen in mafischen Gesteinen eingebaut. Die Konzentration von Vanadium in Magmatiten nimmt dabei mit zunehmendem SiO<sub>2</sub>-Gehalt von Peridotiten (210 ppm) und Pyroxeniten (195 ppm) zu Dioriten/Andesiten (99 ppm) und Graniten (88 ppm) stark ab [Dill 2010].

Aus einer Abfrage des interaktiven Rohstoff-Informationssystems (IRIS) ist zu erkennen, dass bisher keine eigenständigen Vanadium-Lagerstätten in Österreich bekannt sind. Die Darstellung der Geochemie von Bachsedimenten hinsichtlich signifikanter Vanadium-Anomalien zeigt jedoch, dass erhöhte Konzentrationen innerhalb der Grauwackenzone südöstlich von Saalfelden, in den penninischen Einheiten des Hollersbachtals und Felbertals in der Nähe von Mittersill sowie nördlich von Haimburg in den ostalpinen Einheiten des Saualm-Kristallins auftreten (Abbildung 7). Auffallend ist eine Korrelation dieser Vanadium- mit Eisen-Anomalien. Da eine Häufung solcher Vanadium-Eisen-Anomalien vorwiegend in unmittelbarer Nähe von basischen Vulkaniten, Metabasiten und Orthogneisen erkennbar ist, kann die Anreicherung der Bachsedimente mit Vanadium vermutlich auf Erosion der Fe-V-(Ti)-Phasen aus magmatisch-metamorphen Gesteinen zurückgeführt werden.

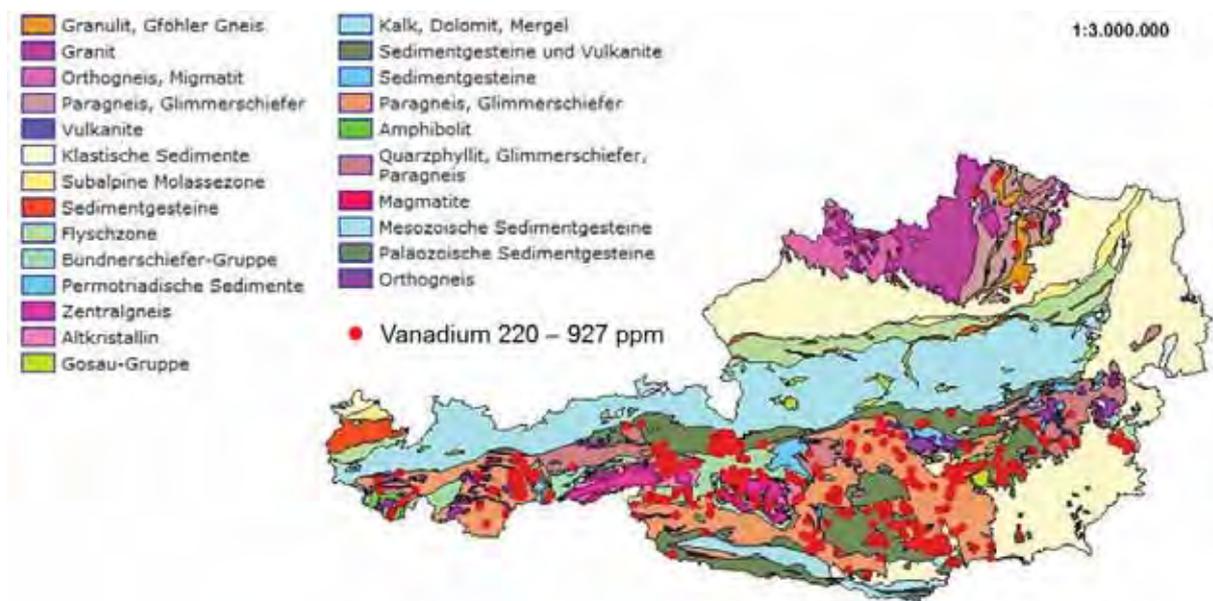


Abbildung 7: Geologische Übersichtskarte Österreichs. Rote Punkte markieren eine Geochemie-Anomalie des Elements Vanadium [abgeändert nach GBA 2005/2009]

Ausgehend von den bekannten genetischen Typen von Vanadium-Lagerstätten lässt sich nur ein bedingtes geologisches Potenzial für Titanomagnetit-Vorkommen in Österreich erkennen. An mafische Intrusionen gebundene stratiforme Lagerstätten sind aus geologischen Gründen unwahrscheinlich. Jedoch sind in Österreich zahlreiche Magnetitvorkommen bekannt (siehe Abbildung 8). An Chloritschiefer gebundene stratiforme Magnetit- und Ilmenit-Vererzungen wurden in den moravischen Einheiten des Waldviertels nachgewiesen. Untersuchungen dieser Chloritschiefer zeigten erhöhte Konzentrationen an Vanadium von ca. 200 ppm [Libowitzky 1990]. Die Gesamtzusammensetzung der Metasedimente sowie die stratiforme Lagerung von Magnetit lassen einen klastisch-sedimentären Ursprung vermuten, wobei die Erzminerale in diesen Paläoseifen wahrscheinlich von basischen Magmatiten stammen [Libowitzky 1990]. Eine Abschätzung des Ressourcenpotenzials kam allerdings zu dem Ergebnis, dass im Gebiet Waldviertel-Nord keine bauwürdigen Eisenerze zu erwarten sind [Hoffmann und Malecki 2002]. Damit erscheint auch die Gewinnung von Vanadium als unwahrscheinlich.

Ölschiefer-Vorkommen sind unter anderem in den Nördlichen Kalkalpen in Tirol bekannt. Derzeit existiert nur eine obertägige Betriebsstätte im Bächental, die 2010 eine Menge von 176 t Ölschiefer förderte [bmwfj 2011]. Schwarzschiefer der Seefelder Schichten enthalten etwa bis zu 850 ppm V [Křibek et al. 1999]. Die Frage, in wie weit prä-tertiäre Sedimentgesteine, die reich an organischem Kohlenstoff sind, sich in Österreich für einen wirtschaftlich rentablen Abbau von Elementen wie Vanadium eignen, ist noch zu klären [Solti und Lobitzer 1989, Hoffmann und Malecki 2002].

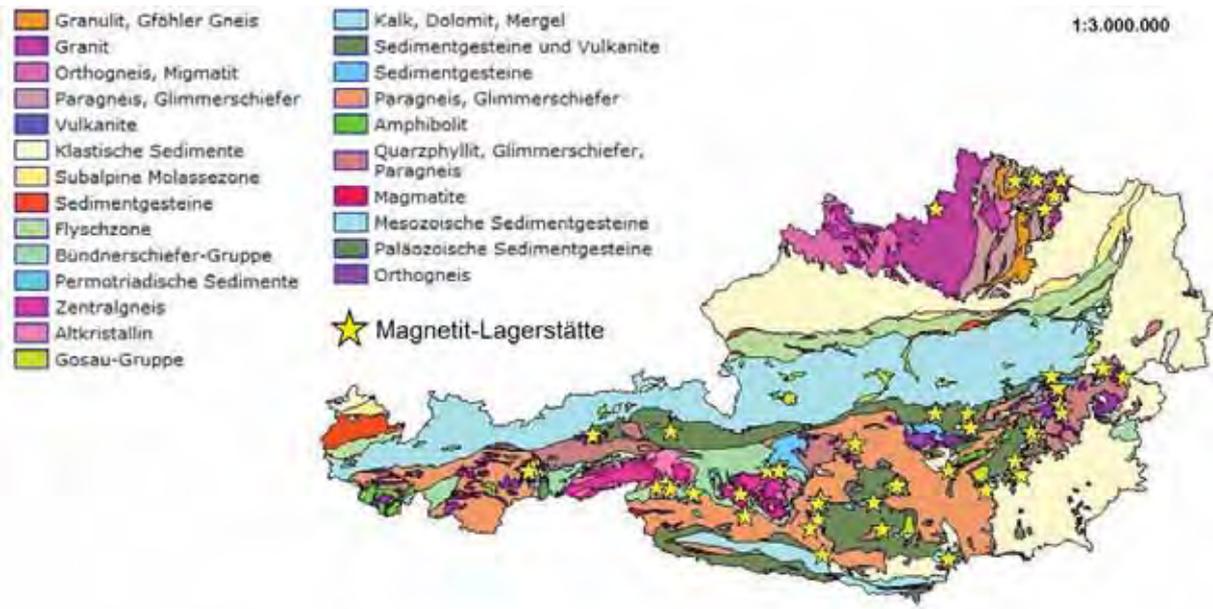


Abbildung 8: Geologische Übersichtskarte Österreichs. Gelbe Sterne markieren bekannte Vorkommen/historische Lagerstätten von Magnetit [abgeändert nach GBA 2005/2009]

Abschließend zeigt die Tabelle 11 eine Zusammenstellung zur Geologie von Vanadium.

Tabelle 11: Übersicht zur Geologie von Vanadium

Vanadium				
<b>Ökonomisch relevante Erzminerale</b> [Pohl 2011]	<b>Erzmineral</b>	<b>Chemische Formel</b>	<b>Max. Erzgehalt [Gew.-%]</b>	
	Coulsonit	$\text{FeV}_2\text{O}_4$	variabel	
	Montroseit	$(\text{V,Fe})\text{O}(\text{OH})$	variabel	
	Carnotit	$\text{K}_2(\text{UO}_2)_2\text{V}_2\text{O}_8 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	20 % $\text{V}_2\text{O}_5$	
	Vanadinit	$\text{Pb}_5\text{Cl}(\text{VO}_4)_3$	19 % $\text{V}_2\text{O}_5$	
Tyuyamunit	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2\text{V}_2\text{O}_8 \cdot 5\text{-}8\text{H}_2\text{O}$	19 % $\text{V}_2\text{O}_5$		
<b>Mittlere Häufigkeit in der Erdkruste</b> [Dill 2010]	150 ppm			
<b>Produktion 2011</b> [USGS 2012a]	60.000 t			
<b>Reserven 2011</b> [USGS 2012a]	14.000.000 t			
<b>R/P-Verhältnis</b> [eigene Berechnungen]	233 Jahre			
<b>Bauwürdigkeitsgrenze</b> [Pohl 2011]	~1 % V >0,02 % V als Beiprodukt			
<b>Lagerstättentypen</b> [Dill 2010] [Pohl 2011]	Magmatische Lagerstätten; orthomagmatische V-Ti-Eisenoxid-Lagerstätten in mafischen Intrusionen; V-(Nb-Ti)-Lagerstätten assoziiert mit alkalischen Intrusionen; sedimentäre Lagerstätten; U-Infiltrationslagerstätten (Calcrete); Ölschiefer und -sande; V-haltige Phosphorite; nicht sulfidische Pb-Cu-Zn-Lagerstätten in Karbonaten			
<b>Wichtigste Produzenten</b> [Moskalyk und Alfantazi 2003] [Pohl 2011] [Raja 2007]	<b>Nation</b>	<b>Lokalität</b>	<b>Lagerstättentypus</b>	<b>Ø Erzgehalt [Gew.-%]</b>
	China	Panzhihua	Orthomagmatische Titanomagnetite in mafischen Intrusionen	0,28 % V
		Lanshan		-
		Yunnan, etc.	Schwarzschiefer	< 2 % V
	Südafrika	Bushveld	Orthomagmatische Titanomagnetite in mafischen Intrusionen	0,84 % V
Russland	Kachkanar	Orthomagmatische Titanomagnetite in mafischen Intrusionen	0,07–0,28 % V	
<b>Geologisches Potenzial für Österreich</b>	Orthomagmatische Titanomagnetite basischer Magmatite; bituminöse Öl- und Schwarzschiefer			
<b>Wirtschaftliches Potenzial für Österreich</b>	Potenzial der Öl- und Schwarzschiefer ist abzuklären			
<b>Sekundäre Rohstoffquellen geogenen Ursprungs</b>	Schweröl			
<b>Weiterer Forschungs- und Untersuchungsbedarf</b>	Evaluierung der Vanadiumgehalte geeigneter Öl- und Schwarzschiefer in Österreich und Bewertung der Vorkommen auf deren Abbauwürdigkeit			

## 4.8 Wolfram

Wolfram wird in der Eisenmetallurgie zu der Elementgruppe der Stahlveredler gezählt und zeichnet sich unter anderem durch einen hohen Schmelzpunkt, hohe Dichte, Härte und Zugfestigkeit sowie niedrige thermische Ausdehnung aus. Diese Eigenschaften machen es für einige industrielle Anwendungen unsubstituierbar. Für die Aufbereitung, Verarbeitung und Verwendung in verschiedenen Technologien (Hartmetall, Stahlindustrie etc.) sei auf die Zusammenfassung von Pitfield and Brown (2011) verwiesen. Mit der Lagerstätte Felbertal bei Mittersill ist Österreich auch einer der größten Wolframproduzenten im internationalen Vergleich [USGS 2012a]. Trotzdem tritt es auch als einer der Hauptimporteure von Wolframkonzentraten und -zwischenprodukten in der EU, auf was die dominierende Rolle der W-verarbeitenden Industrie in Österreich widerspiegelt.

Wirtschaftlich bedeutende Wolframminerale sind Ferberit (Eisen-Endglied) und Hübnerit (Mangan-Endglied) der Wolframit-Mischkristallreihe, sowie Scheelit und in geringerem Maße auch Tungstenit und Stolzit. Die Abbauwürdigkeit von Wolfram ist von der Art der Lagerstätte abhängig. Während für Ganglagerstätten durchschnittlich 0,7 %  $WO_3$  als Bauwürdigkeitsgrenze angesehen werden, wird Wolfram im Obertagebau ab Gehalten von etwa 0,1 %  $WO_3$  gefördert [Pohl 2011]. Wolfram weist in Krustengesteinen eine durchschnittliche Konzentration von 1 ppm auf, wobei in Graniten und Sedimenten generell höhere Wolframkonzentrationen als in mafischen und ultramafischen Gesteinen beobachtet werden. In Österreich existieren zahlreiche bekannte Vorkommen an Wolfram, wovon der Scheelit-Bergbau Felbertal in der Nähe von Mittersill die größte und zugleich einzige wirtschaftlich bedeutende Lagerstätte ist. Im Jahr 2010 wurden durch die Wolfram Bergbau- und Hütten AG rund 430.000 t Erz mit einem durchschnittlichen Gehalt von 0,5 Gew.-%  $WO_3$ , davon etwa 11.300 t aufbereitetes Haldenmaterial aus dem Obertagebau Ostfeld, gefördert [bmwfj 2011].

Die Lagerstätte befindet sich in den penninischen Einheiten des Tauern Fensters und wurde 1965 basierend auf einem genetischen Lagerstättenmodell nach Maucher von einer Forschergruppe der Universität München prospektiert [Maucher 1965]. Die Genese der Scheelit-Mineralisationen wurde durch syngenetische Ausfällungen von Wolfram aus exhalativ-hydrothermalen Fluiden, freigesetzt durch submarine vulkanische Aktivität, gedeutet [Maucher 1965, Höll 1966, Höll und Maucher 1968]. Metamorphe basische bis saure Magmatite und klastische Sedimente bilden den geologischen Rahmen der Lagerstätte, welche dem Habach Komplex zugeordnet werden. Die Erze sind innerhalb dieses Komplexes an die basalen Bereiche einer bis zu 4.500 m mächtigen magmatischen Gesteinsabfolge gebunden, bestehend aus Hornblende-Schiefen, Hornblenditen, und fein- bis grobkörnigen Amphiboliten, sowie intermediären bis sauren Orthogneisen. Die magmatische Sequenz geht im Hangenden in eine Abfolge von dunklen Phylliten

(Habachphyllit) über. Die Bildungsalter der (ultra)basischen Gesteine des Habach Komplexes werden auf das frühe Paläozoikum datiert [Höll und Eichhorn 2000]. Im Zuge andauernder magmatischer Aktivität während der variszischen Gebirgsbildung, kam es zur Intrusion saurer granitischer Schmelzen, die heute als Zentralgneise des Tauernfensters ausgewiesen werden.

Die Lagerstätte Felbertal wird in zwei Abbaugelände untergliedert, in das im Obertagebau aufgefahrene und heute ausgeerzte Ostfeld und in das im Untertagebau betriebene Westfeld. Heute findet der Scheelitbergbau nur mehr in letzterem statt. Mehrere Scheelit-Erzkörper werden hier in unterschiedlichen lithostratigraphischen Einheiten (polymetamorph überprägte ultramafische Hornblendite, Amphibolite und Gneise) unterschieden, wobei wirtschaftlich abbauwürdige Erzkörper stets in stockwerkartigen Quarzgängen oder scherzonengebundenen Scheelit-Quarz-Myloniten auftreten [Raith und Schmidt 2010]. Im Ostteil der Lagerstätte wurden stark verschieferte Scheelit-Quarzerze („quarzitische Scheelitreicherz“) abgebaut.

Bereits bei der Auffahrung der oberen Teilsohlen des Westfeldes wurde ein nur untertägig anstehender leukokrater Phengit-Mikroklin-Orthogneis (K1-Orthogneis) karbonen Alters angefahren, für den seitdem immer wieder ein direkter genetischer Zusammenhang mit der Lagerstättenbildung postuliert wurde [z.B. Briegleb 1991, siehe auch Raith und Schmidt 2010]. Briegleb sieht den K1-Orthogneis als eine hochfraktionierte granitische Restschmelze an, die während der variszischen Gebirgsbildung entlang geeigneter Strukturen und Scherzonen in den prä-variszischen Einheiten des Habach Komplexes platznehmen konnte. Magmatisch-hydrothermale Prozesse führten in weiterer Folge zur Ausbildung von W-vererzten Quarzgängen. Während der variszischen und alpidischen Metamorphose kam es zu einer teilweisen Mobilisierung des Scheelits in den Quarzgängen [Briegleb 1991]. Das variszische Rb-Sr-Isochronenalter dieses Orthogneises [Pestal 1983] konnte durch konventionelle U-Pb-Zirkondatierungen bestätigt werden [Eichhorn et al. 1995]. Das Re-Os-Alter an Molybdänit [Raith und Stein 2006] und ein in-situ U-Pb-Alter an Scheelit (Scheelit 1 aus dem Scheelit-Reicherz, Raith, unveröffentlichte Daten) liegen ähnlich wie das Granitalter bei 340 Millionen Jahren. Diese Alter würden für eine epigenetische Bildung der Lagerstätte im Zuge der variszischen Orogenese sprechen und widersprechen dem syngenetischen Modell von Höll und Maucher (1968).

Scheelit wurde auch aus Gold-Lagerstätten im Raum Schellgaden beschrieben und tritt dort mit unterschiedlichen Sulfiden und Gold in mylonitischen Quarzgängen auf. Die Genese dieser Lagerstätten, die an prä-alpidische Einheiten des Storz-Kareck-Komplexes gebunden vorliegt, ist immer noch ungeklärt. Der Versuch Scheelit aus der Lagerstätte Schellgaden zu datieren lieferte bis dato nur unzureichende Ergebnisse; ein alpidisches Alter scheint aber auszuschließen zu sein [Wieser 2010]. Wolfram ist in diesen historischen Lagerstätten wohl

nur als Nebenelement von Interesse. Das Hauptaugenmerk liegt sicher auf den Edelmetallen Gold und Silber.

Weitere schichtgebundene Scheelitvorkommen sind in den unter- und oberostalpinen Einheiten beschrieben worden. Die Entdeckung der Scheelitvorkommen im ostalpinen Thurntaler Quarzphyllitkomplex gehen ebenfalls auf die Prospektionstätigkeiten der Münchner Gruppe zurück [Höll 1969]. Die Vererzungen sind schichtgebunden und erstrecken sich entlang des Grenzkammes Hochrast-Gumriaul in Osttirol. Als Erzträger dominieren niedriggradig metamorphe Grünschiefer in denen Scheelit sowohl in Quarz-Karbonatgängen als auch disseminiert in den Metamorphiten anzutreffen ist. Scheelit tritt zum Teil gemeinsam mit Arsenopyrit und anderen Sulfiden auf. Diese epigenetischen Vererzungen sind möglicherweise metamorph-hydrothermalen Ursprungs. Die primäre Quelle von Wolfram könnten Ti-Oxide in den metamorphen Nebengesteinen sein [Portugaller 2010]. Eine syngenetische Anreicherung kann nach dem derzeitigen Wissensstand nicht ausgeschlossen werden.

Das bedeutendste Vorkommen im Unterostalpin ist die bis 1976 abgebaute Magnesit-Scheelit Lagerstätte Tux. Scheelit tritt in schwach metamorphen karbonatischen Gesteinen (Eisendolomite) und Schwarzschiefern im Tuxer Quarzphyllit auf. Insgesamt konnten 12 Scheelitvorkommen differenziert werden, allerdings mit unterschiedlicher und meist nur geringer Bauwürdigkeit [Pirkl 1986]. Wirtschaftlich interessante Vorkommen beschränken sich auf die Übergangsbereiche zwischen karbonatischen Gesteinen und Phylliten im tieferen Teil der Lagerstätte. Basierend auf Explorationstätigkeiten der Voestalpine AG sind Reserven von ca. 500.000 Tonnen Scheeliterz bei einem durchschnittlichen Gehalt von 0,9 Gew.-%  $WO_3$  zu vermuten [Bauer 1983]. Eine genetische Assoziation mit granitischen Gesteinen ist für die schichtgebundenen Vorkommen im Unterostalpin auf Basis der geologischen Verhältnisse, aber auch der Isotopendaten auszuschließen [Raith et al. 1995]. Die eher ungewöhnliche Assoziation von Wolfram mit Magnesit ist auch von dem Vorkommen Mallnock (Nockberge, Kärnten) bekannt. Ferberit und Scheelit koexistieren hier mit Fe-reichem Magnesit in Dolomitgesteinen der oberostalpinen Gurktaler Decke. Mallnock ist das einzig bekannte Vorkommen in Österreich in dem neben Scheelit nennenswerte Mengen an Wolframit auftreten [Neinavaie et al. 1989]. Weitere meist an regional-metamorphe Kalksilikatgesteine gebundene Scheelitvorkommen wurden aus den polymetamorphen Einheiten des Oberostalpins bekannt (Stub-, Kor-, Saualpe, Wölzer und Schladminger Tauern, Murtaler Berge) [Höll 1977, Neinavaie et al. 1985, Raith 1991]. Auch in den moldanubischen Einheiten der Böhmisches Masse bei Wietzen in Niederösterreich ist ein schichtgebundenes Scheelit-Vorkommen bekannt. Scheelit tritt hier vorwiegend in Kalksilikatgesteinen auf. Die durchschnittlichen Wolfram-Gehalte der erzführenden Zonen liegen bei 0,19 %  $WO_3$  [Beran et al. 1985].

Mit der großen Ausnahme von Felbertal, das auch hinsichtlich der Geologie – z.B. die Assoziation mit Graniten – eine Sonderstellung einnimmt, sind alle anderen Vorkommen in Österreich als subökonomisch zu bewerten. Inwieweit eine wirtschaftliche Gewinnung von Wolfram aus diesen anderen Vorkommen möglich ist, lässt sich aufgrund der Literaturdaten nicht eindeutig beurteilen. Dies kann nur durch detaillierte zukünftige Explorationstätigkeiten geklärt werden. Abschließend zeigt Tabelle 12 eine Zusammenstellung zur Geologie von Wolfram.

Tabelle 12: Übersicht zur Geologie von Wolfram

Wolfram				
<b>Ökonomisch relevante Erzminerale</b> [Dill 2010] [Pohl 2011]	<b>Erzmineral</b>	<b>Chemische Formel</b>		<b>Max. Erzgehalt [Gew.-%]</b>
	Wolframit	(Fe,Mn)WO <sub>4</sub>		76 % WO <sub>3</sub>
	Ferberit	FeWO <sub>4</sub>		76 % WO <sub>3</sub>
	Hübnerit	MnWO <sub>4</sub>		76 % WO <sub>3</sub>
	Scheelit	CaWO <sub>4</sub>		80 % WO <sub>3</sub>
	Tungstenit	WS <sub>2</sub>		74 % WO <sub>3</sub>
Stolzite	PbWO <sub>4</sub>		51 % WO <sub>3</sub>	
<b>Mittlere Häufigkeit in der Erdkruste</b> [Dill 2010]	1 ppm			
<b>Produktion 2011</b> [USGS 2012a]	72.000 t			
<b>Reserven 2011</b> [USGS 2012a]	3.100.000 t			
<b>R/P-Verhältnis</b> [eigene Berechnungen]	43 Jahre			
<b>Bauwürdigkeitsgrenze</b> [Pohl 2011]	~0,1 % WO <sub>3</sub> im Obertagebau ~0,7 % WO <sub>3</sub> in Gangvererzungen			
<b>Lagerstättentypen</b> [Dill 2010] [Pohl 2011]	Magmatische Lagerstätten; polymetallische Skarnlagerstätten assoziiert mit felsischen Intrusionen; polymetallische Greisen- und Porphyrlagerstätten; Wolframit-Quarzgänge und Stockwerkvererzungen in Graniten und deren Nebengesteinen; als Beiprodukt in magmatisch-hydrothermalen Molybdän-Porphyrlagerstätten			
<b>Wichtigste Produzenten</b> [Bindi und Cipriani 2003] [Jingwen et al. 1996] [Raith und Schmidt 2010]	<b>Nation</b>	<b>Lokalität</b>	<b>Lagerstättentypus</b>	<b>Ø Erzgehalt [Gew.-%]</b>
	China	Shizhuyuan	Polymetallische Skarn- und Greisenlagerstätte	1–6 % WO <sub>3</sub>
	Russland	Tyrnyauz	W-Mo-Skarnlagerstätte	0,14–0,19 % WO <sub>3</sub>
	Österreich	Mittersill	Magmatisch-hydrothermale Stockwerk- und Gangvererzungen	0,5 % WO <sub>3</sub>
<b>Geologisches Potenzial für Österreich</b>	Thurntaler Quarzphyllitkomplex: Hochrast-Gumriaul ehemalige Magnesit-Scheelit Lagerstätte Tux Wietzen in Niederösterreich			
<b>Wirtschaftliches Potenzial für Österreich</b>	Aktiver Bergbau Mittersill			
<b>Sekundäre Rohstoffquellen geogenen Ursprungs</b>	Möglicherweise Haldenmaterial der stillgelegten und aktiven Bergbaubetriebe			
<b>Weiterer Forschungs- und Untersuchungsbedarf</b>	Entwicklung geeigneter genetischer Lagerstättenmodelle für heimische Vorkommen und vermehrte Prospektion in bekannten Wolfram-führenden geologischen Einheiten (Habach Komplex, unterostalpine Quarzphyllite)			

## 4.9 Danksagung

Folgenden Personen sei für ihre wertvollen Diskussionsbeiträge und Expertenmeinungen herzlichst gedankt: Heinrich Mali, Richard Göd, Leopold Weber, Robert Treimer, Helmut Flachberger, Gerd Rantitsch, Elisabeth Henjes-Kunst, Hassan Neinavaie, Oskar Thalhammer und Albert Schedl.

## 4.10 Literatur

- Ahlfeld, F., 1974: Neue Beobachtungen über die Tektonik und die Antimonlagerstätten Boliviens. *Mineralium Deposita*, 8, 125–131.
- Augustin-Gyurtis, K. und E. Schroll, 1988: Geochemische Charakterisierung von heimischen und importierten Kohlen und ihren Verbrennungsprodukten. Unveröffentlichter Projektbericht ÜLG 14/86.
- Bauer, J. K., 1983: Scheelit-Magnesit-Lagerstätte Tux-Lanersbach, Nordtirol, Österreich: Eisenerz, Austria. voestalpine AG, Unveröffentlichter Bericht.
- Baumgartner, R. J., 2010: Mineralogische und mineral-chemische Untersuchungen zur Verifizierung einer Nb-Anomalie in der südlichen Saualpe, Kärnten. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Montanuniversität.
- Beran, A. et al., 1985: A scheelite mineralization in calc-silicate rocks of the Moldanubicum (Bohemian Massif) in Austria. *Mineralium Deposita*, 20, 16–22.
- Bernstein, L. R., 1985: Germanium geochemistry and mineralogy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49, 2409–2422.
- Bindi, L. und C. Cipriani, 2003: Plumbian baksanite from the Tyrnyauz W-Mo deposit, Baksan river valley, Northern Caucasus, Russian Federation. *Canadian Mineralogist*, 41, 1475–1479.
- Breiter, K. und S. Scharbert, 1995: The Homolka magmatic centre – an example of late Variscan ore bearing magmatism in the Southbohemian batholith (Southern Bohemia, Northern Austria). *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 138/1, 9–25.
- Breiter, K. und S. Scharbert, 1998: Latest intrusions of the Eisgarn pluton (South Bohemia-Northern Waldviertel), *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 141/1, 25–37.
- Briegleb, D., 1991: Ein epigenetisches Modell der Scheelitlagerstätte Felbertal (Land Salzburg). *Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft, Beihefte zum European Journal of Mineralogy*, 3, 43.
- bmwfj, 2011: Österreichisches Montan-Handbuch 2011. 85. Jahrgang, Wien.
- Castor, S. B., 2008: Rare earth deposits of North America, *Resource Geology*, 58, 337–347.

- Černý, P., 1989: Characteristics of pegmatite deposits of tantalum. In: Černý, P. and F. Saupé (Hrsg.): Lanthanides, tantalum and niobium, Berlin, Heidelberg, Springer Verlag.
- Černý, P. et al., 1989a: Exsolution intergrowths of titanian ferrocolumbite and niobian rutile from the Weinebene spodumene pegmatites, Carinthia, Austria. *Mineralogy and Petrology*, 40, 197–206.
- Černý, P. et al., 1989b: A ferrotantalite-ferrotapiolite intergrowth from Spittal a.d. Drau, Carinthia, Austria. *Mineralogy and Petrology*, 41, 53–63.
- Černý, P. und T. S. Ercit, 1989: Mineralogy of niobium and tantalum: Crystal chemical relationships, paragenetic aspects and their economic implications. In: Möller, P. et al. (Hrsg.): Lanthanides, tantalum and niobium: Mineralogy, geochemistry, characteristics of primary ore deposits, prospecting, processing and applications, Springer Verlag, Berlin, 27–79.
- Cerny, I. und E. Schroll, 1995: Heimische Vorräte an Spezialmetallen (Ga, In, Tl, Ge, Se, Te und Cd) in Blei-Zink- und anderen Erzen. *Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt Wien*, 18, 5–33.
- DERA, 2011: Commodity Top News Nr. 38: Rohstoff-Zertifizierung und Sorgfaltspflichten von Unternehmen in den Lieferketten von Konfliktmineralen, Hannover, Internet: [http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity\\_Top\\_News/Rohstoffwirtschaft/38\\_rohstoff-zertifizierung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/38_rohstoff-zertifizierung.pdf?__blob=publicationFile&v=4).
- DERA, 2012: DERA Rohstoffinformationen: Certifying Natural Resources – A Comparative Study on Global Standards and Certification Schemes for Sustainability, Part II – Empirical Assessment of Case Studies, Hannover, Internet: [http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA\\_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-09.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](http://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-09.pdf?__blob=publicationFile&v=8).
- Dill, H., 1998: Evolution of Sb mineralisation in modern fold belts: a comparison of the Sb mineralisation in the Central Andes (Bolivia) and the Western Carpathians (Slovakia). *Mineralium Deposita*, 33, 359–378.
- Dill, H. G., 2010: The „chessboard“ classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth Science Reviews*, 100.
- Du, G. et al., 2009: Ge distribution in the Wulantuga high-germanium coal deposit in the Shengli coalfield, Inner Mongolia, northeastern China. *International Journal of Coal Geology*, 78, 16–26.
- Eichhorn, R. et al., 1995: Age and evolution of scheelite-hosting rocks in the Felbertal Deposit (Eastern Alps): U-Pb geochronology of zircon and titanite, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119, 377–386.

- Exel, R., 1986: Erläuterung zur Lagerstättenkarte von Osttirol, Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt, 7, 19–31.
- GBA 2005/2009: IRIS Interaktives Rohstoff-Informationssystem metallogenetische Karte von Österreich. Internet: <http://geomap.geolba.ac.at/IRIS/einstieg.html>.
- Göd, R., 1989: The spodumen deposit at „Weinebene“, Koralpe, Austria, Mineralium Deposita. 24, 270–278.
- Hoffmann, T. und G. Malecki, 2002: Übersicht und Ergebnisdarstellung der Rohstoffforschungsprojekte der Jahre 1986 bis 1998, Archiv für Lagerstättenforschung. 22, Wien.
- Höll, R., 1966: Genese und Alterstellung von Vorkommen der Sb-W-Hg-Formation in der Türkei und auf Chios/Griechenland, Abhandlungen Bayerischer Akademie der Wissenschaften, mathematische-naturwissenschaftliche Klasse, 127.
- Höll, R. und A. Maucher, 1968: Genese und Alter der Scheelit-Magnesit-Lagerstätte Tux. Sitzungsberichte Bayerische Akademie der Wissenschaften, mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse.
- Höll, R., 1969: Scheelitprospektion und Scheelitvorkommen im Bundesland Salzburg/Österreich. Chemie der Erde, 28, 185–203.
- Höll, R., 1977: Early Paleozoic ore deposits of the Sb-W-Hg formation of the Eastern Alps and their genetic interpretation. In: Klemm, D. D. und H. J. Schneider (Hrsg.): Time- and strata-bound ore deposits, Springer Verlag, Berlin, 169–198.
- Höll, R. und R. Eichhorn, 2000: Tungsten mineralization and metamorphic remobilization in the Felbertal scheelite deposit, Central Alps, Austria. Reviews in Economic Geology, 11, 233-264.
- Höll, R. et al., 2007: Metallogenesis of germanium – A review. Ore Geology Reviews, 30, 145–180.
- Holzer, H., 1964: Exkursion II/3: Niederösterreichische Graphitlagerstätten. Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft in Wien, 57, 163–168.
- IBM, 2010: Indian Minerals Year Book 2010 Part II - 44. Graphite. Internet: [http://ibm.nic.in/imyb2010\\_graphite.pdf](http://ibm.nic.in/imyb2010_graphite.pdf).
- Jingwen, M. et al., 1996: Geology and metallogeny of the Shizhuyuan skarn-greisen deposit, Hunan Province, China. International Geology Review, 38, 1020–1039.
- Křibek, B. et al., 1999: The behavior of selected trace elements in Alpine soils developed on black shales in the upper part of the “Hauptdolomit” (Seefeld Area, Tyrol, Austria), Abhandlungen Geologische Bundesanstalt, Wien, 56/2, 91–97.
- Kucha, H. und J. G. Raith, 2009: Gold-oxysulphides in copper deposits of the Greywacke Zone, Austria: A mineral chemical and infrared fluid inclusion study. Ore Geology Reviews, 35, 87–100.

- Lahusen, L., 1972: Schicht- und zeitgebundene Antimonit-Scheelit-Vorkommen und Zinn-ober-Vererzungen in Kärnten und Osttirol/Österreich. *Mineralium Deposita*, 7, 31–60.
- Libowitzky, E., 1990: Precambrian blacksands as precursors of magnetite and ilmenite bearing chlorite-micaschists, Bohemian Massif, Austria. *Mineralogy and Petrology*, 43, 147–160.
- Lide, D. R., 1997: Abundance of elements in the earth's crust and sea. In: Lide, D. R. (Hrsg.): *CRC handbook of physics and chemistry*, 78<sup>th</sup> edition, Florida.
- Luecke, W. und F. H. Ucik, 1986: Die Zusammensetzung der Pegmatite von Edling und Wolfsberg bei Spittal/Drau (Kärnten) im Rahmen der Pegmatitvorkommen des Millstätter See-Rückens. *Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt*, 7, 173–187.
- Mali, H., 1996: Bildungsbedingungen von Quecksilber- und Antimonlagerstätten im Ostalpin (Österreich), Dissertation Montanuniversität Leoben.
- Mali, H.: 2004, Die Spodumenpegmatite von Bretstein und Pusterwald (Wölzer Tauern, Steiermark, Österreich), *Joannea Mineralogie*, 2, 5–53.
- Malitch, K. N. et al., 2003: Diversity of platinum-group mineral assemblages in banded and podiform chromitite from the Kraubath ultramafic massif, Austria: evidence for an ophiolitic transition zone?. *Mineralium Deposita*, 38, 282–297.
- Maucher, A., 1965: Die Antimon-Wolfram-Quecksilber Formation und ihre Beziehungen zu Magmatismus und Großtektonik. *Freiberger Forschungshefte*, C186, 173–187.
- Melcher, F., et al., 2010: Niobium-tantalum-tin-bearing minerals in pegmatites of the Eastern Alps: case studies, PANGEO 2010 Abstracts. *Journal of Alpine Geology*, 52, 178–179.
- Möller, P. et al., 1989: Lanthanides, tantalum, and niobium: mineralogy, geochemistry, characteristics of primary ore deposits, prospecting, processing, and applications. *SGA Special Publications*, vol. 7.
- Moskalyk, R. R. und A. M. Alfantazi, 2003: Processing of vanadium: a review. *Minerals Processing*, 16, 793–805.
- Neinavaie, H. et al., 1985: Ergebnisse der geochemischen Prospektion auf Stahlveredler im Bundesgebiet. *Berg- und hüttenmännische Mitteilungen*, 130, 111–116.
- Neinavaie, H., 1989: Verifizierung von 12 geochemischen Anomalien mittels Mineralphasen-analytik am Beispiel der Elemente Titan, Wolfram, Zinn u.a., Unveröffentlichter Projektbericht ÜLG 28/90.
- Pearson, T. N. und M. J. Viljoen, 1986: Antimony mineralization in the Murchison greenstone belt; an overview. In Anhaeusser, C. R. und S. Maske (Hrsg.), *Mineral Deposits of South Africa*, Volume I, Geological Society South Africa, Johannesburg, 293–320.
- Pestal, G., 1983: Beitrag zur Kenntnis der Geologie in den mittleren Hohen Tauern im Bereich des Amer- und Felbertales. Dissertation Universität Wien, Österreich.

- Pirkl, H. ,1986: Die Magnesit-Scheelit-Lagerstätte Tux in Tirol. Mitteilungen der österreichischen geologischen Gesellschaft, 78, 159–165.
- Pitfield, P. und T. Brown, 2011: Tungsten - BGS commodity profile. British Geological Survey, Keyworth, Nottingham, Internet: [www.MineralsUK.com](http://www.MineralsUK.com).
- Pohl, W. L., 2011: Economic Geology – Principles and Practice. Blackwell Publishing Ltd, West Sussex.
- Portugaller, T., 2010: Scheelitvererzungen im Thurntaler Quarzphyllitkomplex, Osttirol: Petrographische und chemische Untersuchungen an Nebengesteinen und Bachsedimenten. Unveröffentlichte Masterarbeit Montanuniversität Leoben, Österreich.
- Postl, W. und B. Golob, 1979: Ilmenorutil (Nb-Rutil), Columbit und Zinnstein aus einem Spodumenpegmatit im Wildbachgraben, Koralpe (Steiermark). Mitteilungsblatt der Abteilung für Mineralogie am Landesmuseum Joanneum, 47, 27–35.
- Raith, J. G. ,1991: Stratabound tungsten mineralization in regional metamorphic calc-silicate rocks from the Austroalpine Crystalline Complex, Austria. Mineralium Deposita, 26, 72–80.
- Raith, J. G. et al., 1995: Polymetamorphism and polyphase deformation of the strata-bound magnesite-scheelite deposit, Tux-Lanersbach, eastern Alps, Austria. Economic Geology, 90, 763–781.
- Raith, J. G und H. Stein, 2006: Variscan ore formation and metamorphism at the Felbertal scheelite deposit (Austria): constraining tungsten mineralisation from Re-Os dating of molybdenite. Contributions to Mineralogy and Petrology, 152, 763–781.
- Raith, J. G. und S. Schmidt, 2010: Tungsten deposit Felbertal, Salzburg, Austria. Acta Mineralogica-Petrographica, Field Guide Series, 3, 1–24.
- Raja, B. V. R., 2007: Vanadium market in the world. Steelworld, February 2007, 19–22, Internet: <http://www.steelworld.com/featurefeb07.pdf>.
- Reimann, C. und E. F. Stumpfl, 1985: Paleozoic amphibolites, Kreuzeck Mountains, Austria: Geochemical variations in the vicinity of mineralization. Mineralium Deposita, 20, 69–75.
- Schroll, E., 2006: Neues zur Genese der Blei-Zink-Lagerstätte Bleiberg, Carinthia II, 196./116. Jahrgang, 483–500.
- Slack, J. F. et al., 2004: Multistage Hydrothermal Silicification and Fe-Tl-As-Sb-Ge-REE Enrichment in the Red Dog Zn-Pb-Ag District, Northern Alaska: Geochemistry, Origin, and Exploration Applications, Economic Geology, 99, 1481–1508.
- Solti, G. und H. Lobitzer, 1989: Aufsuchung von Alginat in Österreich. Veröffentlichter Projektbericht über die Österreichisch-Ungarische Zusammenarbeit in der Ölschiefer/Alginat-Prospektion, Projekt ÜLG 19.

- Taylor, S. R. und S. M. McLennan, 1985: The continental crust: its composition and evolution. Blackwell, Oxford.
- Taylor, H. A. Jr., 2006: In: Kogel et al. (Hrsg.): Industrial Minerals & Rocks – Commodities, Markets, and Uses, Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), Littleton, 507–518.
- Thalhammer, O. A. R. und E. F. Stumpf, 1988: Platinum-group minerals from Hochgrößen ultramafic massif, Styria: first reported occurrence of PGM in Austria, Applied Earth Sciences, 97, 77–82.
- USGS 2011: 2010 Minerals Yearbook – Platinum-Group Metals [Advanced Release], Virginia, 2011, Internet: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/platinum/myb1-2010-plati.pdf>.
- USGS, 2012a: Mineral commodity summaries 2012, Internet: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2012/mcs2012.pdf>.
- USGS, 2012b: Magmatic Ore Deposits in Layered Intrusions – Descriptive Model for Reef-Type PGE and Contact-Type Cu-Ni-PGE Deposits, Virginia, 2012, Internet: <http://pubs.usgs.gov/of/2012/1010/contents/OF12-1010.pdf>.
- Warnsloh, J. M. und F. M. Meyer, 2007: World-wide Niobium and Tantalum availability. Berichte zur Lagerstätten- und Rohstoffforschung, 49, BGR Hannover.
- Weber, L., 1989: Zur Geologie der Antimonvererzungen des Osttiroler Anteils der Kreuzeckgruppe. Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt, 10, 65–74.
- Weber, L., et al., 1997: Handbuch der Lagerstätten der Erze, Industriemineralien und Energierohstoffe Österreichs, Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt, 19.
- Wieser, B., 2010: Samarium-Neodym Datierung und Spurenelementanalysen an Scheelit aus der Au-(W) Lagerstätte Schellgaden/ Salzburg. Unveröffentlichte Masterarbeit, Montanuniversität Leoben.
- Wilde, S. A. et al., 1997: The identification of a late Pan-African granulite facies event in northeastern China: SHRIMP U-Pb zircon dating of the Mashan Group at Liu Mao, Heilongjiang Province, China. Proceedings of the 30<sup>th</sup> International Geological Congress, 17, 59–74.
- Wilde, S. A. et al., 1999: Geological setting and controls on the development of graphite, sillimanite and phosphate mineralization within the Jiamusi Massif: An exotic Fragment of Gondwanaland located in North-Eastern China?, Gondwana Research, 2, 21–46.
- Wu, C. et al., 1996: Rare earth deposits in China. In: Jones, A. P., Wall, F., Williams, C. T. (Hrsg.): Rare Earth Minerals: Chemistry, Origin, and Ore Deposits, The Mineralogical Society Series, 7, 281–310.

## 5. Bergbau

Der oftmals zitierte Satz „Österreich ist reich an armen Lagerstätten“ ist geologisch begründbar, denn in jüngeren Gebirgen, wie z.B. den Alpen, sind vorwiegend nur kleinräumige und zerstückelte Mineralrohstoffvorkommen entwickelt, die im internationalen Vergleich nicht konkurrenzfähig sind. Durch die tektonischen Vorgänge der alpidischen Orogenese (Gebirgsbildung) entstanden ungünstige Rahmenbedingungen für die Bildung von Großlagerstätten. Die somit bekannten Vorkommen und Lagerstätten in den Ostalpen haben, verglichen mit nicht alpidischen geologischen Strukturen, meist nur einen geringen Inhalt. Was für den bis ins 20. Jh. geführten Kleinbergbau durchaus geeignet war, ist heutzutage im internationalen Vergleich nur bedingt abbauwürdig. Dabei spielt auch das teure makrosoziale Umfeld mit hohen Umweltkosten, Gehältern, dem Behördenaufwand, etc. dem Bergbau in Österreich entgegen. Nichtsdestotrotz sind Produktionsstätten für Spezialanwendungen vorhanden. Jene Standorte, die nicht bis in die 1990er Jahre mangels Wirtschaftlichkeit geschlossen wurden, profitieren nun von den stetig steigenden Rohstoffpreisen, sodass für einzelne Erze der Bergbau in Österreich durchaus Bedeutung hat.

Die nachfolgende Übersicht (Tabelle 13 und Tabelle 14) zeigt die Vorkommen, Lagerstätten und aktive Bergbaue, die heimische Gesamtproduktion des kritischen Rohstoffs, die Importe aus der Außenhandelsstatistik und eine Abschätzung der internationalen Recyclingraten. Alle Daten (exkl. Recyclingdaten) beziehen sich auf das Jahr 2010. Die Außenhandelsstatistik liefert keine erschöpfenden Informationen, somit sind diese Werte als Tendenzen zu verstehen. Im Zuge von Gesprächen mit Experten der Montanbehörde, der Universität Wien und der Montanuniversität Leoben wurden aus allen österreichischen Vorkommen kritischer Rohstoffe (der EU) die hoffigsten Standorte ausgewählt und für die nachfolgende bergtechnische Charakterisierung sowie Bergbauplanungskonzepte (ab Kapitel 5.2) herangezogen, die eventuell für eine zukünftige Rohstoffgewinnung in Frage kommen könnten (in der Tabelle 13 rot markiert).

Tabelle 13: Vorkommen, Lagerstätten und aktive Bergbaue kritischer Rohstoffe in Österreich

Rohstoff	Bedeutendste Vorkommen	Lagerstätten		
		Erschöpft	Geschlossen	In Verhieb
Antimon	Kreuzeck- u. Goldeck- gruppe, Rabantserie (K, T) Obertilliach (T)	Schlaining	Rabantserie (K, T)	-
Beryllium*	Mittersill (S) Habachtal (S)	-	-	-
Cobalt	Schladminger Tauern (St) in Verbindung mit Nickelvererzungen	-	-	-
Flussspat	Achselalm (T), Drauzug (K) als Nebenprodukt der PbZn-Vererzungen	-	-	-
Gallium	-	-	-	-
Germanium	Drauzug (K) als Nebenprodukt Der PbZn-Vererzungen	-	-	-
Grafit	Veitscher Decke (St) Bunte Serie (NÖ)	Weinberg, Trandorf, Trenning, uvm. (NÖ)	Sunk uvm. (St)	Kaisersberg (St)
Indium	-	-	-	-
Lithium	Weinebene (St) Wölzer Tauern (St)	-	-	-
Magnesium**	Leoben (St)	Veitsch (St) Hohentauern (St)	Tux- Lanersbach (T)	Breitenau (St) Millstätter Alpe (K) Hochfilzen (T)
Niob***	-	-	-	-
PGM	-	-	-	-
SE	-	-	-	-
Tantal***	-	-	-	-
Wolfram	Hochrast, Gumriaul, Taffin- alpe (T) Tux-Lanersbach (T) Schellgaden (S)	-	-	Mittersill (S)

\* Militärisch wichtiger Rohstoff, wenige Daten vorhanden

\*\* Aus Magnesit herstellbar, Daten auf Magnesit bezogen

\*\*\* Niob und Tantal treten meist gemeinsam auf

Tabelle 14: Produktion, Import- und Recyclingraten kritischer Rohstoffe in Österreich

Rohstoff	Produktion		Netto-Import [kg]	Recyclingrate (weltweit)
	Menge [kg]	Anteil an der Weltproduktion [%]		
Antimon	-	-	36.990 als Pulver, Schrott und andere Waren	3–20 % der Produktion aus dem Recycling [Ad-hoc Working Group 2010]
Beryllium	-	-	Keine Angaben	10 % aus Altschrott [USGS 2011]
Cobalt	-	-	541.101 als Cobalt Stein, Zwischenerz und in Rohform als Pulver	68 % End-of-life-Recyclingrate, 32 % des Gesamtbedarfs deckt Sekundärmaterial ab [Ad-hoc Working Group 2010]
Flussspat	-	-	3.489.670 mit diversen Gehalten an Kalziumfluorid	Sehr gering: < 1 % [Roeser 2010]
Gallium	-	-	18 als Schrott und Waren daraus	Kein Recycling aus Altschrott [Ad-hoc Working Group 2010]
Germanium	-	-	9 in Rohform als Pulver	30 % aus Recyclingmaterial [Angerer et al. 2009]
Grafit	420.000	0,04	8.996.188 als Pulver oder Flocken	Kein Bedarf
Indium	-	-	37 in Rohform als Pulver	1 % aus Altschrott [Ad-hoc Working Group 2010]
Lithium	-	-	255.054 als Oxid, Hydroxid u. Karbonat	45 % der Batterien in 2016 [Ad-hoc Working Group 2010]
Niob	-	-	43 als Schrott in Verbindung mit Rh, Ga, etc.	20 % [Roeser 2010]
PGM	-	-	93 Pt, 19 Pd, 105 Rh Jeweils in Rohform als Pulver	10 % in Endverbraucher-Produkten [Ad-hoc Working Group 2010]
SE	-	-	291.694 in Reinform oder Gemisch und legiert	1 % aus Altschrott [Ad-hoc Working Group 2010]
Tantal	-	-	Keine Angaben	1–9 % [Ad-hoc Working Group 2010]
Wolfram	977.000	1,24	83 Wolframate, keine Angaben für reines Wolfram	35–40 % des verwendeten Wolframs [Ad-hoc Working Group 2010]

## 5.1 Allgemeines zur bergtechnische Charakterisierung

Lagerstätten werden nach ihrer Wirtschaftlichkeit in bauwürdige, bedingt bauwürdige und nicht bauwürdige Vorkommen eingeteilt. Erstere sind grundsätzlich wirtschaftlich profitabel. Bedingt abbauwürdige Lagerstätten entsprechen solchen, die sich je nach aktueller Marktlage wirtschaftlich oder nicht wirtschaftlich betreiben lassen. In nicht gewinnbringenden Zeiträumen erfolgt entweder eine vorübergehende Stilllegung von solchen Bergbauen oder ein Weiterbetrieb aus volkswirtschaftlichem Interesse. Nicht bauwürdige Mineralrohstoffanreicherungen sind aufgrund verschiedener Faktoren weder heute noch in Zukunft profitabel. Diese werden als Vorkommen bezeichnet.

Die Kosten, welche bei der Planung, Durchführung und Schließung eines Gewinnungsbetriebs anfallen, richten sich nach den wertbestimmenden Merkmalen einer Lagerstätte. Deren Überprüfung ist entscheidend für die Einschätzung der Profitabilität. Fettweis (1990) nennt diese Eigenschaften übergeordnete Einflussgrößen und teilt sie in Markt- sowie Standortbedingungen, geologische Einflussgrößen als auch Stand der Technik ein, neben den abschließenden, ergebnisbestimmenden Einflussgrößen (Abbildung 9). Mit der bergtechnischen Charakterisierung werden, als wichtigster Teil dieser fixen Merkmale, wichtige Informationen über die geologischen Rahmenbedingungen der Lagerstätte zusammengetragen. Je umfangreicher und genauer diese Angaben sind, desto präziser lassen sich Aussagen zu Wirtschaftlichkeit ableiten und der Bergbau (Abbaumethode, etc.) planen.

Die wesentlichen Parameter der bergtechnischen Charakterisierung lassen sich in Lagerstättenbonität, -qualität und -quantität klassifizieren (Abbildung 10). Erstere umfasst Wertstoffgehalte, Zerkleinerungsverhalten, Funktion des Wertstoffs, mineralogische/petrologische Zusammensetzung und Aufbereitbarkeit. Die Lagerstättenbonität beinhaltet die Zugänglichkeit, Form, mechanische Gesteins- und Gebirgseigenschaften und hydrogeologische Einflüsse. Die Lagerstättenquantität beschäftigt sich mit dem Lagerstättenvorrat.

Nachfolgend erfolgt eine ganz allgemeine Beschreibung der wesentlichen Parameter einer bergtechnischen Charakterisierung und anschließend werden in Kapitel 5.2 die ausgewählten Mineralrohstoffvorkommen kritischer Rohstoffe in Österreich entsprechender dieser dargestellt. In weiterer Folge werden in Kapitel 5.3 Konzepte zur Bergbauplanung der angesprochenen Mineralrohstoffvorkommen erstellt.

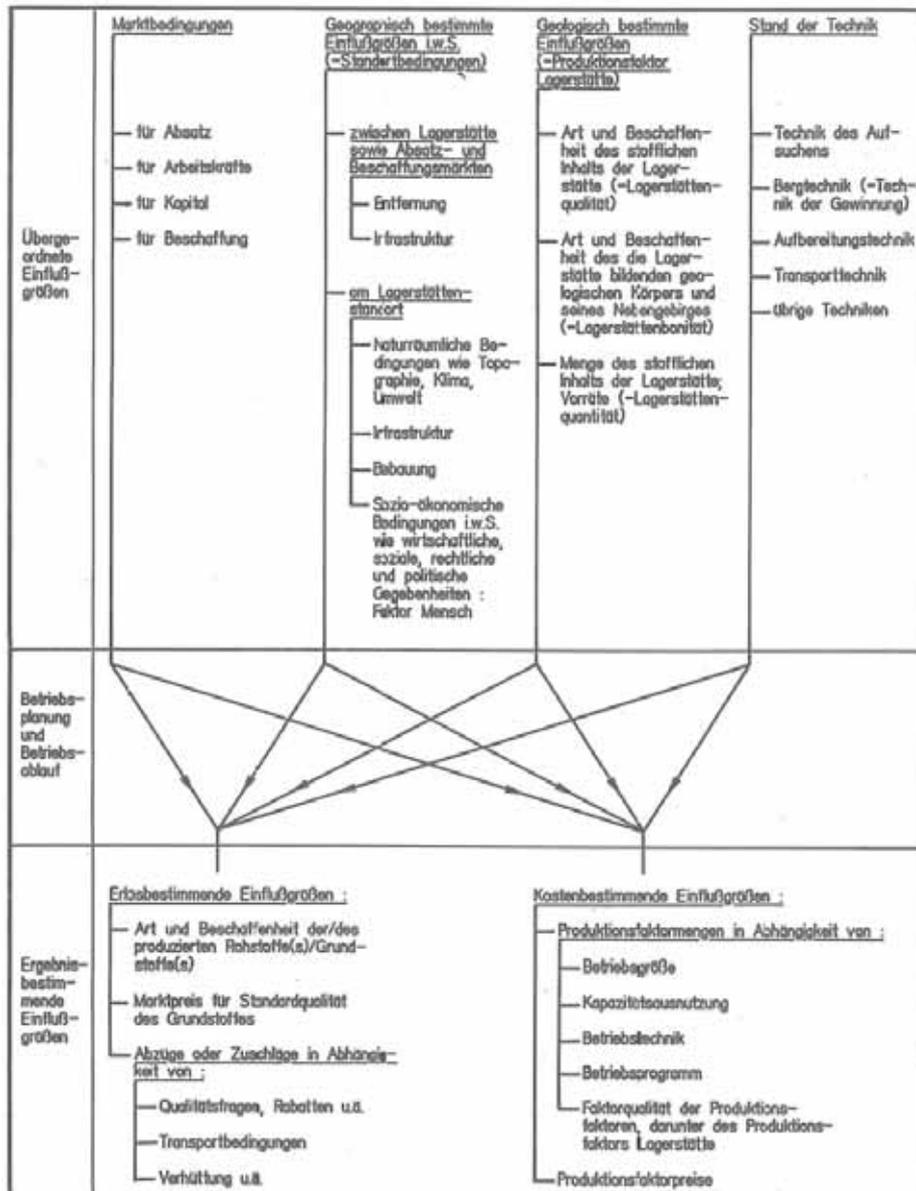


Abbildung 9: Einflussgrößen für den Betrieb und die Wirtschaftlichkeit von Bergwerken [Fettweis 1990]

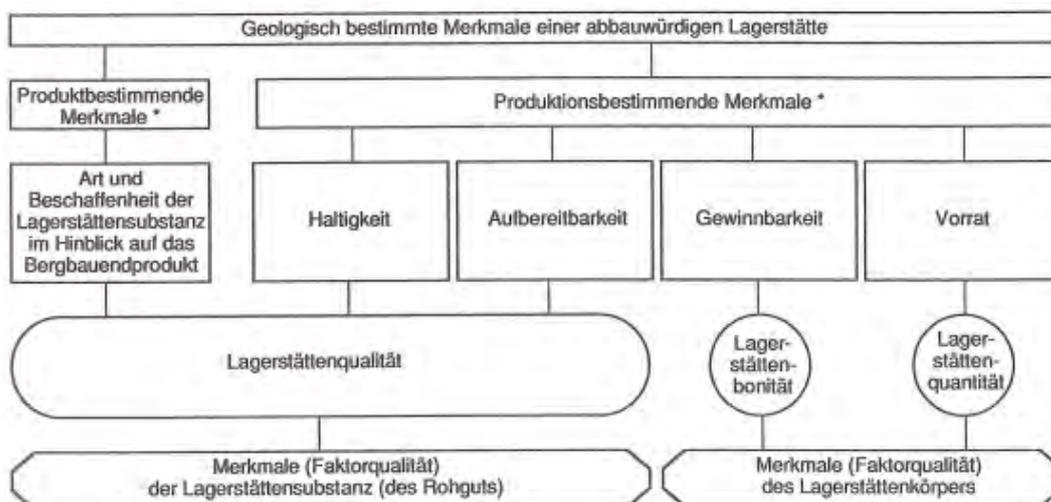


Abbildung 10: Geologisch bestimmte Einflussgrößen der Abbauwürdigkeit [Fettweis 1990]

Unter der Lagerstättenbonität versteht man die Gesamtheit derjenigen geologischen Merkmale eines Rohstoffkörpers und seines Nebengebirges, mit Ausnahme der Lagerstättenquantität, welche für die Gewinnung des Rohstoffs von Einfluss sind:

- Zugänglichkeit (Überlagerung, Teufe)
- Form der Lagerstätte (Einfallen, Streichen, Mächtigkeit, genetisch und tektonisch bedingte Zergliederung, Regelmäßigkeit)
- Gesteinseigenschaften (Druckfestigkeiten, Abrasivität)
- Gebirgseigenschaften (Flächengefüge, Gebirgsdruck und -klassifikation)
- Hydrogeologische Gegebenheiten (vgl. Fettweis, 1990)

Die Lagerstättenqualität beschreibt die kompletten geologischen Parameter eines Rohstoffkörpers und seines unmittelbaren Nebengebirges, welche (unter der Voraussetzung einer optimalen Gewinnung) in das Rohgut als Produkt der Gewinnung eingehen und die dessen Eignung zur weiteren Verwendung bestimmen:

- Wertstoffgehalte
- Zerkleinerungsverhalten (spezifischer Energieverbrauch, Anreicherung in bestimmten Kornklassen)
- Funktion des Wertstoffs
- Chemische Zusammensetzung und mineralogisch-petrographische Ausbildung
- Aufbereitbarkeit des Rohgutes (Verwachsung, Rohgutfeuchte, verdünnendes Nebengebirge (vgl. Fettweis, 1990))

Nach Fettweis (1990) hat die Lagerstättenquantität, das heißt die relative Größe des Lagerstättenvorrates, neben der Lagerstättenbonität einen entscheidenden Einfluss auf die Kosten der Gewinnung als auch der Aufbereitung und somit auf die Kosten des gesamten Bergwerkbetriebs. Entsprechend der Lagerstättenquantität ergibt sich eine optimale Betriebsgröße.

Die geologischen Parameter sind die maßgeblichen Einflussparameter für eine Lagerstätte. Es kommt aber schlussendlich immer darauf an, wo sich diese befindet und welche geographischen Rahmenbedingungen vorherrschen. Fehlende Infrastruktur, politische Instabilität und volkswirtschaftliche Belange können grundsätzlich bauwürdige Lagerstätten zu unbauwürdigen deklassieren. Somit dürfen die Standortbedingungen bei Lagerstätten nicht unterschätzt werden. Sie sind daher wie auch andere Bedingungen als Ausschlusskriterien zu sehen (Abbildung 11).

1. *Naturräumliche Gegebenheiten*
  - a) Klima: Temperaturen und Niederschläge im jahreszeitlichen Wechsel
  - b) Oberflächenbedingungen: Topographie, Gewässer, Vegetation, ökologische Gegebenheiten
  - c) Grundwasserbedingungen
  - d) Besondere Gefahren: Hochwasser, Muren, Lawinen
2. *Infrastruktur und Bebauung*
  - a) Politische Grenzen
  - b) Verkehrsanschlüsse und andere Überlandanschlüsse; Straßen, Eisenbahnen, Wasserwege, Flughäfen; Elektrizitätsleitungen, Pipelines; Tarife bzw. Kosten
  - c) Eigentumsverhältnisse; Nutzung, Verfügbarkeit und Kosten von Land
  - d) Besiedelung einschließlich kultureller Bedingungen sowie Bebauung; Baumöglichkeiten und Baukosten
  - e) Energieversorgung: Strom, Gas, Brennstoffe, Kraftstoffe; Verfügbarkeiten und Kosten
  - f) Versorgung mit Trink- und Gebrauchswasser; Verfügbarkeiten, Qualitäten, Kosten
  - g) Versorgung mit Massengütern wie Baustoffe und Holz; Verfügbarkeiten, Qualitäten, Kosten
  - h) Versorgung mit sonstigen Betriebsmitteln; Verfügbarkeiten, Qualitäten, Kosten
  - i) Versorgung auf den Gebieten von Schulen, Bildung, Erholung und medizinischer Betreuung
  - j) Landwirtschaftliches, forstwirtschaftliches, industrielles und kulturelles Umfeld
3. *Arbeitskräfte*
  - a) Verfügbarkeiten
  - b) Ausbildungsstand und Motivation
  - c) Lohn- und Gehaltsniveau
  - d) Gewerkschaftliche Organisation
4. *Empfindlichkeit gegen Eingriffe in die Umwelt und Umweltschutz*
5. *Eventuelle konkurrierende Ansprüche an das Naturraumpotenzial*
  - a) Land- und Forstwirtschaft
  - b) Bebauung für Wohn- oder Industriezwecke
  - c) Wassergewinnung
  - d) Gewinnung anderer mineralischer Rohstoffe
  - e) Fremdenverkehr
6. *Rechtliche Gegebenheiten*
  - a) Bergrecht und Bergbehörden, Energierecht, Produktionsvorschriften
  - b) Gesellschaftsrecht, Gewerberecht
  - c) Arbeits- und Sozialrecht
  - d) Normen auf den Gebieten der Raumordnung und des Umweltschutzes; Grundrecht, Wegerecht, Wasserrecht, Naturschutzrecht u. ä.
  - e) Handels-, Außenhandelsrecht
  - f) Steuerrecht
  - g) Vorgangsweise bei und Ablauf von Genehmigungsverfahren
7. *Fiskalische, finanzielle und rohstoffpolitische Gegebenheiten*
  - a) Besteuerung und sonstige Abgaben (Förderzins, Feldeszins), Steuerliche Förderungen, Abschreibungsvorschriften
  - b) Wechselkurse und Transfermöglichkeiten
  - c) Kapitalmarktverhältnisse
  - d) Monetäre Entwicklungen
  - e) Rohstoff- und energiepolitische Gegebenheiten
  - f) Wirken internationaler Organisationen
8. *Rechtssicherheit, politische Stabilität*

Abbildung 11: Geographische Gegebenheiten (im weitesten Sinne) am Standort eines Rohstoffvorkommens. [Fettweis 1990]

## 5.2 Bergtechnische Charakterisierung ausgewählter Mineralrohstoffvorkommen in Österreich

Nachfolgend erfolgt die Darstellung der wesentlichen Parameter für die häufigsten in Österreich vorhandenen und in Tabelle 13 farblich hervorgehobenen Lagerstätten.

## 5.2.1 Wolframerzvorkommen Hochrast/Gumriaul und Taffinalpe, Thurntaler Quarzphyllitzone, Osttirol

Von 1976 bis 1979 wurde von der Voestalpine AG und der Metallgesellschaft AG im Bereich Sillian und Lienz ein intensives Explorationsprogramm auf Wolframvererzungen sowie eine systematische geochemisch Bestandsaufnahme Osttirols durchgeführt [Metallgesellschaft AG 1978, VOEST-ALPINE 1978, 1980]. Die detaillierten Untersuchungsarbeiten in diesen Gebieten umfassten UV-Nachtprospektion, geologische Kartierungen sowie geochemische Bodenprospektionen. Im Zuge der Prospektionsarbeiten konnte eine Reihe von Wolfram-anomaliezonen gefunden werden, die vor allem im Raum Sillian und Lienz lokalisiert sind (vgl. Abbildung 12).

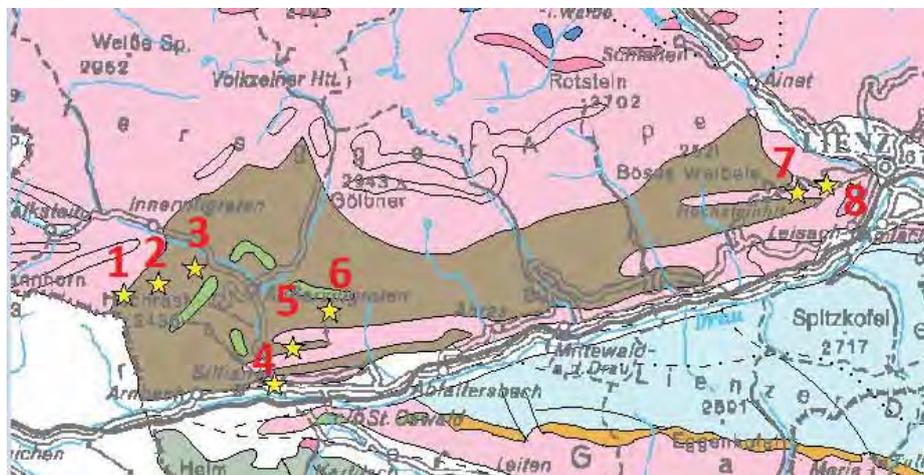


Abbildung 12: Geologische Übersicht über die Wolframerzvorkommen von Villgraten bis Lienz [GBA 2005/2009] – 1 Hochrast-Gumriaul, 2 Taffinalpe, 3 Walchecke, 4 Heimfels, 5 Tessenberger Alm, 6 Steinrast-Fronstahl, 7 & 8 Lienzer Schlossberg

Die interessantesten dieser Wolframvererzungen (gebunden an das Wolfram-Mineral Scheelit) liegen im Bereich Villgraten und sind an Metabasitzüge gebunden, welche sich konkordant in die „Thurntaler Quarzphyllite“ einlagern. Diese sogenannten Prasinite (metamorphe basische Gesteine, Metabasite) haben Mächtigkeiten von bis zu 20 m und lassen sich zwischen Zehner- und Hundertermeter im Streichen verfolgen. Gemäß Abschlussbericht (VOEST-ALPINE 1980) liegen die  $WO_3$ -Gehalte bei einer Mindestabbauhöhe von 2 m unter der Bauwürdigkeitsgrenze. Alle hier verwendeten Daten und Informationen zum Wolframerzvorkommen Hochrast/Gumriaul und Taffinalpe beziehen sich im Wesentlichen auf den Explorationsbericht „Scheelit-Exploration Sillian Osttirol, Abschlussbericht 1978“ verfasst von der Metallgesellschaft AG. Sämtliche Abbildung sind daraus entnommen und etwaige Abschnitte daraus qualitativ zitiert [Metallgesellschaft AG 1978].

### 5.2.1.1 Geologie

Die häufigsten Vorkommen stellen dabei Hochrast-Gumriaul und die Taffinalpe dar (Abbildung 12, 1 und 2). Sie sind aufgrund ihrer hohen Wolframgehalte genauer exploriert worden. Diese beiden Vorkommen und die jenes der Walchecke liegen in einer von Metabasiten durchzogenen Quarzphyllitzone, welche sich bei 600 m Stockwerkshöhe über mehrere Kilometer NE–SW streichende Länge verfolgen lässt. Der Abstand der beprobten Vorkommen beträgt mehrere Kilometer. Die Wolframanomalien sowie die Metabasitzone setzen sich auf italienischem Staatsgebiet fort. Nach Neinavaie et al. (1983) ist die Vererzung hauptsächlich an Metabasite, wie Prasinite oder Amphibolite, und teilweise auch an Quarzphyllit gebunden. Die Metabasite treten konkordant in den Quarzphylliten auf und erreichen eine Mächtigkeit von einigen Metern. Durch mehrfache Faltungen kann diese jedoch auf eine Scheinmächtigkeit von etwa 500 m anwachsen. Die scheelitführenden Metabasite sind mit den von Höll (1971) beschriebenen Typen im Taffin- und Holdergraben, welcher sich südlich von Innervillgraten befindet, vergleichbar. Scheelit tritt im Allgemeinen in Form von mm- bis cm-dicken, diskordanten Scheelit-Quarz-Gängchen, untergeordnet auch in schichtparallelen Lagen auf. Das Wolframerzvorkommen Hochrast/Gumriaul (Abbildung 13, gelber Stern) befindet sich am Höhenrücken des Gumriaul auf der Grenze zwischen Süd- und Osttirol in einer Höhe von 2.485 m. Zwei zum Ausbiss kommende Prasinitlinsen geben hier Aufschlüsse über die  $WO_3$ -Gehalte.



Abbildung 13: Freischurfkarte Sillian mit Informationen zur Geologie [Metallgesellschaft AG 1978]

Vom Juni bis Juli 1978 wurden im Bereich Taffinbach (Abbildung 13, roter Stern) 20 m Stollen und 17 m Querschlag aufgeföhren sowie ergänzend zu den Vortriebsarbeiten 101,5 m Meißelbohrungen niedergebracht. Der Anschlagspunkt befindet sich auf etwa 1.900 m in einem Seitental südlich von Innervillgraten. Im IRIS, dem interaktiven Rohstoff-informationssystem [GBA 2005/2009], erfolgt die geologische Klassifizierung (Tabelle 15) der drei Vorkommen aus Abbildung 13.

Tabelle 15: Allgemeine geologische Angaben zur Taffinalpe, Hochrast/Gumriaul und Walchecke [GBA 2005/2009]

Vorkommen	Taffinalpe	Hochrast/Gumriaul	Walchecke
<b>Rohstoffe</b>	W, As	W, As	W, As
<b>Wertstoffe</b>	W	W	W
<b>Metallo- genetischer Bezirk</b>	Wolframbezirk Gumriaul	Wolframbezirk Gumriaul	Wolframbezirk Gumriaul
<b>Tektonik</b>	Thurntaler Quarzphyllitzone	Thurntaler Quarzphyllitzone	Thurntaler Quarzphyllitzone
<b>Großeinheit</b>	Ostalpen	Ostalpen	Ostalpen
<b>Tektonik I</b>	Ostalpines Paläozoikum	Ostalpines Paläozoikum	Ostalpines Paläozoikum
<b>Tektonik II</b>	Thurntaler Quarzphyllit	Thurntaler Quarzphyllit	Thurntaler Quarzphyllit
<b>Bemerkung</b>	Scheelitführende Epidot- Chlorit-(Hornblende-) Führende Prasinite in Quarzphyllit. Vererzung wurde durch zwei kurze Stollen untersucht.	Stoffparallele Feinlagen von Scheelit mit Quarz und Karbonat in Prasinit körper; stärkste Ver- erzungen im Amphibolitzug	Scheelitmineralisation in Prasiniten des Thurntaler Quarzphyllites

### 5.2.1.2 Bergbauliche Aktivitäten

1978 wurde von der Metallgesellschaft AG und VOEST-ALPINE AG ein Versuchsstollen im Bereich des Vorkommens Taffinalpe angelegt. Gemäß Abschlussbericht der Metallgesellschaft AG (1978) ist ein Verhieb des Versuchsstollens von Juni bis Juli dokumentiert und es wurden 20 m Stollen und 17 m Querschlag aufgeföhren (Hubertusstollen). Die vorgefundenen tektonischen Verhältnisse, ein nicht ausreichend standfestes Gebirge, führten zur Einstellung der Vortriebsarbeiten. So erfolgte 18 m unterhalb und ca. 45 m westlich des Mundlochs ein neuer Stollenansatz durch Aufföhren von 53 m Stollen und 17 m Querschlag in einem Unterfahrungsstollen (Barbarastollen). Es fand auch ein Verbindungsaufbruch zum Hubertusstollen von 17 m statt. Weitere bergbauliche Aktivitäten werden wegen der relativ hohen  $WO_3$ -Gehalte am Gumriaul erwogen, vermutlich aus Halden vorangegangener Bergbautätigkeit auf Arsenkies. Im Zuge der Explorationsarbeiten der VOEST-ALPINE AG (1980) gab es auch Untersuchungen eines bekannten ausgeprägten Wolframmaximums mit mehr als 3 % Wolfram am Grenzkamm in der Nähe des Gumriauls. Aus einem Bereich sind alte

Bergbaue auf Arsenkies bekannt, welcher zusammen mit mobilisiertem Scheelit vorkommt. Dieser wurde beim damaligen Abbau von Bergleuten als nutzlose Gangart auf Halde geworfen. Die Wolframanomalie mit mehr als 3 % Wolfram lässt sich nur damit erklären, dass die Proben aus einer alten, bereits überwachsenen Halde stammen.

### 5.2.1.3 Bergtechnische Parameter der Lagerstätte

**Teufe:** Die Vorkommen Taffinalpe und Hochrast/Gumriaul sind beide ausbeißend. Die beprobten Bereiche sind oberflächennah und wurden durch Kern- sowie Meißelbohrungen und dem Versuchstollen nur wenige Zehnermeter in die Teufe verfolgt.

Bewertung: oberflächennah/ausbeißend

Beurteilung: ++

**Lagerstättenform:** Die Scheelitvererzungen sind an Prasinitlinsen gebunden, welche sich in den Quarzphyllit einlagern. Im Versuchstollen Taffinbach existieren die Scheelitvererzungen in feinkörniger Ausbildung lagig imprägniert. Hier wurden (bisher) zwei langlinsige Prasinitkörper verfolgt, die E–W streichen und steil stehen (80–90°). Beiden streichen nach Westen hin zu Tage aus (Abbildung 14).



Abbildung 14: Erkundungsstollen Taffinbach [Metallgesellschaft AG 1978]

Der nördliche Prasinitkörper (mit zwei Anreicherungs-zonen) weist eine Mächtigkeit von etwa 5 m auf, streicht mindestens 15 m und hat 35 m an Teufe. Er wird im Osten von einer 50°

ENE einfallenden Störung abgeschnitten. Der südliche Prasinitkörper (eine Anreicherungszone im Kontakt zum Quarzphyllit) ist nur auf einer Sohle bekannt. Seine Streichlänge wurde über 50 m nachgewiesen. Er besitzt etwa 5 m Mächtigkeit, während jedoch hinsichtlich Erstreckung nach der Teufe keine Informationen vorliegen. Am Grenzkamm Gumriaul haben diese Prasinitlinsen ein Streichen von NE–SW mit einer Länge von wenigen Zehnermetern, fallen mit 25–40 ° SE ein und sind 0,5 bis 3 m mächtig. Diese Linsen wurden über 25 m Länge festgestellt. Durch Kernbohrungen ließen sich auch noch weitere derartige Körper bestätigen.

Bewertung: langlinsige Körper, unregelmäßiges Auftreten

Beurteilung: -

**Hydrogeologie:** Die Vorkommen Gumriaul und Hochrast liegen in exponierten Bereichen. Übermäßige Wasserzuflüsse (Grundwasser) sind hier nicht zu erwarten. Das Vorkommen Taffinalpe befindet sich direkt angrenzend an einen Gebirgsbach in einer Grabenlage.

Bewertung: exponiert, Gebirgsbach

Beurteilung: -

**Gebirgseigenschaften:** Die Thurntaler Quarzphyllitzone besteht hauptsächlich aus phyllitischen Gesteinen. Gemäß Matthes (2001) sind Phyllite dünnstriefrig-blättrige Gesteine, welche sich vorwiegend aus Hellglimmern (Serizit) und Quarz zusammensetzen. Die Farbe ist meist grünlich-grau mit Seidenglanz. Phyllite stellen ein aus pelitischen Gesteinen entstandenes, regionalmetamorphes Produkt dar. Die Scheelitvererzungen liegen an Prasinite (Grünschiefer) gebunden vor, welche sich mit dem Überbegriff Metabasite (metamorphes basisches Gestein) definieren lassen. Zwischen dem plastischem Quarzphyllit und dem sprödem Prasinit kommt es häufig zu Deformationen, wie z.B. eine Gesteinszerreißung im Versuchstollen Taffinbach in überwiegend vertikaler Richtung, welche sich durch eine intensive Zerklüftung im Gebirge zeigt. Auch die Vortriebsarbeiten beim Barbaraerkundungstollen fanden durch das tektonisch stark beanspruchte Gebirge ein rasches Ende.

Bewertung: Nebengebirge Phyllit, Muttergestein Prasinit, tektonisch stark beansprucht

Beurteilung: -

**Wertstoffgehalt:** Im Bereich Taffinbach ergeben sich im nördlichen Prasinitkörper durchschnittliche Gehalte zwischen 0,2 und 0,3 %  $WO_3$  und während im südlichen etwas geringere Gehalte von 0,2–0,25 %  $WO_3$  vorliegen. Im Bereich Hochrast-Gumriaul wurde eine Prasinitlinse mit 0,45–0,57 %  $WO_3$  angetroffen. In anderen Prasinitlinsen sind jedoch Mineralisationen nur spurenhaf vorhanden.

Bewertung: durchschnittlicher bzw. leicht unterdurchschnittlicher  $WO_3$ -Gehalt

Beurteilung: -

**Wertstoffeigenschaften:** Scheelit hat die Eigenschaft, im Dunkeln bei ultraviolettem Licht zu fluoreszieren, daher stellt auch die Nachtprospektion die Methode der Wahl dar, um Scheelitvererzungen aufzufinden. Mit optischen UV-Aufnahmen (z.B. Foto einer Ortsbrust, Abbildung 15) lassen sich die  $WO_3$ -Gehalte in einer Ebene abschätzen und somit Informationen über die Gehalte über ein Flächenverhältnis errechnen.



Abbildung 15: UV-Aufnahme aus dem Barbarastollen [Metallgesellschaft AG 1978]  
Anlage 11/3: Aufbruch, ca. 6 m über Sohlenniveau, Barbarastollen (Detailaufnahme),  
0,52 %  $WO_3$  / 1,5 m (entspricht Probe 45)

Bewertung: keine Bewertung

Beurteilung: keine Beurteilung

**Aufbereikbaarheit:** Es wurden Aufbereitungsversuche zur Voranreicherung durchgeführt. Die Schwimm-Sink-Trennungsversuche ergaben einen optimalen Trennschnitt bei  $\gamma = 3,05$  kg/l. Eine gravimetrische Voranreicherung bis zu einer Korngröße von 5 mm erscheint somit möglich. Eine  $WO_3$ -Anreicherung lässt sich in den Kornbereich von 0,315 bis 0,036 mm erzielen. In dieser Kornklasse wurde auch das beste Ausbringen erzielt (Tabelle 16).

Tabelle 16: Bilanztafel der Aufbereitungsversuche Taffinalpe [VOEST-ALPINE 1978]

Kornklasse 0,315–0,1 mm			
Produkt	Anteil [Gew.-%]	WO <sub>3</sub> -Gehalt [Gew.-%]	Ausbringen [%]
Konzentrat	3,1	13,4	74,3
M-Produkt	11,3	0,18	3,8
Berge	85,1	0,14	21,4
Aufgabe	100	0,56	100
Kornklasse 0,1–0,036 mm			
Produkt	Anteil [Gew.-%]	WO <sub>3</sub> -Gehalt [Gew.-%]	Ausbringen [%]
Konzentrat	5,9	7,3	72,6
M-Produkt	49,8	0,25	19,7
Berge	44,3	0,11	7,7
Aufgabe	100	0,63	100

Bewertung: eindeutig aufbereitbar

Beurteilung: ++

**Zerkleinerungsverhalten:** In Bezug auf das Zerkleinerungsverhalten wurden keine Informationen gesammelt. Der Rückschluss vom vorhandenen Gestein (Metabasit, Quarzphyllit: spröde, hohe Druckfestigkeit, hohe Abrasivität), welches große Anteile von Quarz enthält, lässt auf einen erhöhten Energieeintrag und Verschleiß bei der Zerkleinerung schließen.

Bewertung: siehe Aufbereitbarkeit

Beurteilung: keine Beurteilung

**Mineralogische und chemische Zusammensetzung:** Scheelit, CaWO<sub>4</sub>, stellt neben Wolframit, (Fe, Mn)WO<sub>4</sub>, die wichtigste Wolframverbindung dar. Die gegenständlichen Scheelitvererzungen sind an Metabasite gebunden. Laut Portugaller (2010) handelt es sich dabei um Grüngesteine, die aus basischen, magmatischen Protolithen, wie zum Beispiel Basalte und deren Tuffe, entstanden. Das Vorherrschen von Chlorit, Aktinolith, Quarz, Feldspat, Karbonat, Muscovit und Biotit ist für sie charakteristisch. Die VOEST-ALPINE AG (1978) beschreibt die Metabasite als olivgraue, fein bis mittelkörnige, gut geschieferte Gesteine. Eine grobkörnige Varietät ist durch millimeterstarke Quarz-Feldspatlagen zum Teil deutliche gebändert. Neben bis zu 3 cm großen Quarzknuern treten auch diskordante Quarz-Feldspatmobilisationen mit grobkörnigen, xenomorphen Scheelitindividuen bis mehrere Zentimeter Größe auf. Der Scheelit tritt bevorzugt an Quarz-Feldspatlagen gebunden, aber auch in nicht lagig ausgebildeten Gesteinsvarietäten zeilig, stark gelängt auf. Teilweise sind die Scheelitaggregate mit bis zu 3 mm Breite und 30 mm Länge ausgewalzt. In der Regel liegen die Körner jedoch in einer Größe von 150–500 µm vor. Heinisch und

Schmidt (1976) geben folgenden Mineralbestand für die vererzten Gesteine am Grenzkamm zwischen Hochrast und Gumriaul an: 5 % Quarz, 9 % Albit, 18 % Chlorit, 47 % Hornblende, 13 % Epidot/Zoisit und 5 % Kalkspat. Die erzführenden Gesteine im Bereich Taffinalpe enthalten weniger Chlorit und Kalkspat aber mehr Hornblende. Die Gesteinsanalysen aus fünf Proben vom Grenzkamm des Gumriaul und zwei Proben von der Taffinalpe belegen durchaus den ursprünglich basaltischen Chemismus der Metabasite (siehe Tabelle 17).

Tabelle 17: Gesteinsanalysen Gumriaul und Taffinalpe [Heinisch und Schmidt 1976]

Gumriaul [Gew.-%]		Taffinalpe [Gew.-%]	
SiO <sub>2</sub>	49,25	SiO <sub>2</sub>	48,45
TiO <sub>2</sub>	1,33	TiO <sub>2</sub>	1,52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,8	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,5
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,046	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	n.b.
FeO	10,01	FeO	11,5
CaO	10,05	CaO	8,91
MgO	9,75	MgO	4,19
Na <sub>2</sub> O	3,00	Na <sub>2</sub> O	2,77
K <sub>2</sub> O	0,15	K <sub>2</sub> O	1,37
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,25	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	n.b.

Bewertung: siehe Aufbereikbaarheit

Beurteilung: keine Beurteilung

**Wertstoffmenge:** Das als höffig anzusehende Gebiet umfasst ca. 3 Mio. m<sup>2</sup> (gesamtes Freischurfareal Sillian: ca. 25,5 Mio. m<sup>2</sup>). In diesem Bereich treten an Prasinite (Metabiste) gebundene Scheelitvererzungen auf. Davon sind bisher nur das Vorkommen Hochrast-Gumriaul und Taffinalpe näher exploriert worden. Inwieweit sich das restliche Gebiet als höffig ansehen lässt, ist aufgrund der derzeitigen Prospektionslage nicht näher definierbar. Die Vererzungen am Grenzkamm liegen zwar stratiform streng an Prasinite gebunden vor, jedoch noch absätziger und unregelmäßiger als das Trägergestein selbst, so dass keinerlei substanzielle Mengen mit bauwürdigen Erzgehalten zu erwarten sind. Für den nördlichen Prasinitkörper Taffinbach ergibt sich eine Reserve von 8.085 t mit 0,2–0,25 % WO<sub>3</sub>. Der südliche Körper ist nur auf einer Sohle bekannt und kann daher nicht berechnet werden.

Bewertung: geringe bekannte Reserve (Potenzial für weitere Explorationen)

Beurteilung: -

**Lage und Infrastruktur:** Die hier angesprochenen Wolframvorkommen der Thurntaler Quarzphyllitzone befinden sich in Bereichen über 1.800 m Seehöhe nördlich von Sillian in Osttirol. Sie liegen außerhalb schutzwürdiger Zonen wie Nationalparks, Natura 2000

Gebiete, etc. Der Zugang zu den Vorkommen erfolgt vom angrenzenden Tal (Villgratener Tal) aus. Die dorthin führenden Straßen sind zweispurig und für den Schwerverkehr ausgebaut. Über serpentinreiche Schotterstraßen gelangt man mit einem geländegängigen Kraftfahrzeug zu den genannten Vorkommen. Es gibt bis auf angrenzende Gebirgsbäche keine Wasser- und auch keine Stromversorgung. Die nächstgelegene Versorgung befindet sich im Tal. Die Nutzung dieser Gebiete beschränkt sich auf Alm- und Forstwirtschaft bzw. der dort vorhandene Alpentourismus auf das Wandern.

Bewertung: zugänglich, keine Besiedelung, jedoch alpin

Beurteilung: +

**Schurf-/Bergbauberechtigungen:** Von der Montanbehörde West gibt es keine Auskunft bezüglich aktueller Schurf- oder Bergbauberechtigungen auf Wolfram in diesem Gebiet.

Abschließend fasst die Tabelle 18 nochmals die wesentlichen Parameter zusammen.

Tabelle 18: Übersicht von den bergtechnischen Parametern für das Wolframerzvorkommen Taffinalpe und Hochrast/Gumriaul, Osttirol

Bergtechnische Charakterisierung		Quantifiziert	Bewertung	Beurteilung *	Bauwürdigkeit
<b>Standort</b>	Lage und Infrastruktur	Ja	Zugänglich, keine Besiedelung, jedoch alpin	+	Derzeit nicht bauwürdig! Tektonisch stark beanspruchtes Gebirge, zu geringe Erzmengen bekannt, weitere Exploration notwendig
<b>Lagerstättenbonität</b>	Teufe	Ja	Ausbeißend	++	
	Lagerstättenform	Ja	Langlinsig, unregelmäßig	-	
	Hydrogeologie	Bedingt	Exponiert, jedoch Gewässernähe	+/-	
	Gebirgs-eigenschaften	Ja	Tektonisch stark beansprucht	-	
<b>Lagerstättenqualität</b>	Wertstoffgehalt	Ja	Leicht unterdurchschnittlich	-	
	Wertstoffeigenschaften	Ja	-		
	Aufbereitbarkeit	Ja	Eindeutig aufbereitbar	++	
	Zerkleinerungsverhalten	Bedingt			
	Mineralogie und Petrologie	Verweis			
<b>Lagerstättenquantität</b>	Wertstoffmenge	Ja	Geringe Mengen bekannt	--	

\* Beurteilungsschema: von abbaufördernd “++” bis abbauhindernd “--“

## 5.2.2 Ehemalige Antimonerzlagerstätte Rabant/Gurskerkammer, Kreuzeckgruppe, Ostalpines Kristallin, Kärnten, Osttirol

Die Antimonvererzungen der Rabantserie (Abbildung 16) beinhalten von NW nach SE die Lagerstätten Gomig, Mariengrube, Johannigrube, Rabant, Edenstollen und Gurskerkammer. An diesen Orten erfolgte bereits eine bergmännische Gewinnung von Antimonit. Das Rabantvorkommen hebt sich bezüglich Lagerstätteninhalts von den anderen ab und war somit auch bergbaulich von größerer Bedeutung. Für die bergtechnische Charakterisierung wird dieses Vorkommen herangezogen. Es ergeben sich Analogien für die ganze Rabantserie.



Abbildung 16: Geologische Übersicht von den Antimonvererzungen der Rabantserie [GBA 2005/2009]

### 5.2.2.1 Geologie

Weber (1982) beschrieb, dass die Kreuzeckgruppe, in welche sich die Rabantserie einordnet, geologisch zum Mittelostalpin gehört. Sie wurde in kretazischer Phase als aufrecht liegende Masse dem Pennin und dem Unterostalpin aufgeschoben. Der näher bearbeitete Abschnitt des Osttiroler Anteils der Kreuzeckgruppe wird allgemein zur südlich gelegenen Korideneinheit gezählt, welche auf der nördlich gelegenen Murideneinheit auflagert. Die Rabantserie besteht petrographisch aus Wechsellagerungen von verschiedenartigen Glimmerschiefern und Gneisen mit kennzeichnenden Schichtgliedern von Amphibolitbändern und Gneislagen. Eine allgemeine geologische Darstellung zu den Antimonitvorkommen der Rabantalm erfolgt in Tabelle 19.

Tabelle 19: Allgemeine geologische Angaben zu den Antimonitvorkommen der Rabantalm [GBA 2005/2009]

<b>Vorkommen</b>	Rabant
<b>Rohstoffe</b>	Sb, As, W
<b>Wertstoffe</b>	Sb, As
<b>Metallogenetischer Bezirk</b>	Sb-(As, Au, Pb, Cu); Au-As-Erzbezirk Kreuzeck-Goldeckgruppe
<b>Tektonik</b>	Koriden südlich des Tauernfensters
<b>Großeinheit</b>	Ostalpen
<b>Tektonik I</b>	Ostalpines Paläozoikum
<b>Tektonik II</b>	-
<b>Bemerkung</b>	siehe unten

### 5.2.2.2 Bergbauliche Aktivitäten

Die Geschichte des Antimonbergbaues bei Oberdrauburg findet sich in der heutigen Literatur öfters wieder. Weber (1982) fasste sie zusammen und führte diese gemeinsam mit seinen Untersuchungen in diesem Gebiet an. Die Antimonbergbaue bei Oberdrauburg sind seit dem 17. Jahrhundert bekannt. Nachdem aber die Antimonvererzung von Rabant darauf offenbar lange Zeit in Vergessenheit geriet, wurde sie erst 1936 wiedergefunden und beschürft. Die eigentliche Aufnahme des Produktionsbetriebs erfolgte nach einem Aufschlussergebnis von rund 40.000 t sicherer und wahrscheinlicher Erze mit etwa 3 % Sb nach Errichtung einer Aufbereitungsanlage im November 1950. Im Jahre 1951 brachten jedoch einige Komplikationen und Enttäuschungen hinsichtlich des Metallgehaltes, des relativ arsenreichen Charakters der Erze und seiner schwierigen Aufbereitbarkeit bzw. Anreicherbarkeit zu verhüttungsfähigem Gut Schwierigkeiten. Zuzufolge einer gegen Ende des Jahres 1951 zusätzlich eingetretenen Absatzkrise und dem nachfolgenden Preissturz war eine Wirtschaftlichkeit nicht mehr gegeben. Aus diesem Grunde wurde der Betrieb mit Ende Juli 1952 eingestellt.

### 5.2.2.3 Bergtechnische Parameter des Antimonerzvorkommens Rabantalm

**Teufe:** Der Sb-führende Grafit-schiefer ist auf der Rabantalm über dem Hermannstollen bis 1.180 m NN im Bachbett bei einer maximalen Mächtigkeit von 5 m aufgeschlossen. In die Teufe ließ sich das Erzlager bis 1.000 m NN nachweisen. Nach geologischer Betrachtung setzt es sich weiter in die Teufe hin fort, jedoch gibt es dafür keine genaueren Untersuchungsergebnisse.

Bewertung: oberflächennah

Beurteilung: +

**Lagerstättenform:** Die Lagerstätte zeigt im Wesentlichen NW–SE gerichtetes Streichen und verflacht 55–70 ° gegen NE. Das Antimonerz wurde auf 250 m verfolgt und ist an eine

lagerartige, grafitische Ruschelzone (1–2 m mächtig) gebunden, die 10 m im Hangenden von einer zweiten, schieferungsparallelen Ruschelzone begleitet werden kann. Die Ruschelzone bildet zugleich eine Gangfläche. Innerhalb dieser ist die Antimonitvererzung auf einzelne linsen- bis schlauchförmige Adelszonen (Abbildung 17) beschränkt, wo sie als cm- bis dm- starke Derberzstreifen am Rande von Quarzlinsen oder auch selbständig auftritt. Imprägnationsvererzungen sind jedoch auch zwischen den Adelszonen anzutreffen.

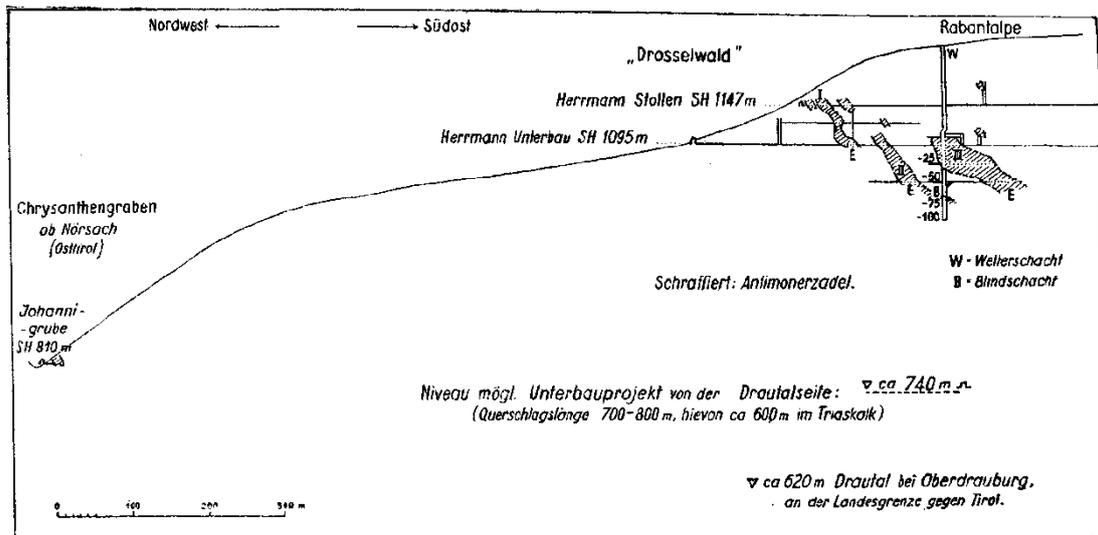


Abbildung 17: Bergbau Rabant mit Adelszonen E [Hiessleitner 1949]

Bewertung: schmale Reicherzonen, jedoch auch Imprägnationsvererzungen

Beurteilung: +

**Hydrogeologie:** Laut Betriebsberichten gab es Probleme mit der Wasserhaltung. Durch die stark zerklüftete Ruschelzone ist mit einem erhöhten Wasserzufluss zu rechnen.

Bewertung: stark wasserführend

Beurteilung: --

**Gebirgseigenschaften:** Die Lagerstätte liegt in einer Abfolge bestehend aus Granatglimmerschiefern, stark mylonisierten Schwarzschiefern (Grafit-schiefer) und Grünschiefern. Die Mylonitzone („Ruschelzone“) ist als tektonische Schwächezone anzusehen. Die gesamte Gesteinsabfolge lässt sich als nicht standfest betrachten. Die Ruschelzone bildet das schwächste Glied einer ohnehin schwachen geologischen Zone. Bisherige Bergbauberichte weisen ebenfalls auf starke Komplikationen mit dem Gebirge hin und auf die Notwendigkeit eines erheblichen Ausbaus. Entlang der Drau wird diese Gesteinsabfolge nach Süden hin durch die Pusterwaldstörung zu den Triasdolomiten abgegrenzt, welche eine ausreichende Standfestigkeit besitzen.

Bewertung: nicht standfestes Gebirge

Beurteilung: --

**Wertstoffgehalt:** Die Antimon- und Arsengehalte (Tabelle 20) wurden im Zuge der Schließung bis auf die -50 m Sohle beprobt.

Tabelle 20: Gehalte laut Betriebsbericht [Weber 1982]

Sohle	Probenanzahl	Sb	As
Über -50 m Sohle	17	6,675 %	1,111 %
Über -25 m Sohle	42	7,668 %	0,85 %
Über -12 m Sohle	40	6,036 %	0,502 %

Bewertung: überdurchschnittliche Gehalte

Beurteilung: +

**Wertstoffeigenschaften:** Antimon tritt gemeinsam mit Scheelit in dieser metamorph überprägten, erzführenden Serie auf. Bei Prospektionen kann somit auf die Eigenschaften von Scheelit zurückgegriffen werden (siehe Kapitel 5.2.1.3 zu dessen Wertstoffeigenschaften).

Bewertung: keine Bewertung

Beurteilung: keine Beurteilung

**Aufbereikbaarheit:** Im Jahre 2007 wurden vom Institut für Aufbereitung und Veredlung Versuche unter der Arbeit „Orientierende Untersuchungen zur Aufbereikbaarheit von Quarz-, Grafit-, Antimonit- und Bentonitproben“ durchgeführt (vgl. Stadtschnitzer und Flachberger 2007). Die Versuche fanden an Antimonitproben aus Haldenmaterial der Rabantserie statt. Das gesamte Material wurde auf 100 % < 6 mm zerkleinert. Dabei war schon eine Zunahme der Dichte in den feineren Kornklassen auffällig. Dies ließ sich mit einer Schwimm-Sink-Analyse an der Fraktion 315/200 µm analysieren. Ein großer Masseanteil lag in der Dichteklasse 2,71/3,28 g/cm<sup>3</sup>, woraus sich ein Hinweis auf Verwachsungen zwischen Sulfiden und silikatischem Nebengestein ergibt. Im weiteren Verlauf wurde auch versucht, mittels Magnetscheidung (Frantzseider) das Wertmineral anzureichern. Die Konzentrate beider Versuchsanordnungen zeigten feinste Verwachsungen sowohl zwischen Antimonit und der Gangart als auch zwischen Antimonit und Pyrit. Des Weiteren erfolgten zwei Flotationsversuche mit einem Reagenziengemisch aus Xanthatsammler, Kupfersulfat sowie Bleiacetat als Aktivierer für die Sulfide und Methylisobutylcarbinol als Schäumer. Im erfolgreicheren der beiden Versuche konnte eine Anreicherung des Antimonits erreicht werden. Der noch immer vorhandene Anteil an Pyrit ist auf die vorhandenen, feinsten Verwachsungen zurückzuführen. Fazit ist, dass die Flotation das einzige aussichtsreiche Verfahren zur Erzeugung

eines qualitätskonformen Antimonkonzentrates darstellt. Die Aufbereitungsversuche waren jedoch wegen der Überschreitung des gesundheitsschädlichen Arsengehaltes im Aufbereitungskonzentrat nicht erfolgreich. Die schwierige Aufbereitbarkeit bzw. Anreicherbarkeit zu verhüttungsfähigem Gut und der arsenreiche Charakter der Erze bestätigten die Probleme zur Zeit der Bergbautätigkeit und sind der Hauptgrund, warum der Bergbau im Jahre 1951 eingestellt werden musste.

Bewertung: bisher keine Möglichkeit, den Arsengehalt zu reduzieren

Beurteilung: --

**Zerkleinerungsverhalten:** Zum Zerkleinerungsverhalten wurden keine genaueren Untersuchungen durchgeführt.

Bewertung: siehe Aufbereitbarkeit

Beurteilung: keine Beurteilung

**Mineralogische und chemische Zusammensetzung:** Innerhalb der grafitischen Lage (Grafitchiefer, „Ruschelzone“) treten unregelmäßig verteilte, schichtparallele Reicherzlinen auf, die „Adelsbereiche“. Zwischen diesen ist Antimonit in Spuren anzutreffen. Die Antimonvererzungen treten nach Lahusen (1969) als spärliche bis reichliche Imprägnationserze auf, in vorwiegend hellem Quarz als Gangart. Die Quarzgänge sind durchschnittlich 80 cm dick und erreichen bis zu 2 m Mächtigkeit bei unregelmäßiger Abfolge. Die Derberzstreifen mit Stärken von einigen cm bis dm finden sich am Rande der Quarzlinen oder selbständig in der Ruschelzone. Erzmikroskopisch konnten laut Reimann (1980) neben Antimonit Arsenkies, Pyrit, Bravoit, Bertherit sowie Zinnkies nachgewiesen werden. Der Antimonit ist unregelmäßig mit kleinkörnigem bis mittelkörnigem Arsenkies, zumeist idiomorph ausgebildet, verwachsen. Laut Weber (1982) ließ sich neben Karbonat noch Quarz, Zinkblende sowie Scheelit als Gangart nachweisen.

Bewertung: siehe Aufbereitbarkeit

Beurteilung: keine Beurteilung

**Wertstoffmenge:** Im Zuge der Schließungsphase wurden 10.440 t an sicheren und 2.560 t an wahrscheinlichen Vorräten im Adel 3 nachgewiesen. Adel 1 und 2 dünnen nach der Teufe hin aus. Darüber hinaus sind auch noch die Erzvorräte der umliegenden Lagerstätten und Halden in Betracht zu ziehen:

- Johannisgrube (437 t sichtbar, 2.275 t wahrscheinlich)
- Mariengrube (350 t sichtbar, 1.050 t wahrscheinlich, 350.000 t möglich)
- Gomig (keine Angaben)

Gemäß Weber (1982) fand Erwähnung, dass eine Wiederauffahrung der Lagerstätte Rabant schwierig und nicht profitabel sei (Stand 1982). Weitere Untersuchungsarbeiten an der Lagerstätte Gomig wurden hingegen empfohlen. Hier treten hohe Antimonkonzentrationen auf und die Vererzung ist noch nahezu unerschlossen.

Bewertung: geringe Reserven bekannt, weitere Exploration notwendig

Beurteilung: -

**Lage und Infrastruktur:** Die Rabantserie liegt an der Landesgrenze zwischen Kärnten und Osttirol über Oberdrauburg auf einer Seehöhe von 1.000 bis 1.250 m auf exponierter Lage, Eine Seilbahnverbindung diente früher zur Überbrückung ins Drautal. Die Vererzung befindet sich nicht in Naturschutzgebieten. Die Drautal-Bundesstraße im Tal ist für den Schwerverkehr geeignet, während einspurige, steile, jedoch asphaltierte Straßen zu den höheren Ortschaften führen. Die Lagerstätten selbst sind von dort aus auf gut präparierten Schotterstraßen zu erreichen. Die Strom und Wasserversorgung geht bis zum Ende der asphaltierten Straßen. Das Gebiet wird durch Alm- und Forstwirtschaft genutzt. Der Wandertourismus ist ausgeprägt und ehemalige Bergbauegebäude werden als Hütten genutzt.

Bewertung: gut zugänglich

Beurteilung: ++

**Schurf-/Bergbauberechtigungen:** Im besagten Gebiet gibt es Schurfberechtigungen auf Gold. Von der Behörde wurde bezüglich Bergbau und Schurfberechtigungen auf die Literatur verwiesen.

Abschließend fasst die Tabelle 21 nochmals die wesentlichen Parameter zusammen.

Tabelle 21: Übersicht von den bergtechnischen Parametern für die Antimonitvorkommen der Rabantserie, Osttirol, Kärnten

Bergtechnische Charakterisierung		Quantifiziert	Bewertung	Beurteilung *	Bauwürdigkeit
<b>Standort</b>	Lage und Infrastruktur	Ja	Gut zugänglich	++	Derzeit nicht bauwürdig! Hohe Abbaukosten durch starke Wasserführung und nicht standfestes Gebirge; Aufbereitungsproblem: Arsengrenzwert nicht unterschreitbar; zu geringe Mengen bekannt; weitere Exploration wäre erforderlich
<b>Lagerstättenbonität</b>	Teufe	Ja	Oberflächennah	+	
	Lagerstättenform	Ja	Schmale Reicherzonen	+	
	Hydrogeologie	Ja	Stark wasserführend	--	
	Gebirgseigenschaften	Ja	Nicht standfestes Gebirge	--	
<b>Lagerstättenqualität</b>	Wertstoffgehalt	Ja	Überdurchschnittlich	+	
	Wertstoffeigenschaften	Ja	-		
	Aufbereitbarkeit	Ja	Zu hoher Arsengehalt	--	
	Zerkleinerungsverhalten	Nein			
	Mineralogie und Petrologie	Verweis			
<b>Lagerstättenquantität</b>	Wertstoffmenge	Ja	Geringe Mengen bekannt	-	

\* Beurteilungsschema: von abbaufördernd “++” bis abbauhindernd “--”

### 5.2.3 Ehemaligen Grafitlagerstätten und -vorkommen in der Böhmisches Masse, Moldanubikum, Niederösterreich

Im Waldviertel sind die Grafitlinsen der „Bunten Serie“ des Moldanubikums seit jeher bekannt und auch bergmännisch gewonnen worden. Zahlreiche Bergbaue säumten dieses Gebiet. Niedrige Rohstoffpreise und auch erschöpfte Lagerstätten brachten die Waldviertler Grafitproduktion jedoch zum Erliegen. Im Jahre 1987 erfolgte eine detaillierte Untersuchung und Bewertung dieser Vorkommen [Polegeg et al. 1987]. Eine Auswertung zum damaligen Stand ergab, dass von insgesamt 18 untersuchten Vorkommen acht als „Rohstoffsicherungsgebiete“ eingestuft wurden und weitere zwei nach zusätzlichen Untersuchungsarbeiten ebenso das Potenzial dazu haben. Diese acht Vorkommen gemeinsam mit dem größten erschöpften Bergbau Mühldorf (Trandorf, Weinberg) bilden die Grundlage für das weitere Vorgehen der bergtechnischen Charakterisierung in dieser Arbeit. Die folgende Liste (Tabelle 22) bzw. Karte (Abbildung 18) zeigt die gesamten Grafit- und Erzlagerstätten des niederösterreichischen Waldviertels. Die Rohstoffsicherungsgebiete sind 18 Voitsau, 34 Wurschenaigen, 39 Rabesreith-Nonndorf, 40 Röhrenbach, 43/44 St. Marein – Dappach

(5 km N von St. Marein), Rothweinsdorf, 54 Unterthumeritz und 66 Ranzles bei Waidhofen a. d. Thaya. Die zwei noch genauer zu überprüfenden Gebiete sind 13 Kirchschatlag bei Ottenschlag und 68 Oberedlitz bei Thaya.

Tabelle 22: Liste der Grafitlagerstätten des Waldviertels, aufgenommen 1937 [Steffan 1944]

1 Fürholz	20 Ranna bei Mühldorf	37 Krumau am Kamp	Thumeritz
2 Rottenhof	21 Wolfstein im Dunkel-	38 Tiefenbach	55 Goslarn
3 Loja	steinerwald	39 Nondorf und Kleinraabs	56 Zettenreith
4 Steinbach bei Marbach	22 Häusling im Dunkel-	bei Krumau	57 Wollmersdorf
a. d. D.	steinerwald	40 Röhrenbach und	58 Zettlitz oder Cerni-
5 Artstetten	23 Hengstberg und	Feinfeld	mühle oder Pfinning-
6 Ornding bei Pöchlarn	Eckartsberg im	41 Tautendorf	steigmühle
7 Harth	Dunkelsteinerwald	42 Neukirchen an der Wild	59 Eibenstein
8 Pöbring	24 Rohr bei Loosdorf	43 St. Marein	60 Primmerdorf a. d.
9 Seiterndorf und Nating	25 Berging bei Schön-	44 Dappach	Thaya
10 Mollenburg	bühel	45 Brunn an der Wild	61 Nonndorf bei
11 Weiten	26 Schönbühel	46 Messern	Drosendorf
12 Strassreith	27 Arzwiesen bei Els	47 Dietmannsdorf an der	62 Elsern bei Drosendorf
13 Kirchschatlag bei	28 Scheutz	Wild	63 Drosendorf
Ottenschlag	29 Taubitz	48 Nondorf an der Wild	64 Thürnau
14 Feistritz	30 Lichtenau	49 Teich bei Klein	65 Brunn bei Waidhofen a.
15 Wegscheid und Oetz	31 Brunn am Walde	Haselbach	d. Thaya
bei Mühldorf	32 Loiwein	50 Groß-Siegharts	66 Ranzles bei Waidhofen
16 Weinberg	33 Eggendorf bei Göttweig	51 Loibes	a. d. Thaya
17 Elsenreith	34 Wurschenaigen	52 Karlstein	67 Thaya
18 Voitsau	35 Rastbach	53 Trabenreith	68 Oberedlitz bei Thaya
19 Mühldorf	36 Neubau	54 Unter- und Ober	69 Dobersberg

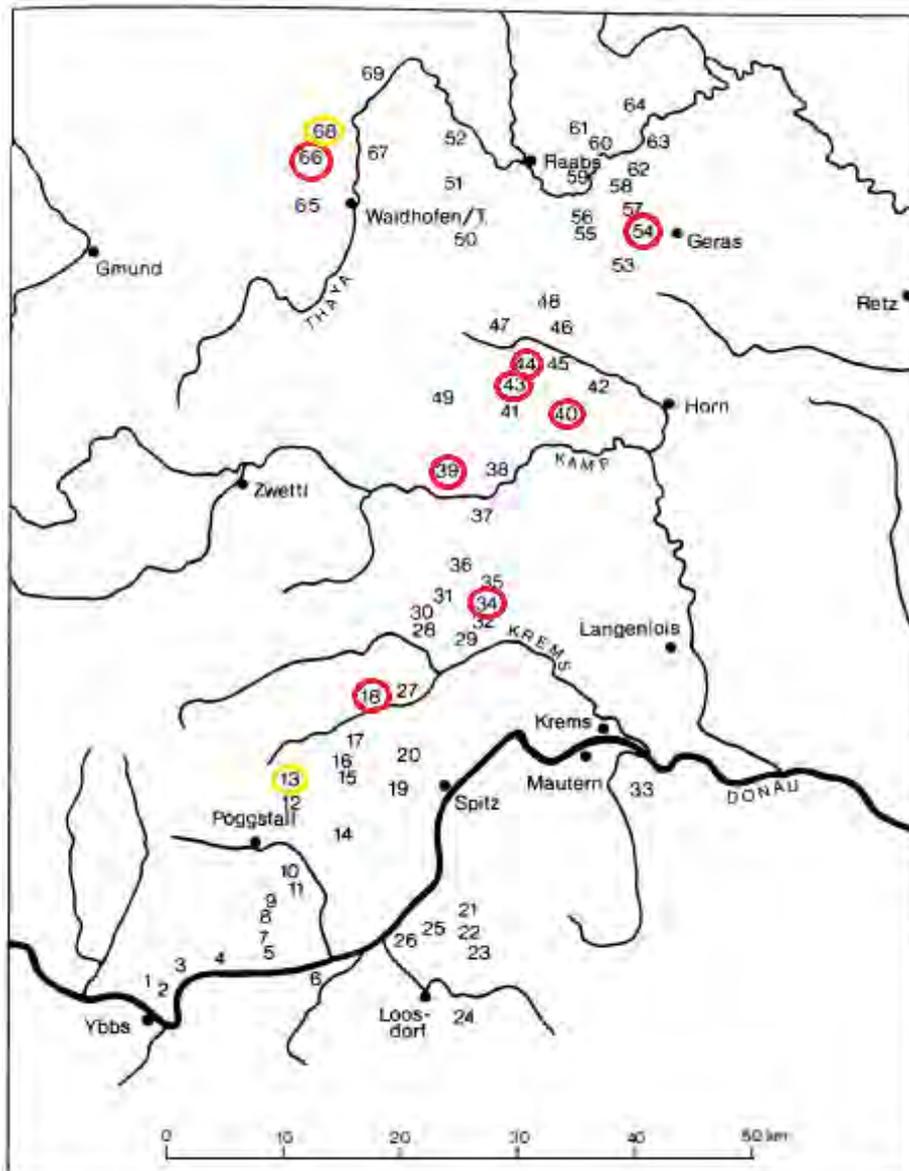


Abbildung 18: Karte der Grafitlagerstätten des Waldviertels, aufgenommen 1937 [Steffan 1944]

### 5.2.3.1 Geologie

Die niederösterreichischen Grafitvorkommen konzentrieren sich auf die Abfolgen der „Bunten Serie“ des Moldanubikums in der Böhmisches Masse und auf nachrangige Vorkommen in der Grauwackenzone. In diesem Kapitel werden ausschließlich jene der Böhmisches Masse bearbeitet. Geologisch erfolgt die Klassifikation der Grafitvorkommen der „Bunten Serie“ gemäß Tabelle 23. Die Verteilung dieser ehemaligen Bergbaue sieht man anhand der geologischen Übersichtskarte der Böhmisches Masse (Abbildung 19). Hier ist auch zu erkennen, wie sich die Vorkommen über einen max. 50 km breiten Streifen der Drosendorfer Decke von N nach S ziehen. Neben der Grafitbrekzie tritt bei den Vorkommen als Nebengesteins Amphibolit und Marmor auf.

Tabelle 23: Allgemeine geologische Einteilung der Grafitvorkommen in der Böhmischer Masse [GBA 2005/2009]

<b>Vorkommen</b>	„Bunte Serie“
<b>Rohstoffe</b>	Grafit
<b>Wertstoffe</b>	Grafit
<b>Metallogenetischer Bezirk</b>	Grafitbezirk „Bunte Serie“
<b>Tektonik</b>	Böhmische Masse, Moldanubikum
<b>Großeinheit</b>	Böhmische Masse
<b>Tektonik I</b>	Moldanubikum
<b>Tektonik II</b>	Moldanubisches Metamorphikum



Abbildung 19: Geologisch-tektonische Übersicht und schematisches Profil durch den österreichischen Anteil der Böhmischer Masse [Weber 1987]

Nach Polege et al. (1987) ist das Erz als Grafitbrekzie charakterisiert, wobei die Grafitkomponenten in einer Matrix aus Quarz, Feldspat, Tremolit und Glimmern liegen. Pyrit ist fast immer in wechselnder, mitunter auch in bedeutender Menge vorhanden.

Der Genese der Grafitvorkommen der „Bunten Serie“ geht auf Faulschlämme (Sapropel) zurück, daher zeigen diese Grafite einige wesentliche Unterschiede zu Grafiten, die aus der Metamorphose pflanzlichen Materials entstanden sind. Die Genese dieses Grafites wird nach Weber (1987) auf das Absterben von Organismen in einem marinen Biotop zurückgeführt. Durch verschiedene Einflussfaktoren, wie fehlender Wasseraustausch und dem damit verbundenen Sauerstoffmangel entstehen anoxische, biophobe, aber vor allem reduzierende Verhältnisse. Auch Temperaturschwankungen können diese Vorgänge herbeiführen. Vulkan- ausbrüche und die damit ebenso austretenden mineralischen Lösungen stellen eine Ursache dafür dar. Eine marginale Erhöhung kann dann zum Zuwachs an Organismen führen, jedoch hat eine minimale Erhöhung oft schon katastrophale Auswirkungen. Die Lebewesen können sich nicht rasch genug anpassen und sterben ab. Ist der Meeresboden zusätzlich morphologisch gegliedert, erfolgt möglicherweise die Aufwärmung wesentlich rascher und stärker, da der natürliche Wasseraustausch weitgehend unterbunden ist. Unter derartig biophoben Bedingungen ist eine reichliche Entfaltung anaerober Bakterien denkbar, die aus dem Eiweiß der Organismen  $H_2S$  und  $NH_3$  entstehen lassen. Durch die Bildung von Ammoniak wird wiederum der pH-Wert des Meeres so beeinflusst, dass es zu verstärkter Karbonatfällungen kommen kann. Die nebenbei aufdringenden mineralisierten Hydrothermen können verschiedene Metalle wie Pb, Zn, Co und Cu, aber auch B mit sich bringen und in einer solchen Umgebung anreichern. Diese Metalle liegen heute in Sulfidform vor.

Die auf diese Art und Weise entstandenen Sapropelsedimente wurden in der weiteren Folge durch Metamorphoseprozesse zu kohlenstoffhaltigen Metasedimenten („Grafit-schiefer“) umgebildet. Der gefällte Karbonatschlamm verwandelte sich zu Kalkmarmoren, die submarinen Vulkanite bzw. Tuffe und Tuffite zu Amphiboliten. Eine solche Bildung vollzieht sich auch heutzutage im Schwarzen Meer. Somit werden auch alle Sedimentabfolgen, die unter solchen Umständen entstanden, als grafitführig bezeichnet.

### **5.2.3.2 Bergbauliche Aktivitäten**

Unter dem Titel „Der Grafitbergbau von Mühldorf in Niederösterreich“ bringt Hohn (2007) eine ausführliche Chronik zur Geschichte und Entwicklung des Grafitbergbaues speziell im Waldviertel. Daraus sind folgende Passagen zusammengefasst: Seit dem Beginn des 19. Jahrhunderts wurde eine Schürftätigkeit rund um Mühldorf bereits nachgewiesen. Während diese anfänglich mit etwa 10 t/a Rohgrafit begann, änderte sich die Tonnage mit der Jahrhundertwende und dem industriellen Fortschritt. In die Aufbereitung waren Stoßkolben, Schlammbecken, Plantrocken- und Schwefelöfen integriert. Heutzutage erinnert das noch erhaltene Aufbereitungsgebäude Nr. 1 an diese Zeit. Wie die Aufbereitung so revolutionierte

sich auch die Abbau- und Fördertechnik. Es fand eine Verlegung des Transports auf Gleise und aus Sicherheitsgründen der Einbau von Stollenzimmerungen statt. Das Gebirge wurde als außerordentlich standfest bezeichnet. Generell diente das im streichenden Stoßbau abgebaute Taubmaterial zur Verfüllung der Hohlräume. Das so gewonnene Trenninger Grafitlager hatte eine Mächtigkeit von 1–8 m und ließ über 350 m, bis es sich im Mühldorfer Marmor verlor. Die Verwendung als Gießereigrafit bescherte 1938 dem Bergbau, nach einem bisher mehr schlechtem als rechtem Geschäft, eine gute Auftragslage. Das Kriegsende brachte jedoch völligen Stillstand in Abbau und Aufbereitung, ehe man in kleinen Schritten den Betrieb wieder reorganisierte und in den 60er Jahren die Firma Mineralgesellschaft Pryssok & Co. KG rund um Mühldorf mit dem obertägigen Abbau begann. Nun erfolgte vorwiegend die Lieferung von Raffinade- und Mühlgrafit an die österreichischen Stahlerzeuger. Nach etwa 10 Jahren waren die „großen“ Vorräte aufgearbeitet und in den Folgejahren dienten weitere Lagerstätten zur Gewinnung von Grafit in kleinsten Mengen für die Erzeugung von Elektroden, Schmelzriegeln, Farbstoffen, etc. bis zur letzten Lieferung im Jahre 2000. Die rund um Mühldorf entstandene bergmännische Tätigkeit lässt sich am besten durch die Grubenfelder veranschaulichen (Abbildung 20). Weitere Standorte im Waldviertel weisen ähnliche Chronologien auf und machen die „Bunte Serie“ des Moldanubikums zum einem geschichtsträchtigen Bergbauegebiet.

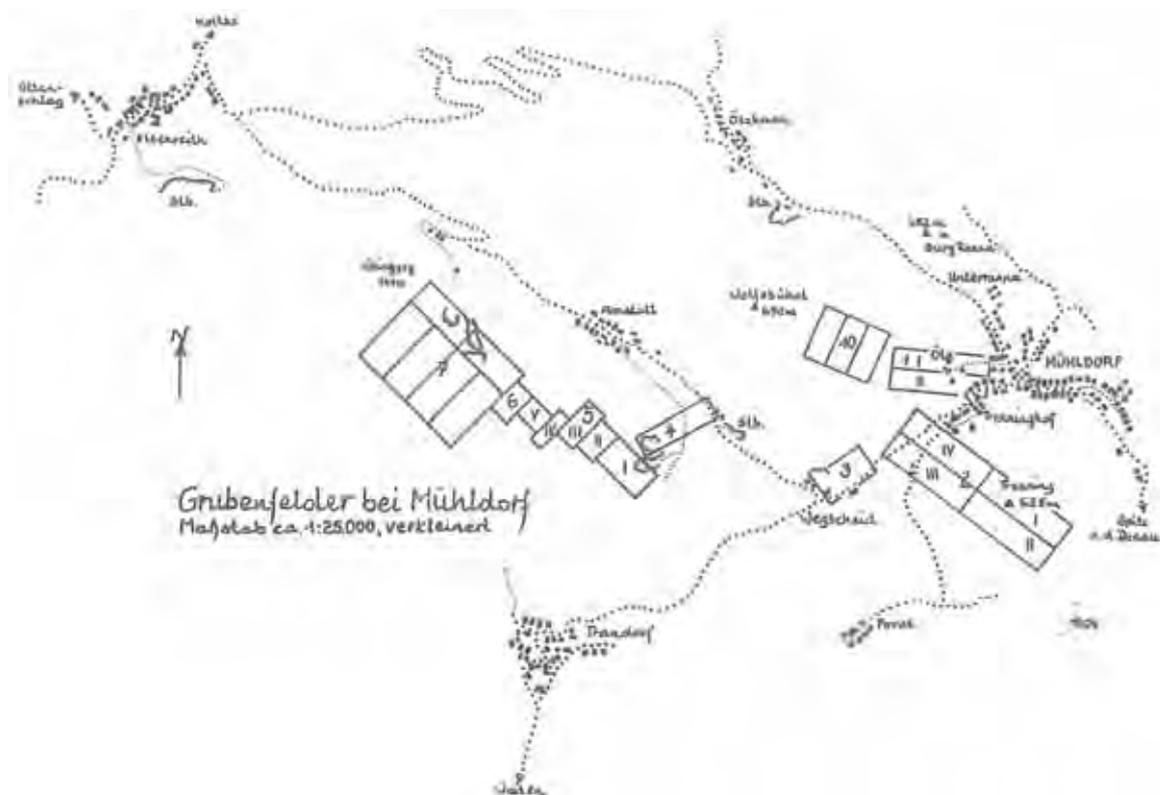


Abbildung 20: Grubenfelder bei Mühldorf [Hohn 2007]

### 5.2.3.3 Bergtechnische Parameter der Lagerstätte

Im Zuge dieser Arbeit wurden die acht erwähnten Rohstoffsicherungsgebiete aufgrund ihrer Ähnlichkeit gemeinsam bewertet und spezifische Eigenschaften, wie Lagerstätteninhalt, getrennt behandelt. Die mineralogische und chemische Zusammensetzung wird aufgrund der Ähnlichkeit von der ehem. Grafitlagerstätte Weinberg herangezogen.

**Teufe:** Die aktuellen, bekannten Grafitvorkommen im Waldviertel umfassen nur jene, die an der Oberfläche ausbeissen. Meist erstrecken sich diese nicht einmal weniger 10er-Meter in die Teufe. Es ist jedoch anzunehmen, dass diese Grafitlinsen auch in der Teufe der Drosendorfer Decke vorhanden sind, aber aufgrund der Unwirtschaftlichkeit dieser Vorkommen nie genauer prospektiert wurden.

Bewertung: oberflächennah, ausbeißend

Beurteilung: ++

**Lagerstättenform:** Die Lagerstättenkörper sind linsen- bis lagerförmige Tektonite, welche in eine Serie aus Paragneisen, Marmoren und Quarziten eingelagert sind. Die Ausdehnungen und Mächtigkeiten der Grafitkörper wechseln ebenfalls stark. Gewöhnlich beträgt die Länge der spindelförmigen Linsen zwischen 20 und 60 m, wobei Mächtigkeiten bis 12 m erreicht werden können.

Bewertung: verteilte Linsen mit wechselnden Mächtigkeiten

Beurteilung: -

**Hydrogeologie:** Den Aufzeichnungen bisheriger Bergwerksbetriebe sind keine Auffälligkeiten über die Wasserhaushaltung zu entnehmen.

Bewertung: keine Bewertung

Beurteilung: keine Beurteilung

**Gebirgseigenschaften:** Die Einlagerung der Grafitlinsen in die Nebengesteine wie Paragneis, Marmor und Quarzit spricht grundsätzlich für ein sehr standfestes Umgebungsgestein. Die Grafitlinsen selbst sind wie beschrieben [Hohn 2007] aufgrund ihrer Beschaffenheit ebenfalls standfest.

Bewertung: standfestes Gebirge

Beurteilung: +

**Wertstoffgehalt:** Die Literaturquellen liefern grundsätzlich ähnliche Angaben über den Kohlenstoff-Gehalt. Goldmann (2004) verweist auf bis zu über 70 % und Polegeg (1987) auf 30 bis maximal 60 % C-Gehalt in den Grafitlinsen.

Bewertung: sehr hohe Gehalte

Beurteilung: ++

**Wertstoffeigenschaften:** Flockengrafit ist für Hochtechnologieanwendungen besser geeignet als amorpher. Der „Waldviertler“ Grafit ist jedoch von wechselnden Lagen an Pyrit durchzogen und eng mit weiteren Mineralien (Quarz, Feldspat, etc.) verwachsen. Die Eigenschaften bezüglich der Aufbereitbarkeit sind im folgenden Kapitel erläutert.

Bewertung: keine Bewertung

Beurteilung: keine Beurteilung

**Aufbereitbarkeit:** Der „Waldviertler“ Grafit wurde meist als Hochofenzuschlag (Gießereigrafit) verwendet. Durch die feine Verwachsung mit Pyrit sind nur äußerst gute Lagerstättenpartien für Spezialanwendungen, wie für die Erzeugung von Elektroden oder Farbstoffen, tauglich. 2007 fand die Durchführung diesbezüglicher Aufbereitungsversuche an der Montanuniversität statt [Stadtschnitzer und Flachberger, 2007]. Die natürliche Hydrophobie macht den Grafit besonders für die Flotation geeignet. Die herkömmliche Aufbereitung (für Kohle) bediente sich der Klaubung sowie der Dichtesortierung und lässt sich mit Abwandlungen auf Grafit übertragen. Im Versuch wurden die angelieferten Grafitproben mittels Backenbrecher und Stabmühle zerkleinert. Anschließend erfolgte eine Schwimm-Sink-Analyse an der Korngrößenklasse 200/100 µm und ein Flotationsversuch an der Korngrößenklasse 40/0 µm. Die leichteste Dichteklasse der Korngrößenklasse 200/100 µm wies dabei immer noch einen Aschegehalt von 26 % auf. Nach dem Flotationsversuch zeigte sich in der Korngrößenklasse 40/0 µm ein beginnender Aufschluss, jedoch lag der Aschegehalt immer noch bei 22 %. Schlussendlich war eine Anreicherung per Dichtesortierung und Flotation im Labormaßstab möglich. Jedoch konnte wegen der engen Verwachsungen der Aschegehalt von 22 % nicht unterschritten werden [Stadtschnitzer und Flachberger 2007].

Polegeg et al. (1987) erwähnten, dass womöglich eine noch feinere Zerkleinerung ein besseres Aufschlussverhältnis und somit niedrigere Aschegehalte liefert. Als Alternative zur Nassaufbereitung weisen sie auf neue Möglichkeiten in der Trockenaufbereitung hin. Weiters könnten Herdarbeit und auch Laugungsverfahren in Betracht gezogen werden.

Bewertung: feinste Verwachsung, schwierige Aufbereitbarkeit

Beurteilung: -

**Zerkleinerungsverhalten:** Das Zerkleinerungsverhalten wird mit einem Rittinger-Koeffizient von 77,1 cm<sup>2</sup>/J angegeben.

Bewertung: keine Bewertung

Beurteilung: keine Beurteilung

**Mineralogische und chemische Zusammensetzung:** Polegeg et al. (1987) bezeichneten das Grafit-„Erz“ als eine Grafitbrekzie, wobei die Grafitkomponenten in einem Bindemittel aus Quarz, Feldspat, Tremolit und Glimmern eingebettet sind. Fast immer ist Pyrit in wechselnder, mitunter bedeutender Menge vorhanden. Wegen der ähnlichen Zusammensetzung wird im Folgenden jene vom ehemaligen Grafitlagerstätte Weinberg herangezogen, welche mit Vorbehalt repräsentativ ist für einen Großteil der restlichen Grafitvorkommen im Waldviertel.

Laut Pichlhöfer (1985) tritt der Grafit mikroskopisch als Flinz- und Kugelgrafit auf. Die Korngrößen der Flinze liegen zwischen 20 und 60 µm. Die weiteren Hauptgemengteile, welche hier auch als Bindemittel bezeichnet werden, sind Feldspat sowie teilweise Quarz. In den Feldspäten gibt es wiederum Grafiteneinschlüsse, die als Wertmineral jedoch uninteressant sind. Die Nebengemengteile umfassen Korund, Muskovit, Diopsid, Rutil und Turmalin. Die Tabelle 24 zeigt die chemische Zusammensetzung der Verbrennungsrückstände von insgesamt 21 verschiedenen Proben von Grafiten und Grafit-Gneisen.

Tabelle 24: Chemische Zusammensetzung des Weinberger Grafits im Waldviertel [Pichlhöfer 1985]

RxA [%]		RfA [%]	
FeO	7,47	Fe	5,82
MnO	0,02	Mn	0,012
MgO	0,54	Mg	0,33
K <sub>2</sub> O	2,51	K	2,08
Na <sub>2</sub> O	4,62	Na	3,42
CaO	1,61	Ca	1,15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,99	Al	5,81

Bewertung: siehe Aufbereikbaarheit

Beurteilung: keine Beurteilung

**Wertstoffmenge:** Polegeg et al. (1987) veranschlagten folgende Vorräte (Tabelle 25) für die von ihm ernannten Rohstoffsicherungsgebiete.

Tabelle 25: Grafitvorräte im Waldviertel [Polegeg et al. 1987]

Voitsau	50.000 t angedeutet
Wurschenaigen	50.000 t angedeutet
Röhrenbach	14.000 t sichtbar und 50.000 wahrscheinlich.
St. Marein-Dappach	1.500 t nachgewiesen, 2.000 t wahrscheinlich, 10.000 t angedeutet
Rothweinsdorf	1.000 t angedeutet
Ranzles, Grafit-Hütte	Keine Angaben
Unterthumeritz	Keine Angaben
Rabesreith-Nonndorf	1.000 t angedeutet

Bewertung: Reserven vorhanden

Beurteilung: +/-

**Lage und Infrastruktur:** Die österreichischen Grafitlagerstätten der Böhmisches Masse befinden sich größtenteils im Waldviertel, ein paar sind auch südlich der Donau, im Alpenvorland angesiedelt. Die hohe Straßendichte in diesem Gebiet macht die Lagerstätten gut zugänglich. Welche nicht an asphaltierten Straßen liegen, können auf ebenem Gelände bzw. über Schotterstraßen erreicht werden. Die Strom und Wasserversorgung ist an die Siedlungsgebiete gebunden, welche sich meist in absehbarer Nähe befinden. Nicht nutzbare Vorräte liegen meist zu nah an Siedlungsgebieten und lassen sich somit nicht nutzen. Die Lagerstätte Weinberg lag im Naturschutzgebiet Wachau, worauf auch bei anderen Vorkommen Bedacht zu nehmen ist. Ein Konfliktpotenzial der Rohstoffsicherungsgebiete besteht zum Großteil mit landwirtschaftlichen Nutzflächen.

Bewertung: gut zugänglich, stark besiedelt

Beurteilung: +

**Schurf-/Bergbauberechtigungen:** Rund um Mühldorf (Trandorf) besteht teilweise noch die Bergbauberechtigung der Firma „Grafitbergbau Mühldorf Mörth“. Weitere Berechtigungen im Waldviertel sind nach Bedarf zu klären.

Abschließend fasst die Tabelle 26 nochmals die wesentlichen Parameter zusammen.

Tabelle 26: Übersicht von den bergtechnischen Parametern für die Grafitvorkommen der „Bunten Serie“, Waldviertel, Niederösterreich

Bergtechnische Charakterisierung		Quantifiziert	Bewertung	Beurteilung*	Bauwürdigkeit
<b>Standort</b>	Lage und Infrastruktur	Ja	Gut zugänglich, teilweise stark besiedelt	+	Derzeit nicht bauwürdig! Konzentration von ausreichend mächtigen Linsen in geeigneter Lage notwendig, Aufbereitungsaufwand sehr hoch
<b>Lagerstättenbonität</b>	Teufe	Ja	An der Oberfläche	++	
	Lagerstättenform	Ja	Linsen mit unterschiedlichen Mächtigkeiten	+/-	
	Hydrogeologie	Ja	-		
	Gebirgseigenschaften	Ja	Standfestes Gebirge	+	
<b>Lagerstättenqualität</b>	Wertstoffgehalt	Ja	Sehr hoch	++	
	Wertstoffeigenschaften	Ja	-		
	Aufbereitbarkeit	Bedingt	Feinste Verwachsung, womöglich nur mit enormen Aufwand trennbar	--	
	Zerkleinerungsverhalten	Ja			
Mineralogie und Petrologie	Ja				
<b>Lagerstättenquantität</b>	Wertstoffmenge	-	Vorkommen mit > 10.000 t über das gesamte Waldviertel verteilt	+	

\* Beurteilungsschema: von abbaufördernd “++” bis abbauhindernd “--”

## 5.2.4 Ehemalige Grafitlagerstätte Sunk bei Trieben, Veitscher Decke, Grauwackenzone, Steiermark

Die Grafitlagerstätte Sunk liegt etwa 3 km südlich von Trieben (Steiermark), westlich des Triebentals am Eingang des Sunkgrabens (Abbildung 21, gelb-roter Stern).

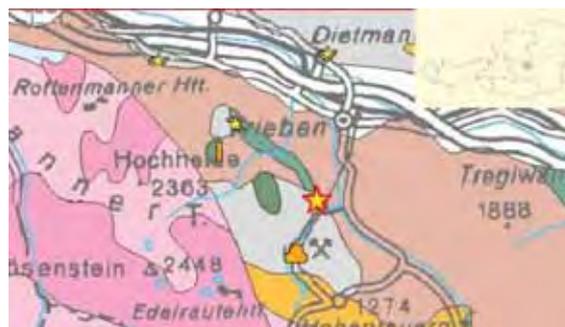


Abbildung 21: Geologische Übersicht des Grafitvorkommens Sunk [GBA 2005/2009]

### 5.2.4.1 Geologie

Geologisch wird die Lagerstätte entsprechend Tabelle 27 eingegliedert.

Tabelle 27: Allgemeine geologische Angaben zu Sunk bei Trieben [GBA 2005/2009]

<b>Vorkommen</b>	Sunk/Trieben
<b>Rohstoffe</b>	Grafit
<b>Wertstoffe</b>	Grafit
<b>Metallogenetischer Bezirk</b>	Grafitbezirk Veitscher Decke
<b>Tektonik</b>	Veitscher Decke
<b>Großeinheit</b>	Ostalpen
<b>Tektonik I</b>	Ostalpines Paläozoikum
<b>Tektonik II</b>	Östliche Grauwackenzone
<b>Bemerkung</b>	Längserstreckung des Bergbaues über 1.500 Meter

Nach Mathias und Budin (1954) umfasst das Grafitvorkommen mehrere Grafitflöze, die einheitlich etwa NW und nach SW einfallen. Lagerstättenkundlich zählt dieses zu einer Reihe von regionalmetamorphen Grafitvorkommen in der nördlichen Grauwackenzone karbonischen Alters, die zwischen Semmering und Rottenmann liegen.

Nach Peer (1980) bzw. Tollmann (1977) liegt das Grafitvorkommen Sunk in oberkarbonen Sedimenten, die als limnische Molasseablagerungen gedeutet werden. Aufgrund von Pflanzenfunden aus diesem detritischen Oberkarbon ließ sich das Alter des Grafitvorkommens ins Westfal einstufen. Die oberkarbonen Sedimente im Lagerstättenbereich bestehen hauptsächlich aus Quarzkonglomeraten neben feinkörnigen Sandsteinen, dunkelgrauen-schwarzen, siltigen, glimmerigen Tonschiefern sowie grafitführenden Tonschiefern. Im NE wird das Grafitvorkommen von einem Grünschieferzug begrenzt, dem sich Serizitphylliten unterlagern. Die gesamte Tektonik im Bereich der Lagerstätte ist sehr komplex, nähere Details beschrieb Peer (1980).

### 5.2.4.2 Bergbauliche Aktivitäten

Nach Klar (1964) wurde die Grafitlagerstätte Sunk erstmals durch Prof. Albert Miller von Haunfels in seiner Bauwürdigkeit erkannt und mit der Verleihung des Ida-Grubenfeldes im Jahre 1871 begann in Sunk-Hohentauern die Bergbautätigkeit auf Grafit. Der Grafitbergbau war durchgehend von diesem Zeitpunkt an bis in die 1990er Jahre in Betrieb. Die Abbauvorrückung erfolgte auf den einzelnen Sohlen durch streichende Strecken, die in der Lagerstätte aufgeföhren wurden. Die Verbindung der Sohlen untereinander erfolgte durch Überhauen im Grafit, die mehr oder minder im Einfallen der Lagerstätte verliefen. Das Abbauföhren war ein streichender Strebbruchbau mit fallendem Verhieb. Die Eigenart der Lagerstätte bedingte dabei eine besondere Methode des Strebaubaus, die es praktisch nur

erlaubte, Flöze von mehr als 1 m Mächtigkeit abzubauen. Die Bauwürdigkeitsgrenze lag daher im Bergbau Sunk bei etwa 1 m Flözmächtigkeit [Mathias und Budin 1954].

Nach Mitterer (1988) stellte sich die Abbausituation in den 1980er Jahren folgendermaßen dar: Die damals gebaute Lagerstätte wurde durch den Hildastollen aufgeschlossen, dessen Mundloch sich ca. 90 m über der Talsohle am Nordhang des Sunkgrabens befand. Das Grubengebäude lag etwa 600 m nordwestlich vom Mundloch des Hildastollens im Thorsailer-schachtbereich. Damals erfolgte der Bau zweier Lager mit einer querschlägigen Entfernung von rund 40 m. Entsprechend der Höhenlage wurden diese bezogen auf die Grundstrecke als Unterwerksbau und Oberwerksbau bezeichnet. Für die Ausrichtung diente eine Unterteilung der Lagerstätte in Sohlen mit einem Sohlenabstand von 19–25 m. Drei Sohlen erschlossen den Unterwerksbau, die im Unterwerksbau durch Gesenke, im Oberwerksbau durch Aufhauen miteinander verbunden waren. Die Verbindungen zwischen den einzelnen Sohlen verliefen mehr oder weniger im Einfallen der Lagerstätte. Für die Abbauvorrichtung wurde die Lagerstätte zwischen den Sohlen in Scheiben von 2,3 m Höhe unterteilt. Auf diesen erfolgte der Abbau durch Auffahren von streichenden Strecken in die steilstehende Lagerstätte. Die Abbauverfahren waren einerseits ein Scheibenbruchbau mit streichendem bzw. querschlägigen Verhieb, andererseits eine Scheibenversatzbau mit fallendem Verhieb, der dort Anwendung fand, wo darüber liegende Grubenbaue geschützt oder offengehalten werden mussten. Die Gewinnung des Grafites erforderte einen selektiven Abbau nach C-Gehalt und wurde mit dem Abbauhammer durchgeführt. Durchörterungen von Taublagen erfolgten mit Bohr- und Schießarbeit. Als Ausbaumaterial fand in der Grube hauptsächlich Holz Verwendung, das sich bei den damaligen betrieblichen Verhältnissen optimal dem sehr wechselnden Gebirge anpasste. Der Abtransport des gewonnenen Grafits erfolgte mit sogenannten Schweifhunten händisch und anschließend auf der Hildagrundstrecke mit einer Diesellokomotive.

#### **5.2.4.3 Bergtechnische Parameter der Lagerstätte**

**Teufe:** Die Grafitflöze beißen am „Liften“ auf knapp 1.300 m aus. Das Talniveau im Sunkgraben befindet sich auf 970 m. Auf 1.045 m wurde bisher maximal abgeteuft. Das heißt, die Grafitvorräte befinden sich unter 1.045 m.

Bewertung: 250 m Überlagerung, Reserven jedoch auf Talniveau

Beurteilung: +

**Lagerstättenform:** Der Höhenrücken des „Liften“ bildet die Faltenachse des überkippten Karbon. Entlang dieser Achse fallen die Grafitflöze flach ein und versteilen sich entlang des SW-Schenkels. Eine weitere Besonderheit der Flöze ist die Blattverschiebung wie auf der Karte zu sehen ist (Abbildung 22).



Abbildung 22: Übersichtskarte vom Bergbau Sunk [Mitterer 1988]

Im Allgemeinen sind sie tektonisch sehr beansprucht und breiten sich wellenähnlich aus (Abbildung 23). Laut den Aufzeichnungen von Mathias und Budin (1954) haben die Flöze ein Generalstreichen von  $120^\circ$  und fallen mit  $30$  bis  $80^\circ$  nach SW ein. Ihr Abstand beträgt in querschlägiger Richtung  $20$  bis  $30$  m. Die Bauwürdigkeitsgrenze umschließt in beiden Flözen eine im Streichen gestreckte, nach NW zu langsam einsinkende Grafitlinse von  $150$ – $200$  m größter streichender Länge,  $30$  bis  $50$  m größter flacher Höhe und  $1,5$  m mittlerer Mächtigkeit. Das Einfallen zwischen  $30$  bis  $80^\circ$  ist damit zu erklären, dass die heutzutage auch als Grafitflöze bezeichneten Grafitlinsen nach SW in die Teufe hin übersteilen (Abbildung 23).

Bewertung: geringe Mächtigkeit, tektonisch stark beansprucht

Beurteilung: -+

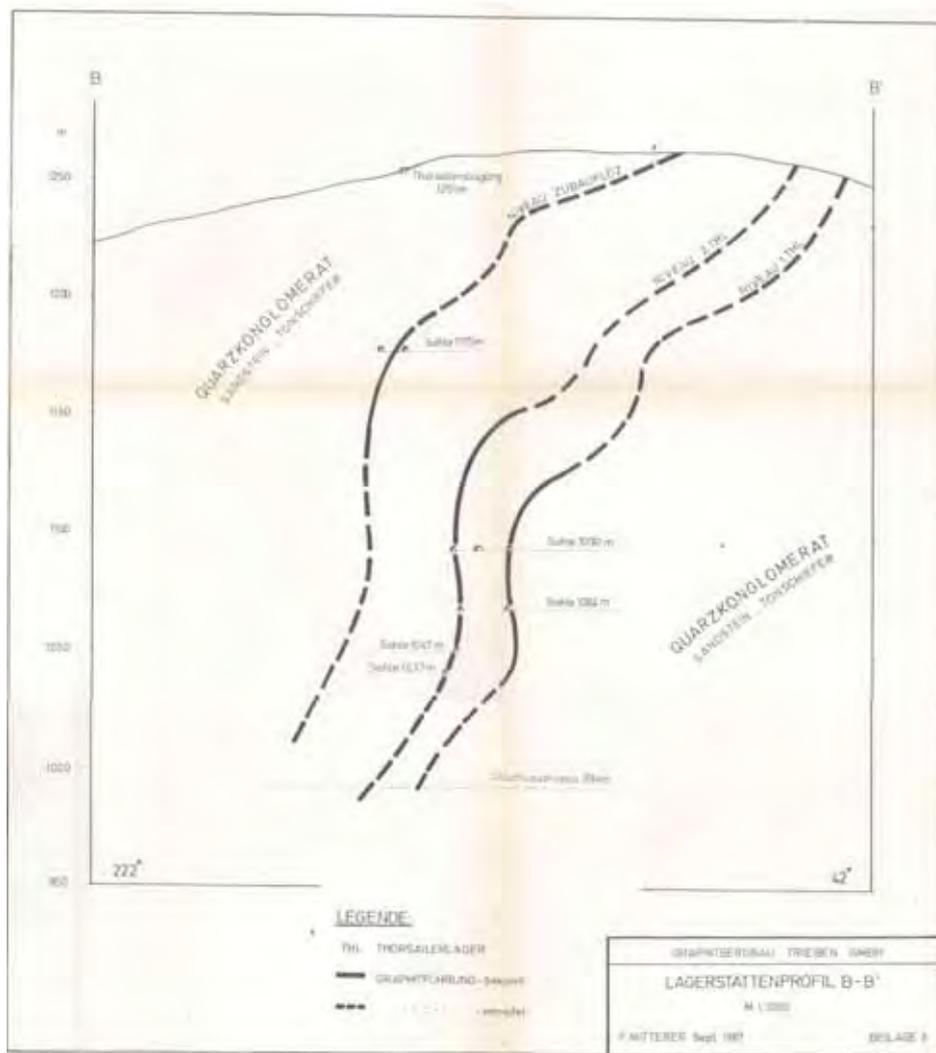


Abbildung 23: B-B Schnitt durch die Grafitflöze [Mitterer 1988]

**Hydrogeologie:** Aufgrund der Klüftung und tektonischen Beanspruchung des Gebirges durch den nunmehr stillgelegten Bergbau, wie auch geologisch bedingt, setzen der Grube Wässer zu. Gemäß der bisherigen Dokumentation sind diese Wassermengen mittels Pumpaufwand und hydraulischem Gefälle abgeleitet worden.

Bewertung: wasserführend

Beurteilung: +/-

**Gebirgseigenschaften:** Grundsätzlich lässt sich das Gebirge der Sunker Lagerstätte als sehr standfest einstufen. Eine Ausnahme bildet jedoch die Gangart. Hier sind Hart- und Weichgraphit miteinander vermengt. Die Lithographie von Kernbohrungen zeigt, dass der Grafit an Tonschieferbänke gebunden ist. Die in Verbindung damit auftretenden Konglomeratbänke haben sich als sehr standfest erwiesen. Ebenso die Mylonitzonen, die bis zu 4 m mächtig sind (Gebirgsgüteklasse 1). Einzig die Serizitphyllite bzw. Tonschiefer weisen keine Standfestigkeit auf (Gebirgsgüteklasse 4, Vgl. Mitterer 1988).

Bewertung: standfestes Gebirge mit Schwächezonen

Beurteilung: +

**Wertstoffgehalt:** Beim Grafit der Lagerstätte Sunk lassen sich nun anstehend und im Handstück deutlich zwei Qualitäten mit einem Glühverlust von ungefähr 60 bzw. 80 % unterscheiden. Die harten, silbergrauen, gut geschichteten und eckig brechenden Grafite sind hochprozentig, während die weicheren, tiefschwarzen, blättrigen oder erdigen Stücke den geringeren Kohlenstoffgehalt aufweisen. Laut Mathias und Budin (1954) gibt es keine Veränderungen des Grafits im Streichen der Lagerstätte oder mit wachsender Teufe. In den Flözprofilen ist auffallend, dass Hart- und Weichgrazit eng miteinander verknetet sind.

Bewertung: sehr hoher Wertstoffgehalt

Beurteilung: ++

**Wertstoffeigenschaften:** Der im Sunk auftretende Grafit ist mikrokristallin und wird somit umgangsgemäß als amorph bezeichnet, was aufgrund der kristallinen Ausprägung nicht richtig ist. „Amorphe Grafite“ sind für Hochtechnologieanwendungen schlechter geeignet als makrokristalline („Flockengrafite“). Die Lagerstätte liefert qualitativ hochwertige und reine mikrokristalline Grafite.

**Aufbereitbarkeit:** In den letzten Betriebsjahren des Bergbau Sunk wurde das Material nach Kaisersberg geliefert und dort aufbereitet. Diese Aufbereitungsanlage ist nach wie vor in Betrieb und liefert Informationen über den Vorgang. Die Grafitaufbereitung (Abbildung 24) teilt sich in die Zerkleinerung und anschließende Flotation für hochreine Grafite auf.

Bewertung: aufbereitbar

Beurteilung: ++

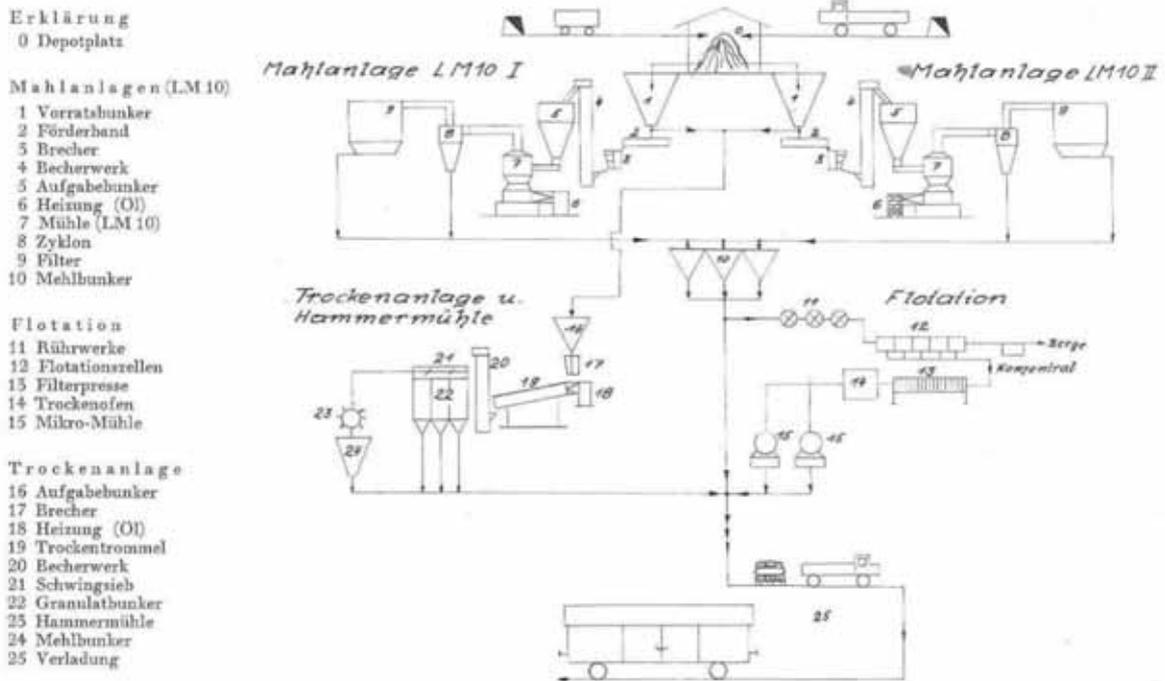


Abbildung 24: Aufbereitung steirischer Grafite [Klar 1964]

**Zerkleinerungsverhalten:** Die Vermengung von harten, silbergrauen, gut geschichteten und eckig brechenden Grafiten mit weicheren, tiefschwarzen, blättrigen oder erdigen Stücken deutet eindeutig auf gemischtes Bruchverhalten hin. Es lässt sich daraus aber auch schließen, dass mit wenig Energieeintrag eine gute Zerkleinerung zu erzielen ist. Die weichen schmierenden Bestandteile vergeben dem Graphit durchaus plastisches Verhalten. Andererseits sind die Lücken zwischen den Hartgraphitteilchen mit Quarz ausgefüllt.

Bewertung: siehe Aufbereitbarkeit

Beurteilung: keine Beurteilung

**Mineralogische und chemische Zusammensetzung:** Nach Peer (1980) sind im Bereich der Grafitlagerstätte Sunk oberkarbone Sedimente aufgeschlossen, die zum überwiegenden Teil aus Quarzkonglomeraten neben feinkörnigen Sandsteinen, dunkelgrauen-schwarzen, siltigen, glimmerigen Tonschiefern und grafitführenden Tonschiefern bestehen. Die Quarzkonglomerate, mit Gerölldurchmessern von 2 mm bis 7 cm und sehr guten Zurundungsgrad, zeigen Übergänge zu feinkörnigem, muskovitführendem Sandstein und lassen sich von diesem stellenweise nicht klar abgrenzen. Die Quarzkonglomerate sind im gesamten Lagerstättenbereich tektonisch stark zertrümmert und mit zahlreichen Mylonitzonen mit Mächtigkeiten von bis zu 40 cm durchsetzt. In tektonisch stark beanspruchten Zonen zeigen die Quarzgerölle Auslängungen und das Sandsteinbindemittel eine Umprägung zu glimmerigen Serizitphylliten. Die dunkelgrauen bis schwarzen Tonschiefer weisen detritäre, eingeschwemmte, siltige Muskovitschüppchen und feinsandige Verunreinigungen auf, mit Über-

gängen zu Phylliten in den Scherzonen. Die Tonschiefer besitzen fast immer grafitisches Pigment und färben entsprechend ab.

Laut Mathias und Budin (1954) setzt sich der Hartgrafit aus Bruchstücken reinen Grafites zusammen, wobei die Lücken dazwischen mit Quarz ausgefüllt sind. Im Gegensatz dazu zeigt der Weichgrafit primäre Wechsellagerungen von Grafit mit tonigen Schichten. Hart- und Weichgrafit haben einen geringen Gehalt an Schwefelkies gemeinsam. Weiters führt der Sunker Grafit wechselnde Mengen von hochinkohltem Anthrazit. Die in Sunk selektiv gewonnenen Grafite mit 40 bis über 80 % Kohlenstoffgehalt weisen die in Tabelle 28 gezeigte Immediatzusammensetzung auf.

Tabelle 28: Immediatzusammensetzung [Gew.-%] der Lagerstätte Sunk [Mathias und Budin 1954]

<b>Probe</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Feuchtigkeit</b>	0,87	0,90	0,90
<b>Asche</b>	39,81	34,67	20,97
<b>Grafit und Asche</b>	96,57	96,80	97,49
<b>Flüchtige Bestandteile</b>	2,56	2,30	1,61
<b>Verbrennlicher Schwefel</b>	0,49	0,50	0,69

Bewertung: siehe Aufbereikbaarkeit

Beurteilung: keine Beurteilung

**Wertstoffmenge:** Für das 1. und 2. Thorsailerlager wurden bereits Prognosen vom Niveau 1.034 bis 994 m für wahrscheinliche Lagerstättenvorräte erstellt. Das Zubaufloz fand dabei keine Berücksichtigung und könnte unter zusätzlichem Aufwand und genaueren Informationen über die Lage auch noch einbezogen werden. Mitterer (1988) stellte bereits Annahmen über die Lagerstätte und ihre Ausdehnungen im Zuge einer geplanten Abteufung auf. Die bekannte durchschnittliche Flözmächtigkeit beträgt 2 m und die Dichte von Grafit 2,2 t/m<sup>3</sup>. Das 1. Thorsailerlager fällt bei dieser Annahme mit 80° ein und streicht über eine Länge von 150 m. Das 2. Thorsailerlager fällt durchschnittlich mit 45° ein und streicht auch über 147 m. Somit ergibt sich ein Lagerstätteninhalt von 65.000 t an Grafit.

Bewertung: vermutete Reserven

Beurteilung: --

**Lage und Infrastruktur:** Der Sunkgraben befindet sich auf 1.000 m Seehöhe und ist über die B114 1,5 km nach Trieben zu erreichen. Die Lagerstätte erstreckt sich bis auf 1.300 m entlang des Hanges des sogenannten „Liften“. Der Sunkgraben selbst lässt sich über eine gut ausgebaute Schotterstraße bis auf den Gipfel des „Liften“ befahren. Unwetter machen

jedoch die Straße von Zeit zu Zeit unbefahrbar. Strom und Wasserversorgung (Sunkbach) sind bis in den Graben (E-Werk bei der Abzweigung) vorhanden. Das Gebiet wird rein forstwirtschaftlich genutzt. Ein Alptourismus liegt hier vermutlich nur geringfügig ausgeprägt vor.

Bewertung: zugänglich, jedoch Naturgewalten

Beurteilung: +/-

**Schurf-/Bergbauberechtigungen:** Die Firma Grafitbergbau Kaisersberg GmbH ist Inhaber der Bergbauberechtigungen für das Gebiet des ehemaligen Grafitbergbaus Sunk (Peer 2012 mündliche Mitteilung).

Abschließend fasst die Tabelle 29 nochmals die wesentlichen Parameter zusammen.

Tabelle 29: Übersicht von den bergtechnischen Parametern für die Grafitvorkommen Sunk, Steiermark

Bergtechnische Charakterisierung		Quantifiziert	Bewertung	Beurteilung*	Bauwürdigkeit
<b>Standort</b>	Lage und Infrastruktur	Ja	Zugänglich, mit Naturgewalten ist zu rechnen	+/-	Derzeit nicht bauwürdig! Exploration zur Bestätigung der Fortsetzung der Flöze in die Tiefe notwendig
<b>Lagerstättenbonität</b>	Teufe	Ja	250 m Überlagerung, jedoch von Talniveau erreichbar	+	
	Lagerstättenform	Ja	Grafitflöze mit 1,5 m Mächtigkeit	+/-	
	Hydrogeologie	Ja	Wasserführend	+/-	
	Gebirgseigenschaften	Ja	Grundsätzlich standfest	+	
<b>Lagerstättenqualität</b>	Wertstoffgehalt	Ja	Sehr hoch	++	
	Wertstoffeigenschaften	Ja	-		
	Aufbereitbarkeit	Ja	Aufbereitbar	++	
	Zerkleinerungsverhalten	Ja			
	Mineralogie und Petrologie	Ja			
<b>Lagerstättenquantität</b>	Wertstoffmenge	Ja	Ausreichende Menge vermutet, jedoch nicht verifiziert	--	

\* Beurteilungsschema: von abbaufördernd “++” bis abbauhindernd “--“

## 5.3 „Deposit-to-Mill“-Konzepte – Bergbauplanungskonzepte ausgewählter Mineralrohstoffvorkommen in Österreich

Wie bereits in Kapitel 5.2 analysiert wurde, ist derzeit keiner der vier Standorte abbauwürdig. Die nachfolgenden „Deposit-to-Mill“-Konzepte beziehen sich ausschließlich auf vorhandene Daten aus der bestehenden Literatur und können nur einen ganz groben Überblick von möglichen Gewinnungsszenarien geben. Somit werden hier nur mögliche bergmännische Vorgehensweisen hypothetisch dargestellt. Für eine detaillierte Bergbauplanung wären umfangreiche Explorationsarbeiten notwendig, die in einem fundierten Lagerstättenmodell resultieren, welches die Grundlage für die Bergbauplanung bildet.

### 5.3.1 Wolframvorkommen Hochrast/Gumriaul und Taffinalpe, Thurntaler Quarzphyllitzone, Osttirol

Nachfolgend erfolgt unter den Rahmenbedingungen die Darstellung der wirtschaftlichen Gegebenheiten und des Bergrechts während im Bereich des Bergbauplanungskonzepts Anmerkungen zur Abbaumethode und Aufbereitung angeführt sind.

#### 5.3.1.1 Rahmenbedingungen

Der Preis für  $WO_3$  liegt derzeit bei 310 USD/t (230 EUR/t) [Mineral Prices]. Für reines Wolfram existiert grundsätzlich kein handelbarer Preis. Es wird Ammoniumparawolfram als Zwischenprodukt gehandelt. Der Preis dafür liegt bei 320 USD/mtu. Das entspricht derzeit rund 25.000 EUR/t (Metal Pages). Die überschlagsmäßige Kalkulation (Tabelle 30) bezieht sich hier ausschließlich auf die Kubaturen des Versuchsstollens Taffinalpe, daher sind die Zahlen äußerst gering. Für die gesamten Vorkommen im Bereich Hochrast-Gumriaul lassen sich zurzeit keine Abschätzungen treffen.

Tabelle 30: Überschlagsmäßige Kalkulation der Kubaturen des Versuchsstollens Taffinalpe

Position	Berechnung	Betrag [€]
Auffahrung, Abbaukosten, Transportkosten		
Aufbereitungskosten		
Ertrag	20 t · 230 €/t	4.600
<b>Gewinn/Verlust</b>		

Das Mineralrohstoffgesetz (MinroG) zählt Wolfram zu den „bergfreien“ mineralischen Rohstoffen. Das Eigentumsrecht an Grund und Boden erstreckt sich nicht darauf, sondern diese gehen mit der Aneignung in das Eigentum des hierzu Berechtigten über. Es ist naheliegend,

dass die Schurfberechtigungen bei der Wolfram Bergbau und Hütten AG liegen. Eine Auskunft darüber wurde von der zuständigen Behörde nicht erteilt. Eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) ist mit der Option eines Untertagebaus und einer Ausdehnung der obertägigen Anlagen von nicht mehr als 10 ha nicht erforderlich.

Die detaillierte bergtechnische Charakterisierung erfolgte im Kapitel 5.2.1. Demnach wird dieses Scheelitvorkommen als derzeit nicht bauwürdig eingeschätzt.

### **5.3.1.2 Bergbauplanungskonzept**

Ein Vorschlag für eine Abbaumethode kann hier kaum gegeben werden. Die im Erkundungsstollen Taffinalpe aufgefahrenen Lagerstättenkörper sind ausbeißende Prasinitleinseln, in denen die Scheelitvererzung liegt. Über die Ausdehnung sowie die Erstreckung in der Teufe gibt es keine gesicherten Aussagen. Ebenso sind die bisher bekannten Reserven von gut 20 t  $WO_3$  äußerst gering. Aus der Sicht der zur Verfügung stehenden Informationen könnte sowohl ein obertägiger als auch untertägiger Kleinbergbau in Frage kommen.

Eine Brechanlage und die Vorabscheidung könnte direkt vor Ort in Innervillgraten installiert werden. Die Aufbereitung selbst ließe sich mit den vorhandenen Anlagen der Wolfram Bergbau und Hütten AG in Mittersill durchführen. Die Distanz von Innervillgraten nach Mittersill beträgt 100 km und ist verkehrstechnisch gut erschlossen.

### **5.3.2 Ehemalige Antimonlagerstätte Rabant/Gurskerkammer, Kreuzeckgruppe, Ostalpines Kristallin, Kärnten, Osttirol**

Nachfolgend erfolgt unter den Rahmenbedingungen die Darstellung der wirtschaftlichen Gegebenheiten und des Bergrechts, während im Bereich des Bergbauplanungskonzepts Anmerkungen zur Abbaumethode und Aufbereitung angeführt sind.

#### **5.3.2.1 Rahmenbedingungen**

Der internationale Antimonitpreis (99,65 % Sb, CIF USPort) liegt derzeit bei 5 USD/lb. Das entspricht ca. 8.000 EUR/t [Metal Price]. Die internationale Handelsklausel CIF USPort bedeutet, dass Kosten, Versicherung und Fracht bis zum Bestimmungshafen (in diesem Fall USA) vom Versender getragen wird bzw. sich das Gut bis dahin in seinem Besitz befindet. Bei der Berechnung in Tabelle 31 handelt es sich um eine generelle Abschätzung des Ertrages bei den derzeitigen Preisen. Die Auffahrung-, Abbau-, Aufbereitungs- und Transportkosten sind je nach Lagerstätte individuell, aus einer umsichtigen Planung, zu kalkulieren.

Tabelle 31: Überslagsmäßige Berechnung für das Antimonvorkommen Rabant

Position	Berechnung	Betrag [€]
Auffahrung, Abbaukosten, Transportkosten		
Aufbereitungskosten		
Ertrag	$(10.440 \text{ t} + 2.560 \text{ t}) \cdot 0,72 \cdot 8.000 \text{ €/t}$	74.880.000
<b>Gewinn/Verlust</b>		

Das Mineralrohstoffgesetz (MinroG) zählt Antimon zu den „bergfreien“ mineralischen Rohstoffen. Das Eigentumsrecht an Grund und Boden erstreckt sich nicht darauf, sondern diese gehen mit der Aneignung in das Eigentum des hierzu Berechtigten über. Die Schurfberechtigung des genannten Gebietes befand sich zuletzt in den Händen der BBU (Bleiberger Bergwerksunion), welche in den 90er-Jahren Konkurs anmeldete und anschließend liquidiert wurde. Eine UVP ist mit der Option eines Untertagebaus und einer Ausdehnung der ober-tägigen Anlagen von nicht mehr als 10 ha nicht erforderlich.

Die detaillierte bergtechnische Charakterisierung erfolgte im Kapitel 5.2.2. Demnach wird dieses Antimonitvorkommen als derzeit nicht bauwürdig eingeschätzt.

### 5.3.2.2 Bergbauplanungskonzept

Die bisherige Abbaumethode in den ehemaligen Bergbauen der Rabantserie ist mit den heutigen Methoden nicht zu beschreiben. Der Abbauvorgang wurde einfach gehalten. Die langfristige Planung stand eher im Hintergrund und behördliche Vorgaben waren aufgrund der damaligen Zwangslage (1940er-Jahre) kaum vorhanden. Man versuchte also so schnell wie möglich die reichsten Lagerstättenpartien anzufahren und abzubauen. Prognosen und Analogien zur Lagerstättenfortsetzung erstellte man mittels bereits abgebauter Lagerstättenbereiche. Somit wurden angefahrene Reicherzonen solange verfolgt bis sie augenscheinlich ausdünnten und im Bedarfsfall neue Reicherzonen gesucht. Der Ausbau der dafür benötigten Strecken erfolgte wegen der schlechten, stark wasserführenden Gebirgsverhältnisse so gut als möglich. Nach einiger Zeit ließen sich auch so Rückschlüsse auf die Fortsetzung der Lagerstätte ziehen und modellhafte Annahmen treffen, welche wiederum eine mittelfristige Abbauplanung ermöglichten. Viele Charakteristika dieser Lagerstätte schließen die meisten Abbauverfahren für eine Wiederauffahrung von vornherein aus und ermöglichen, wenn überhaupt, einen Sohlenstoßbau:

- Schlechte, stark wasserführende Gebirgsverhältnisse
- Zwei (evtl. drei) unregelmäßige Reicherzonen mit 1–2 m Mächtigkeit im Abstand von 10 m
- Mittelsteiles Einfallen mit 50–70°

Dabei stellte sich die Frage, ob die Imprägnationsvererzungen zwischen den Reicherzonen gewinnbringend mit abgebaut werden könnten. Die einzige sinnvolle Möglichkeit zur Auffahrung der Lagerstätte Rabant ist eine Unterfahrung vom Drautal aus (ca. 800 m), welche größtenteils im Triasdolomit angesiedelt wäre (vgl. Weber 1982).

Eine Aufbereitungsanlage wäre für diesen Standort komplett neu zu konzipieren. Bei einer Unterfahrung der Lagerstätte könnte diese im Drautal angesiedelt werden. Die notwendige Infrastruktur ist dafür vorhanden, wobei raumplanerische Aspekte zu berücksichtigen sind. Halden ließen sich aufgrund der Versatzfähigkeit vermeiden bzw. gering halten. Durch die sehr feingliedrige Verwachsung des Antimonits mit Arsenkies ist die Aufbereitung ein wesentliches Kriterium. Die zuletzt an der Montanuniversität Leoben durchgeführten Aufbereitungsversuche waren hinsichtlich des verbliebenen Arsengehaltes im Aufbereitungsgut nicht erfolgreich (vgl. Kapitel 5.2.2.3).

### 5.3.3 Ehem. Grafitlagerstätten und -vorkommen in der Böhmisches Masse (Moldanubikum), Niederösterreich

Nachfolgend werden unter den Rahmenbedingungen die Darstellung der wirtschaftlichen Gegebenheiten und des Bergrechts erläutert, während im Bereich des Bergbauplanungskonzepts Anmerkungen zur Abbaumethode und Aufbereitung angeführt sind.

#### 5.3.3.1 Rahmenbedingungen

Das untere Preislimit für Flockengrafit mit den Spezifikationen 85–87 % C, +100 mesh -80 mesh, FCL, CIF EUROPE Port beträgt 900 USD/t bzw. ca. 670 EUR/t [Industrial Minerals]. Hierbei handelt es sich um eine geringwertige Grafitqualität. Für bessere Qualitäten lassen sich mehr als die doppelten Preise erzielen. Bei der Berechnung in Tabelle 32 liegt eine generelle Abschätzung des Ertrages bei den derzeitigen Preisen vor. Die Kalkulation wird auf Basis der vorhandenen Grafitlinsen um Röhrenbach durchgeführt. Die Auffahrung-, Abbau-, Aufbereitungs- und Transportkosten sind je nach Lagerstätte individuell, aus einer umsichtigen Planung, zu kalkulieren.

Tabelle 32: Überslagsmäßige Kalkulation für das Grafitvorkommen Röhrenbach

Position	Berechnung	Betrag [€]
Auffahrung, Abbaukosten, Transportkosten		
Aufbereitungskosten		
Ertrag	(54.000 t · 670 €/t)	36.180.000
<b>Gewinn/Verlust</b>		

Das Mineralrohstoffgesetz (MinroG) zählt Grafit zu den „bergfreien“ mineralischen Rohstoffen. Das Eigentumsrecht an Grund und Boden erstreckt sich nicht darauf, sondern diese

gehen mit der Aneignung in das Eigentum des hierzu Berechtigten über. Die Schurfberechtigungen für die jeweilige Grafitlagerstätte sind im Bedarfsfall zu eruieren. Bei den zuletzt betriebenen ehemaligen Bergbaue liegen noch Bergbauberechtigungen vor (z.B. Weinberg). Für das hier herangezogene Beispiel Röhrenbach bei Horn sind derzeit keine bergmännischen Berechtigungen verliehen. Eine UVP ist mit der Option eines Tagebaues und einer Ausdehnung der obertägigen Anlagen von mehr als 10 ha in vollem Ausmaß erforderlich.

Die detaillierte bergtechnische Charakterisierung erfolgte im Kapitel 5.2.3. Demnach wird dieses Grafitvorkommen als derzeit nicht bauwürdig eingeschätzt.

### **5.3.3.2 Bergbauplanungskonzept**

Die Grafitlagerstätten des Waldviertels wurden über mehrere Jahrhunderte hinweg im Tage- und auch Untertagebau abgebaut. Ausbisse und Schwarzfärbungen der Oberfläche indizierten den Grafit. Waren die oberflächennahen Partien bereits geringfügig überlagert, wechselt man in den Untertagebau. Im Laufe der Zeit fand aufgrund der immer größer werdenden Maschinen und der fallenden Rohstoffpreise nur mehr der Tagebau Verwendung. Viele von diesen bestanden wegen der einzeln auftretenden Grafitlinsen aus mehreren kleinen Tagebauen. Sie wurden meist mit einer gemeinsamen Aufbereitung zusammengefasst.

Die bekannten Grafitlinsen befinden sich alle nahe an der Oberfläche, viele davon wurden aber in der Vergangenheit auch untertägig aufgeschlossen. Die Erstreckung in die Teufe ist zumeist unbekannt, da hier nie exploriert wurde. Wegen der geringen Teufen der anstehenden Grafitlinsen wäre Abbau im Tagebau sinnvoll. Da bereits auch Lagerstätten mit alten Grubenbauen vorhanden sind, würden auch diese einen Tagebau bestätigen. Auch die Ressourcensynergien mit Abraummaterail könnten in angrenzenden Steinbrüchen und Schottergruben genutzt werden. Das entscheidende Kriterium bei Tagebauen ist das Abraumverhältnis. Dieses wird im Wesentlichen durch folgende Parameter bestimmt:

- Teufe des Lagerstätten-Körpers
- Geometrie des Lagerstätten-Körpers
- Böschungswinkel (abhängig vom Deckgebirge, steil bei Hartgestein, flach bei Lockergestein; im Kristallin des Moldanubikums ist durchgehend mit Hartgestein als Deckgebirge zu rechnen)

Da Teufe und Geometrie der einzelnen Grafitlinsen kaum bekannt sind, kann ein Tagebaumodell und die Berechnung der Wirtschaftlichkeit nur unter entsprechenden Annahmen und Variation der kritischen Parameter durchgeführt werden. Einige Vor- und Nachteile eines Tagebaues sind in Tabelle 33 zusammengefasst.

Tabelle 33: Vor- und Nachteile des Tagebaus

Vorteile	Nachteile
Sehr hohe Produktivität (10-fach zu Untertagebau)	Dimensionen (großer Platzbedarf, Einsehbarkeit)
Weniger komplex als Untertagebau, leichterer Abbau	Emissionen (Staub, Lärm, Erschütterungen,...)
Lagerstätte meist vollständig gewinnbar	Große Abraumengen
	Folgekosten (Rekultivierung, ...)

Als Konzept für einen Abbau wäre eine gesamte Betrachtung aller bauwürdigen Grafitvorräte im Waldviertel vorzuschlagen und diese mit einer gemeinsamen Aufbereitung zu versehen. Das heißt in einer ersten Stufe könnte man ein Konzept für die Grafitvorkommen rund um Röhrenbach (als Beispiel) schaffen und dieses sukzessive je nach Vorrat, Qualität und Kosten erweitern.

### 5.3.4 Ehemalige Grafitlagerstätte Sunk bei Trieben, Veitscher Decke, Grauwackenzone, Steiermark

Nachfolgend werden unter den Rahmenbedingungen die Darstellung der wirtschaftlichen Gegebenheiten und des Bergrechts erläutert, während im Bereich des Bergbauplanungskonzepts Anmerkungen zur Abbaumethode und Aufbereitung angeführt sind.

#### 5.3.4.1 Rahmenbedingungen

Der österreichische Grafit erzielt 550 \$/t bzw. ca. 420 €/t (Industrial Minerals) am Markt. Hierbei handelt es sich um den amorphen Grafit aus Kaisersberg. Die Qualitäten von Kaisersberg und Sunk weisen durch eine einheitliche geologische Genese dieselben Eigenschaften auf. Bei der Berechnung in Tabelle 34 handelt es sich um eine generelle Abschätzung des Ertrages bei den derzeitigen Preisen. Die Auffahrung-, Abbau-, Aufbereitungs- und Transportkosten sind je nach Lagerstätte individuell, aus einer umsichtigen Planung, zu kalkulieren.

Tabelle 34: Überslagsmäßige Berechnung für das Grafitvorkommen Sunk

Position	Berechnung	Betrag [€]
Auffahrung, Abbaukosten, Transportkosten		
Aufbereitungskosten		
Ertrag	65.000 t · 420 €/t	27.300.000
<b>Gewinn/Verlust</b>		

Das Mineralrohstoffgesetz (MinroG) zählt Grafit zu den „bergfreien“ mineralischen Rohstoffen. Das Eigentumsrecht an Grund und Boden erstreckt sich nicht darauf, sondern diese gehen mit der Aneignung in das Eigentum des hierzu Berechtigten über. Die Schurfberechtigungen für den Grafit in Sunk besitzt die Firma Grafitbergbau Kaisersberg GesmbH.

(mündliche Mitteilung von Dr. Peer). Eine UVP ist mit der Option eines Untertagebaus und einer Ausdehnung der obertägigen Anlagen von nicht mehr als 10 ha nicht erforderlich.

Die detaillierte bergtechnische Charakterisierung erfolgte im Kapitel 5.2.4. Demnach wird dieses Grafitvorkommen als derzeit nicht bauwürdig eingeschätzt.

### 5.3.4.2 Bergbauplanungskonzept

Vor der Schließung des Bergbaus Sunk wurde im sogenannten Scheibenbruchbau mit streichendem bzw. querschlägigen Verhieb und Scheibenversatzbau mit fallendem Verhieb gearbeitet. Zweiteres fand dort Verwendung, wo darüber liegende Grubenbaue zu schützen waren. Da sich der Abbau im Sohlenstoßbau (Scheibenversatzbau mit fallendem Verhieb, Strossenstoßbau nach Reuther (1989), undercut-and-fill mining nach Hustrulid (1982)) mit und teilweise ohne Versatz (kommt einem Teilsohlenbruchbau gleich) bewährt hat, sollte dieser beibehalten werden. Folgende Parameter der Grafitflöze bestätigen diese Methode:

- Steilstehend ( $> 60^\circ$ ) → Schwerkraftförderung (Begünstigung des Bruchbaus)  
Tektonisch stark beansprucht → flexibles Abbauverfahren
- Durchschnittliche Mächtigkeit von 2 m
- Standfestes Hangendes und Liegendes
- Hartgraphite (eckig brechend) und Weichgraphite (schmierend, erdig)

Ein Sohlenstoßbau (Tabelle 35 und Abbildung 25) lässt sich überall dort anwenden, wo meist andere Abbauverfahren versagen. Aufgrund der hohen Selektivität kann auch unregelmäßigen Lagerstätten gefolgt werden. Dies bedeutet einerseits ein hohes Ausbringen sowie geringe Verdünnung und andererseits hohe Abbaukosten und eine geringe Abbauleistung.

Tabelle 35: Vor- und Nachteile des Sohlenstoßbau (Strossenstoßbau)

Vorteile	Nachteile
Sehr gut anpassbar an unvorhergesehene Änderungen (Gebirgs- und Lagerstättenverhältnisse, Einfallen, Streichen, Gehalte)	Teures Verfahren
Selektives Verfahren (Verdünnung gering)	Aufwändige Versatztätigkeit (Betonversatz) für die Firstsicherung im Abbau
Abbauverluste können gering gehalten werden (hohes Ausbringen)	Geringe Jahresförderung je Abbaubetriebspunkt
Sehr geringe Oberflächenauswirkungen	

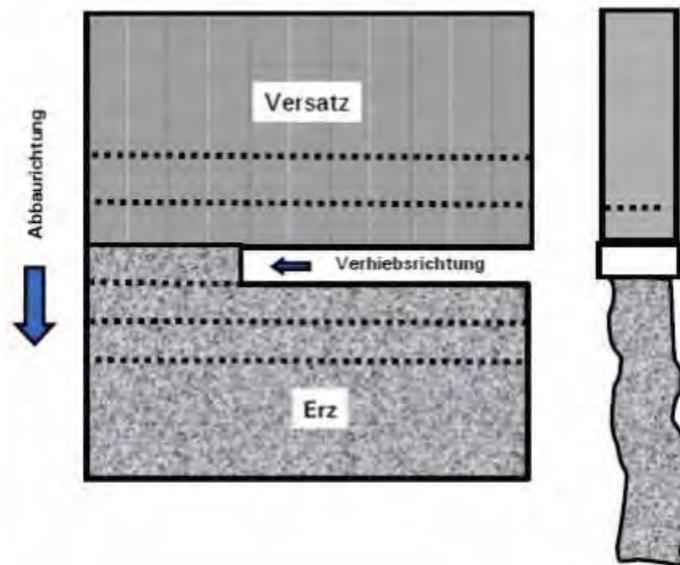


Abbildung 25: Sohlenstoßbau (schematisch nach Reuther 1989 bzw. Hustrulid 1982)

Aufgrund der bisherigen Erfahrungen mit Naturgewalten im Raum Trieben wäre bei einer Aufbereitung im Sunktal mit starken Umwelteinflüssen durch Hochwässer und Erdbeben zu rechnen. Der nächste mögliche Standort ist das 1,5 km entfernte Trieben. Ein straßentauglicher LKW-Transport müsste eingerichtet werden. Sinnvoll erscheint jedoch somit gleich ein Transport zur bereits vorhandenen Aufbereitungsanlage Kaisersberg in etwa 55 km Entfernung. Dort ist auch das notwendige Know-How vorhanden. Als Verkehrswege dienen Bundesstraßen und Autobahn.

## 5.4 Danksagung

Folgenden Personen sei für ihre wertvollen Expertenmeinungen, Diskussionsbeiträge und Mitwirkung herzlichst gedankt:

Hannes Blaha, Andreas Böhm, Helmut Flachberger, Michael Götzinger, Heinrich Mali, Peter Moser, Helmut Peer, Johann Raith, Albert Schedl, Oskar Thalhammer, Horst Wagner und Leopold Weber.

## 5.5 Literatur

Angerer, G. et al., 2009: Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Fraunhofer-ISI „Innovationspotenziale“. Stuttgart, Deutschland: Fraunhofer Verlag.

- Ad-hoc Working Group, 2010: Critical raw materials for the EU: Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. Internet: [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index\\_de.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index_de.htm).
- Fettweis, G. B., 1990: Bergwirtschaft (Band I), Verlag Glück Auf GmbH.
- GBA 2005/2009: IRIS Interaktives Rohstoff-Informationssystem metallogenetische Karte von Österreich. Internet: <http://geomap.geolba.ac.at/IRIS/einstieg.html>.
- Goldmann, C., 2004: Grafitvorkommen in Niederösterreich, Geologie und Genese. MEFOS Vereinsmitteilung, 33.
- Heinisch, H. und K. Schmidt, 1976: Zur kaledonischen Orogenese in den Ostalpen.
- Hiessleitner, G., 1949: Die geologischen Grundlagen des Antimonitbergbaues in Österreich, Geologische Bundesanstalt Wien.
- Hohn, M., 2007: Grafitbergbau Mühldorf in NÖ. MEFOS Vereinsmitteilungen, 33, 4–14.
- Höll, R., 1971: Scheelitvorkommen in Österreich. Erzmetall, 24, 273–282.
- Hustrulid, W. A., 1982: Underground Mining Methods Handbook. New York: Society of Mining Engineers (Hrsg.).
- Industrial Minerals: Internet: <http://www.indmin.com/MarketTracker/197195/Graphite.html?id=GT-C> und <http://www.indmin.com/Print.aspx?ArticleId=3114260> (31.01.2013)
- Klar, G., 1964: Steirische Graphite. Styria, Graz.
- Lahusen, L., 1969: Schicht- und zeitgebundene Antimonit-Scheelit-Vorkommen und Zinnober-Vererzungen in Kärnten und Osttirol, Österreich, Springer Verlag.
- Mathias, E.-P. und F. Budin, 1954: Die Graphitlagerstätte Sunk bei Trieben in der Steiermark. Berg und Hüttenmännische Monatshefte, 99.
- Matthes, S., 2001: Mineralogie – eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde, 6. Aufl., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Metal Pages: Internet: <http://www.metal-pages.com/metals/tungsten/metal-prices-news-information/>.
- Metal Price: Internet: <http://www.metalprices.com/p/AntimonyFreeChart/>.
- Metallgesellschaft AG, 1978: Scheelit-Exploration Sillian/Osttirol, unveröffentlichter Abschlussbericht, Frankfurt am Main.
- Mineral Prices: Internet: <http://www.mineralprices.com/>.
- Mitterer, F., 1988: Planung und kostenmäßige Erfassung eines neuen Grubenzuschnitts des Bergbaus Sunk der Graphitbergbau Trieben GesmbH als Folge eines Unterfahrungsstollens unter besonderer Berücksichtigung von Wetterführung, Förderung und Wasserhaltung, MU-Leoben.
- Neinavaie, H. et al., 1983: Die Erzvorkommen Osttirols. – Veröffentl. Mus. Ferdinandeum, 63, 69–113, Innsbruck.

- Peer, H., 1980: Die Graphitlagerstätte Trieben/Sunk, unveröffentlichter Bericht.
- Pichlhöfer, R., 1985: Montangeologische Untersuchungen der Graphitlagerstätte Weinberg bei Amstall, NÖ, Montanuniversität Leoben.
- Polegeg, S. et al., 1987: Beurteilung von Graphitvorkommen im Waldviertel, unveröffentlichter Bericht.
- Portugaller, T., 2010: Scheelitvererzungen in der Thurntaler Quarzphyllitzone, unveröffentlichte Masterarbeit, Montanuniversität Leoben, Leoben.
- Reimann, C., 1980: Lithogeochemie und schichtgebundene Vererzung, Kreuzeckgruppe. Unveröffentlichte Dissertation, Montanuniversität Leoben, Leoben.
- Reuther, E. U., 1989: Lehrbuch der Bergbaukunde, Verlag Glückauf GmbH, Essen.
- Roeser, S., 2010: Werkstoffliche Recyclingraten bei verschiedenen Mineralen und Metallen, o. V..
- Stadtschnitzer, A. und H. Flachberger, 2007: Orientierende Untersuchungen zur Aufbereitbarkeit von Quarz-, Grafit-, Antimonit- und Bentonitproben, unveröffentlichter Bericht.
- Steffan, J., 1944: Die Graphitvorkommen des Waldviertels, Dissertation.
- Tollmann, A., 1977: Geologie von Österreich. Bd. 1, Deuticke Wien.
- USGS, 2011: Mineral Commodity Summaries 2011. United States Geological Survey, Reston, VA, USA.
- VOEST-ALPINE AG, 1978: Systematische, geochemische Untersuchung Osttirols – Probe-  
nahme, unveröffentlichter Bericht
- VOEST-ALPINE AG, 1980: Wolframprospektion im Raum Villgraten – Lienz, unver-  
öffentlichter Abschlussbericht Projekt TA 3/1979, Leoben.
- Weber, L., 1982: Geologie der Osttiroler Antimonvorkommen der Kreuzeckgruppe, unver-  
öffentlichter Bericht.
- Weber, L., 1987: Die geologischen Grundlagen des Grafitbergbaues in Niederösterreich in  
Bergbau in Niederösterreich (Hrsg. Kusternig A.), o. V.

## 6. Aufbereitung

Die Aufbereitung der in der Studie „Kritische Rohstoffe für die Hochtechnologieanwendung in Österreich“ behandelten Rohstoffe – Wolfram, Seltene Erden, Tantal/Niob, Vanadium und Cobalt – umfasst primärseitig in Österreich zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie nur die Aufbereitung von Scheelit zur Gewinnung von Wolfram des Bergbaus Felbertal der Wolfram Bergbau und Hütten AG in Mittersill. Dennoch soll in diesem Teil der Studie ein Überblick von den in der Aufbereitung dieser Stoffe zum Einsatz kommenden Technologien gegeben werden. Generell kann man sagen, dass diese ein sehr breites Spektrum der Verfahrenstechnik zur Aufbereitung von mineralischen Rohstoffen abdecken. Auf der Seite der Sortierprozesse kommt die Dichtesortierung ebenso zum Einsatz wie Flotation, Magnetscheidung und Elektroscheidung. Zudem wird eine weite Varietät an Zerkleinerungs- und Klassierverfahren eingesetzt, um die entsprechenden Rohgüter auf angepasste Dispersitäten für nachgeschaltete Technologien zu bringen. Dies gilt auch für Aufbereitungsprozesse, welche sich nicht physikalischer Prinzipien bedienen, sondern die Wertstoffe mittels chemischer Verfahren aus dem Aufgabegut extrahieren. Auch für die bei diesen Rohstoffen öfter zur Anwendung kommenden metallurgischen Prozesse ist eine entsprechende Ausgangsdispersität von Bedeutung.

### 6.1 Wolfram

Die wirtschaftlich wichtigsten Wolframminerale sind Scheelit, Wolframit, Hübnerit und Ferberit (Tabelle 36), wobei die Wolframvorräte der Welt zu ca. zwei Drittel in Scheelit- und einem Drittel in Wolframitlagerstätten gebunden sind. Daher folgt im Anschluss eine kurze Betrachtung der wichtigsten Eigenschaften der beiden letztgenannten Minerale.

Tabelle 36: Eigenschaften der Wolfram-Mineralie [Mineralienatlas, Wikipedia]

	<b>Scheelit</b>	<b>Wolframit</b>	<b>Ferberit</b>	<b>Hübnerit</b>
Chemische Formel	CaWO <sub>4</sub>	(Fe,Mn)WO <sub>4</sub>	FeWO <sub>4</sub>	MnWO <sub>4</sub>
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	5,9–6,1	7,12–7,6	7,4–7,5	7,1–7,2
Mohshärte	4,5–5	5–5,5	4,5	4–4,5
Bruch	Muschelig, spröde	Uneben, spröde	Uneben, spröde	Uneben, spröde
Magnetische Eigenschaften	Diamagnetisch	Paramagnetisch	Paramagnetisch	Paramagnetisch
Elektrische Eigenschaften	Nichtleiter	Nichtleiter	Nichtleiter	Nichtleiter
Sonstiges	Oberflächenbenetzbarkeit			

Aus aufbereitungstechnischer Sicht ist die hohe Dichte dieser beiden Wolframminerale von Bedeutung, da es sie in Kombination mit den Gangartmineralien der Lagerstätten eine Dichtesortierung zugänglich macht. Bei entsprechender Gangart kann zur Anreicherung von Wolframit die Magnetscheidung zum Einsatz gebracht werden. Von großer Wichtigkeit ist auch die Oberflächenbenetzbarkeit des Scheelits, welche eine Anreicherung mittels Flotation ermöglicht.

Mit einem Fokus auf Österreich ist besonders die Scheelitlagerstätte Felbertal in der Nähe von Mittersill zu nennen, deren durchschnittlicher  $WO_3$ -Gehalt 0,48 % beträgt. Als Hauptgangartminerale präsentieren sich Quarz, Amphibole, Glimmer, Talk und Kalzit [Bernhart 2002].

Zur Zerkleinerung wird in der ersten Stufe ein Kegelbrecher in Kreislaufschaltung eingesetzt. Im zweiten Schritt kommt ein Kugelmühlenkreislauf zur Herstellung der für die anschließende Flotation notwendigen Dispersität zur Anwendung. In diesem nass betriebenen Mahlkreislauf stellt die hohe Dichte des Scheelits ein Problem in der Stromklassierung dar. Um daher eine Anreicherung des Scheelits und eine daraus folgende Übermahlung zu verhindern, besteht eine Besonderheit dieser Anlage darin, dass die Vorflotation in den Mühlenkreislauf integriert ist.

Das Konzentrat aus der Vorflotation wird nach Durchlaufen einer Konditionierung in mehreren Stufen nachgereinigt. Das fertige Konzentrat wird im Anschluss zur Entwässerung eingedickt und filtriert. Die Berge werden in entsprechende Schlamnteiche verbracht. Als Beispiel soll hier der Aufbereitungsstammbaum der Flotation aus Mittersill in Abbildung 26 dienen.

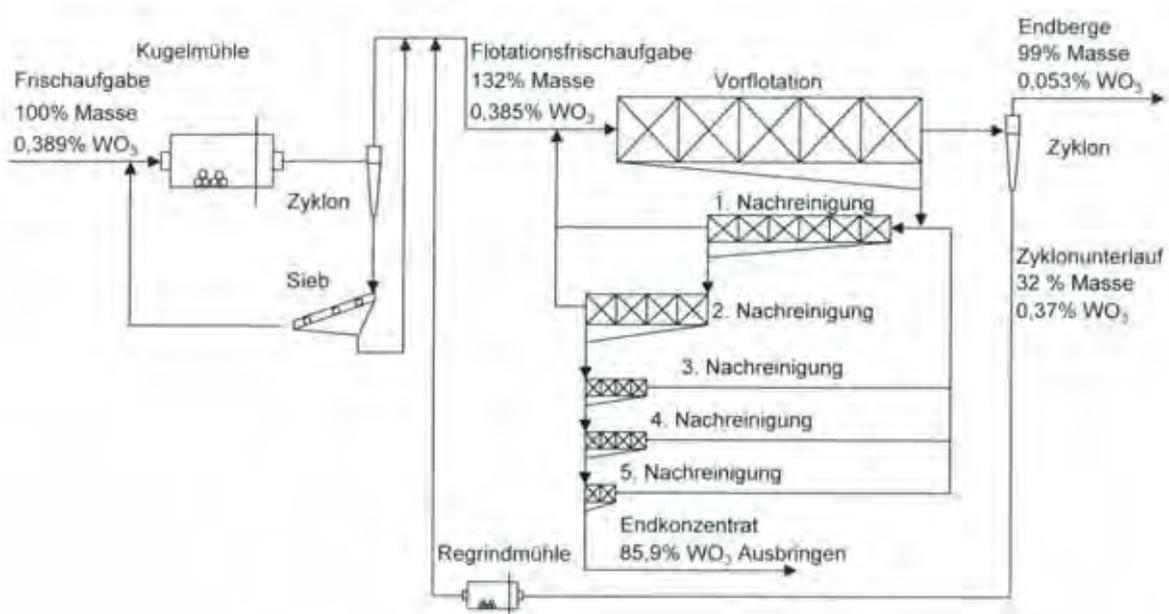


Abbildung 26 :Scheelitflotation der Wolframaufbereitung in Mittersill [Bernhart 2012]

Durch die hohe Dichte ist es auch möglich, die Wolframminerale mittels Dichtesortierung aufzukonzrieren. Diese wird gerne als Voranreicherung der gröbereren Fraktionen vor der Flotation eingesetzt. Aufgrund der oft sehr feinen Verwachsung und der meist niedrigen Gehalte in Scheelitlagerstätten erfolgt eine Anreicherung nicht mittels alleiniger Dichtesortierung, da dies zu beträchtlichen Verlusten in den feinen Fraktionen führen würde. Als Beispiel sei wiederum die in Abbildung 27 dargestellte Flotation in Kombination mit Dichtesortierung der Anlage in Mittersill angeführt. [Bernhart 2002]

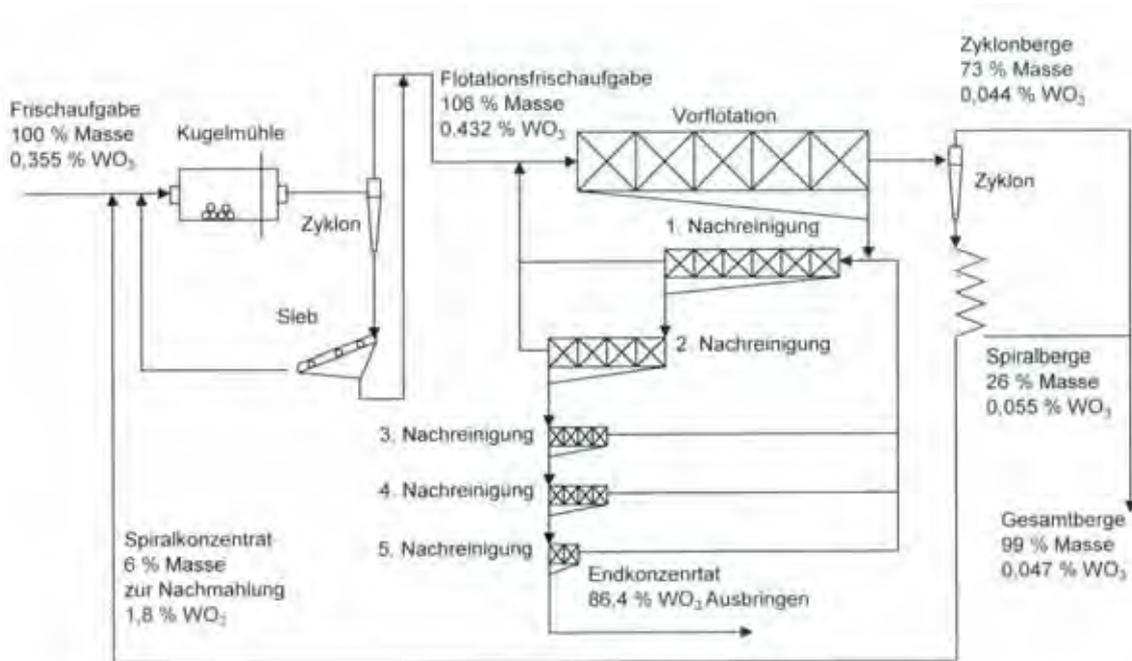


Abbildung 27: Scheelitflotation in Kombination mit Dichtesortierung in Mittersill [Bernhart 2012]

Wolframitlagerstätten entsprechen meist Gangvererzungen und weisen eine grobe Verwachsung mit den Gangartmineralien auf. Sie sind daher im Allgemeinen auch gut mittels reiner Dichtesortierung aufbereitbar.

## 6.2 Seltene Erden

Die Seltene-Erden-Elemente (SEE) werden, wie in Tabelle 37 dargestellt, beispielsweise in leichte, mittlere und schwere eingeteilt, wobei aufgrund der relativen Konzentration der Seltene-Erden-Oxide in den entsprechenden Mineralien die leichten Seltene Erden eine dominierende Stellung einnehmen.

Tabelle 37: Einteilung der Elemente der Seltenen Erden [Chegwidden und Kingsnorth 2002]

	Element	Ordnungszahl	Symbol
Leicht	Lanthan	57	La
	Cer	58	Ce
	Praseodym	59	Pr
	Neodym	60	Nd
Mittel	Promethium*	61	Pm
	Samarium	62	Sm
	Europium	63	Eu
	Gadolinium	64	Gd
Schwer	Terbium	65	Tb
	Dysprosium	66	Dy
	Holmium	67	Ho
	Erbium	68	Er
	Thulium	69	Tm
	Ytterbium	70	Yb
	Lutetium	71	Lu
	Yttrium	39	Y
	Scandium	21	Sc

\*Nur radioaktive Isotope

Die SEE-führenden Mineralien sind in Tabelle 38 aufgelistet. Wirtschaftlich interessant sind dabei Bastnäsit und Monazit für die Gewinnung von leichten sowie Xenotim für die Gewinnung von schweren Seltenen Erden Elementen.

Tabelle 38: Zusammensetzung der Selten-Erd-Mineralie [Chegwidden und Kingsnorth 2002]

Mineral	Formel	Bedeutende Fundorte	Max. SE-Oxid-Gehalt [Gew.-%]
Bastnäsit	$\text{LnFCO}_3$	China, USA	75
Monazit	$(\text{Ln}, \text{Y})\text{PO}_4$	China, Australien, Brasilien, Indien, Malaysia, Afrika	65
Loparit	$(\text{Na}, \text{Ca}, \text{Ln}, \text{Y})(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti})_2\text{O}_6$	CIS	32
Xenotim	$\text{YPO}_4$	China, Australien, Malaysia, Afrika	62
Ionentauschertone	Verwitterter Xenotim oder Apatit	China	k.A.

Monazit und Xenotim kommen hauptsächlich in alluvialen Lagerstätten vor, fallen aber auch als Beiprodukt der Produktion von Titanmineralen und Zinn an. Bastnäsit findet sich in Festgesteinslagerstätten. Die Tabelle 39 zeigt die wichtigsten Eigenschaften der genannten Mineralien.

Tabelle 39: Eigenschaften der Selten-Erd-Mineralen [Mineralienatlas, Wikipedia]

	<b>Monazit</b>	<b>Xenotim</b>	<b>Bastnäsit</b>
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	4,8–5,5	4,4–5,1	4,7–5,0
Mohshärte	5–5,5	4,4–5,1	4–4,5
Magnetische Eigenschaften	Paramagnetisch	Paramagnetisch	
Elektrische Eigenschaften	Nichtleiter	Nichtleiter	
Sonstiges			Oberflächen benetzbarkeit

Zum aktuellen Zeitpunkt werden in Österreich keine Seltenen Erden direkt aus Primärlagerstätten aufbereitet. Im Folgenden soll ein Überblick von der generellen Vorgehensweise bei der Aufbereitung Seltener Erden gegeben werden. Monazit und Xenotim aus alluvialen Lagerstätten werden im ersten Verfahrensschritt mittels Dichtesortierung gemeinsam mit anderen Schwermineralen aus dem Quarzsand abgeschieden. Dies wird meistens durch den Einsatz von Humphrey-Spiralen erreicht. In den folgenden Prozessstufen werden die Schwerminerale mittels Magnetscheidung, Flotation und Elektroscheidung sortiert. Die Abscheidung von Monazit und Xenotim erfolgt dabei in einem Magnetscheideschritt im Starkfeld.

Bastnäsit wird im ersten Prozessschritt mittels Backenbrecher im Durchlauf zerkleinert. Die zweite Zerkleinerungsstufe ist meistens ein im Kreislauf geschalteter Kegelmühle. Die weitere Zerkleinerung erfolgt ebenfalls schonend über eine Stab- und eine Kugelmühle, welche mit Zyklonen im Kreislauf geschaltet sind. Im Anschluss findet die Konditionierung für die nachgeschaltete Flotation statt, welche im basischen Milieu bei einem pH-Wert von 8,95 durchgeführt wird. Für die Flotation kommt eine Gegenstromkaskade zum Einsatz [Johnson 1966].

Darüber hinaus werden beispielsweise die SE-Mineralen aus dem Magnetit/Hämatit-Vorkommen von Baiyunebo in China durch eine Kombination verschiedener Verfahren (siehe Abbildung 28) auf die jeweiligen Konzentrate angereichert [Richter und Schermanz 2006].

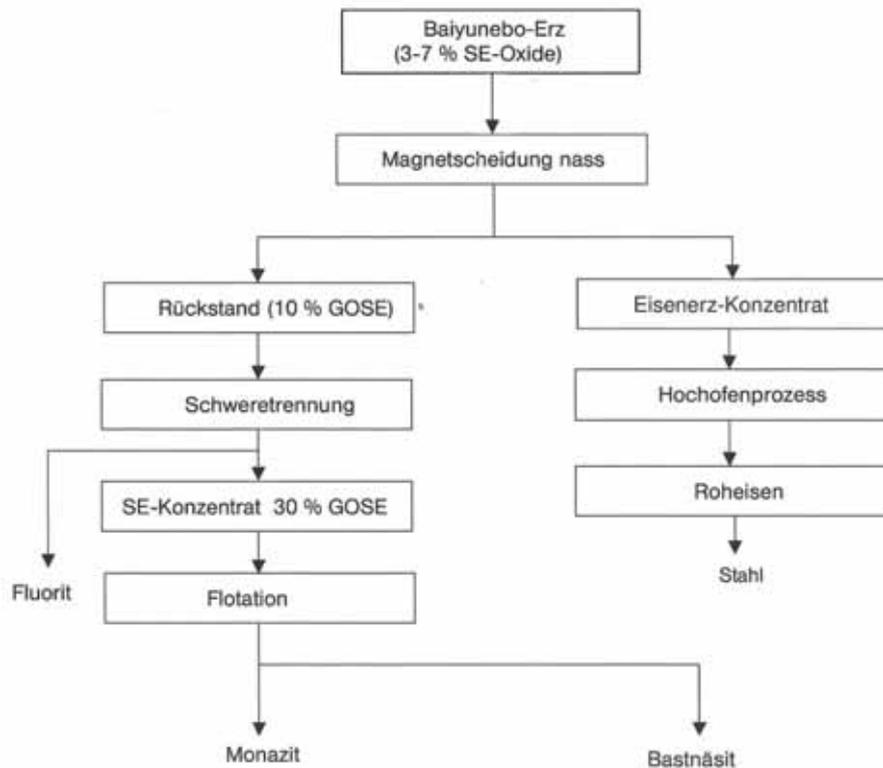


Abbildung 28: Prozessablauf der Aufbereitung von Baiyunebo-Erz in China [Richter und Schermanz 2006]

### 6.3 Tantal und Niob

Tantal und Niob kommen in den Erzen der Mineralgruppe Columbit-Tantalit vor, von der sich auch der zusammenfassende Name „Coltan“ ableitet. Die Endglieder dieser Mischreihe stellen die reinen Metalloxide Niobit (Columbit) und Tantalit dar. Die tatsächliche chemische Zusammensetzung ist hierbei äußerst variabel. In Tabelle 40 sind die wichtigsten Eigenschaften aufgelistet.

Tabelle 40: Eigenschaften der Tantal/Niob Minerale [Mineralienatlas, Wikipedia]

	<b>Tantalit</b>	<b>Columbit (Niobit)</b>
Chemische Formel	$(\text{Fe,Mn})(\text{Ta,Nb})_2\text{O}_6$	$(\text{Mn,Fe}^{2+},\text{Mg})(\text{Ta,Nb})_2\text{O}_6$
Dichte [ $\text{g/cm}^3$ ]	6,73–8,2	7,12–7,6
Mohshärte	5,5–6,5	5–5,5
Sonstiges	Oberflächenbenetzbarkeit	Oberflächenbenetzbarkeit

Die hohe Dichte macht diese Mineraliengruppe in Zusammenhang mit der spezifisch deutlich leichteren Gangart einer Anreicherung über Dichtesortierung zugänglich. Außerdem werden die unterschiedlichen Eigenschaften bezüglich der Oberflächenbenetzbarkeit zu einer Aufkonzentration mittels Flotation ausgenutzt.

Die Aufbereitung der Coltan-Erze erfolgt zunächst mit klassischen Technologien. In entsprechenden Zerkleinerungsketten wird in Brecherstufen die Grobzerkleinerung vorgenommen und eventuell bereits mit Stabmühlen feiner zerkleinert. Die Fraktionen werden entsprechend den eingesetzten Verfahren in die Dichtesortierung überführt. Seltener findet eine Flotation zur Anreicherung Verwendung, wobei diese im Vorfeld einen weiteren Zerkleinerungsschritt mittels Kugelmühlenkreisläufen erfordert. Im Vorfeld der Flotation erfolgt meistens bereits mittels Dichtesortierung eine Voranreicherung. Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen beispielhafte Kreisläufe der Dichtesortierung und Flotation.

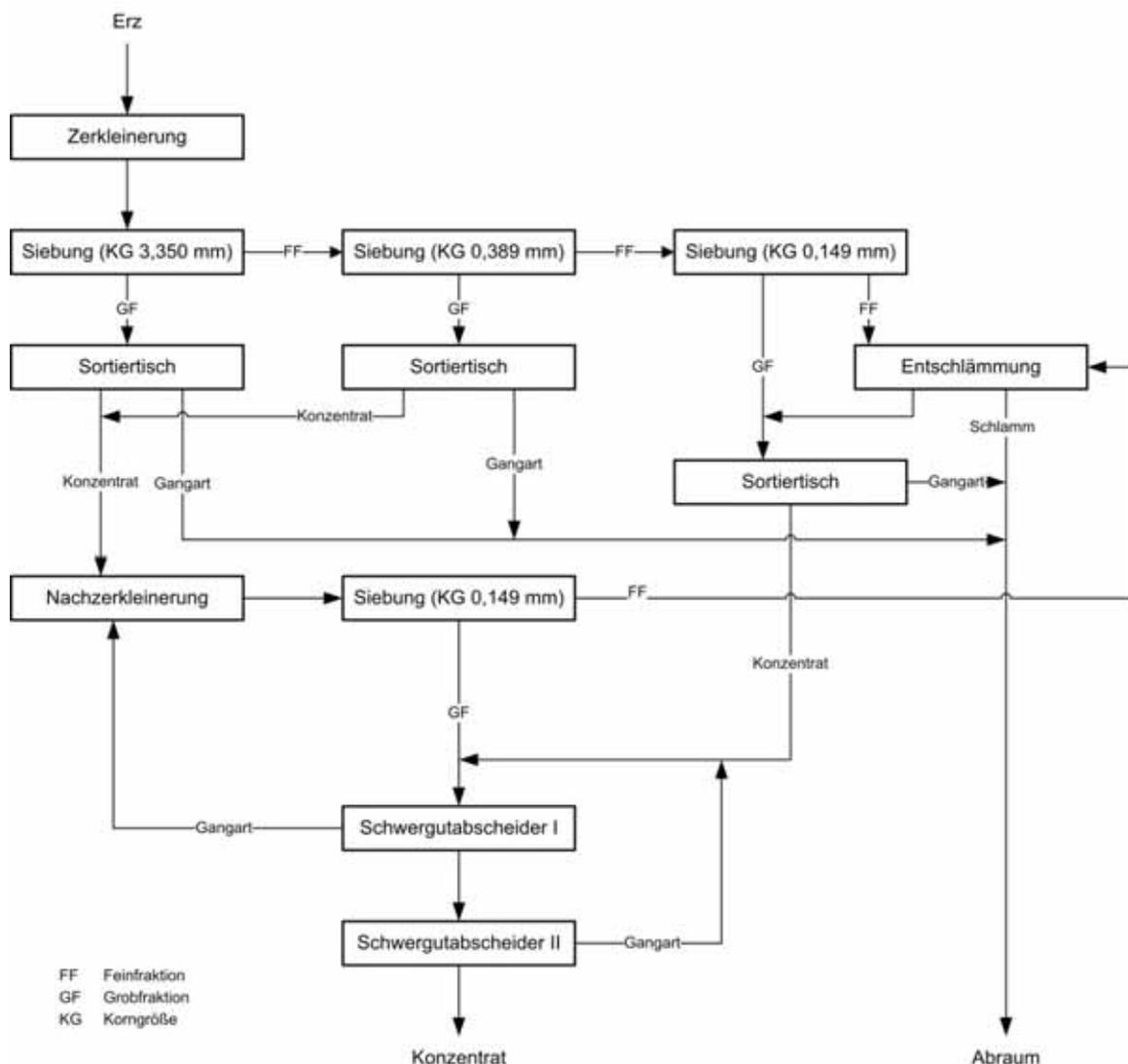


Abbildung 29: Beispiel für eine Ta/Nb-Dichtesortierung

Konzentrate aus reiner Dichtesortierung werden im nächsten Schritt mittels Mühlenkreisläufen aufgemahlen, um einen entsprechenden Aufschluss für die nachfolgenden pyrometallurgischen sowie Laugungsprozesse herzustellen.

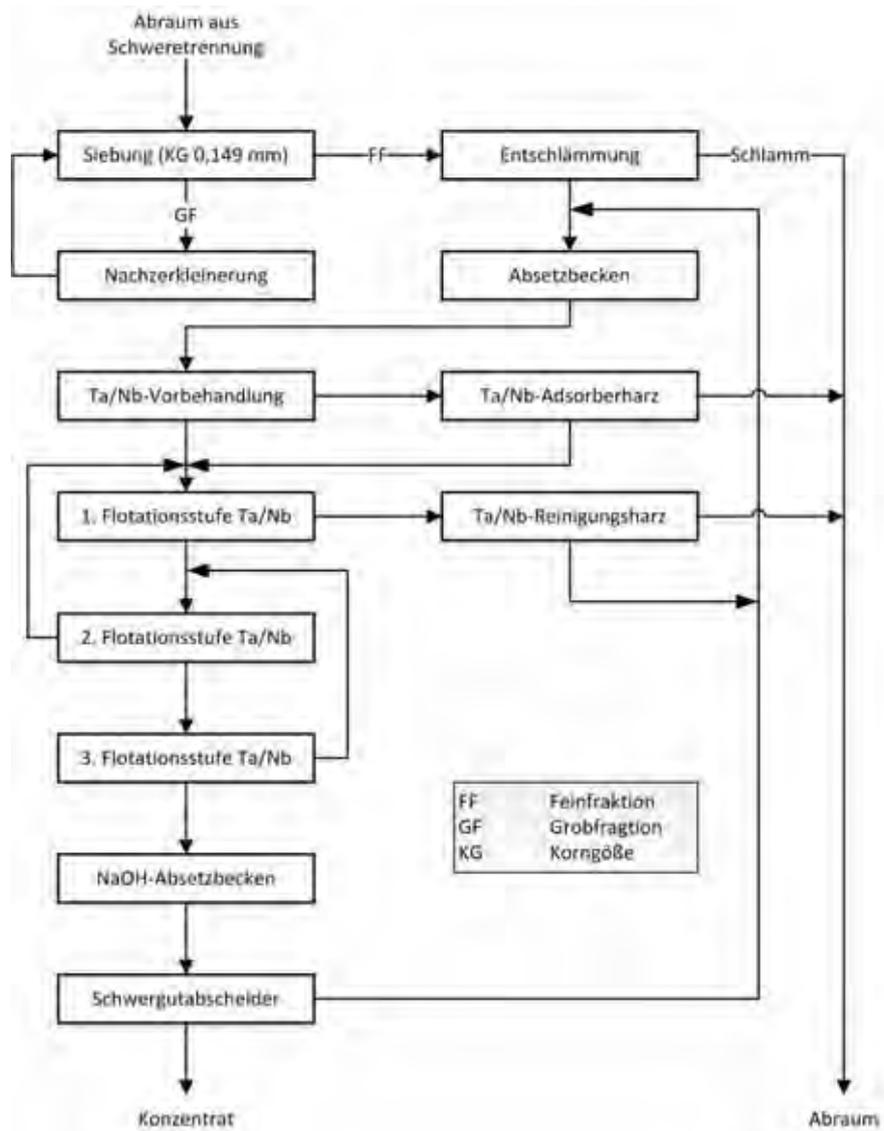


Abbildung 30: Beispiel für eine Ta/Nb-Flotation

## 6.4 Vanadium

Die wichtigsten Vanadiumerze sind Carnotit, Patronit und Vanadinit. Erzvorkommen, welche rein zur Gewinnung von Vanadium abgebaut werden, sind allerdings äußerst selten. Die größten Vanadiummengen liegen als Beiprodukt des Abbaus und der Aufbereitung von titanhaltigen Magnetiten vor.

Da Vanadium hauptsächlich als Co-Produkt der Aufbereitung von Erzen, welche zur Gewinnung anderer Wertstoffe abgebaut werden, gewonnen wird, ist der genaue Weg zur Herstellung des Konzentrates von dem abgebauten Erz abhängig. Grundsätzlich findet im ersten Aufbereitungsschritt eine Zerkleinerung statt, um einen entsprechenden Aufschluss für die anschließende nasschemische Gewinnung herzustellen. Für diese gibt es zwei grundsätzliche Verfahren. Das erste ist die alkalische Methode bei der als Produkt  $V_2O_5$  bzw.  $V_2O_3$

gewonnen wird, welche zum Beispiel bei V-hältigen Sandsteinen gerne zur Anwendung kommt [Meckelburg 1974].

Die zweite Technologie ist ein saures Verfahren, bei dem das Erz zunächst in  $H_2SO_4$  gelöst und mit einer Kombination aus thermischer Behandlung und anschließender Oxidation weitergeführt wird [Meckelburg 1974]. Als Produkt erhält man nach weiteren Prozessschritten ein flüssiges Metall, welches sich gut zur Herstellung von V-Legierungen eignet [Mortimer 1996].

## **6.5 Cobalt**

Cobalt ist stets mit Nickel, häufig auch mit Kupfer, Silber, Eisen oder Uran vergesellschaftet. Es wird daher fast ausschließlich als Beiprodukt von polymetallischen Lagerstätten gewonnen [Fisher 2011]. Da Cobalt beinahe immer gemeinsam mit anderen Metallen vorkommt, folgt dessen Aufbereitung den klassischen Prozessen zur Gewinnung von z.B. Kupfer und Nickel. Die polymetallischen Erze werden gebrochen, aufgemahlen und meist über einen Flotationsprozess vorangereichert. In weiterer Folge erfolgt die Auftrennung der einzelnen Metalle über metallurgische Schmelzprozesse [Shedd 2008].

## **6.6 Strategieentwicklung**

Im ersten Teil dieser Strategieentwicklung wird die generelle Vorgehensweise bei der Entwicklung eines Aufbereitungsprozesses für primäre Rohstoffe dargestellt. In Österreich werden nur zwei der in dieser Studie behandelten Rohstoffe aus primären Rohstoffquellen gewonnen, aufbereitet und verarbeitet. Dabei handelt es sich um Wolfram und Graphit. Auf die Aufbereitung von Wolfram wurde bereits vorhin eingegangen, auf jene von Graphit jedoch nicht. Daher soll diese nachfolgend erläutert werden. Im Anschluss daran befindet sich die Vorgehensweise zur Optimierung bestehender Aufbereitungsprozesse. Im nächsten Teil werden die besonderen Herausforderungen der Aufbereitung von Rohstoffen aus sekundären Ressourcen betrachtet.

### **6.6.1 Primärrohstoffe**

Für den Ausbau der Rohstoffversorgung lassen sich im Bereich der Aufbereitung grundsätzlich zwei unterschiedliche Ansätze verfolgen. Zum einen ist diese durch Erschließung neuer Ressourcen erzielbar und zum anderen können bestehende Prozesse optimiert werden.

### **6.6.1.1 Erschließung neuer Ressourcen**

Vor der Untersuchung der Aufbereitbarkeit stehen die geologische Prospektion und Exploration. Diese liefern die grundlegenden Daten und Proben für die anschließende Untersuchung der Aufbereitbarkeit. Ohne eine entsprechende Beprobung sind keine fundierten Aussagen zu möglichen Verfahrensmodellen zur Aufbereitung eines Rohstoffes möglich. Die Rohgutanalyse [Schubert 1989, 2003] teilt sich für eine Untersuchung der Aufbereitbarkeit dabei in die drei wichtigen Unterkategorien Mineralbestand, Verwachsungsverhältnisse und Mineraleigenschaften.

#### **Mineralbestand**

Die Bestimmung des Mineralbestandes gibt Auskunft über die vorliegenden Mineralphasen und bildet damit die Basis der Rohgutanalyse. Die Verfahren zur Bestimmung des Mineralbestandes sind wie folgt:

- Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)
- Nasschemische Analyse
- Röntgendiffraktometrische Analyse (RDA)

Die RFA sowie nasschemische Analyse geben dabei Aufschluss über die qualitative sowie quantitative elementare Zusammensetzung der Probe und nur indirekt Einsicht in die vorhandenen Mineralphasen. Mithilfe der RDA ist hingegen eine direkte qualitative Aussage über die vorhandenen Mineralphasen möglich.

#### **Verwachsungsverhältnisse**

Die Untersuchung der Verwachsungsverhältnisse soll Klarheit über den notwendigen Zerkleinerungsgrad geben, bei dem die einzelnen Mineralphasen ausreichend abgeschlossen vorliegen und mittels Sortierprozesse voneinander getrennt werden können. Dies lässt sich über eine Merkmalsklassenanalyse mit anschließender Auswertung über Henry-Reinhardt-Diagramme bewerkstelligen.

#### **Mineraleigenschaften**

Als dritter zu betrachtender Punkt einer Untersuchung auf Aufbereitbarkeit finden sich die Mineraleigenschaften. Diese teilen sich in zwei Gruppen auf:

- Physikalische Eigenschaften hinsichtlich der Zerkleinerungsprozesse: natürliche Bruchcharakteristik, Härte und Abrasivität.

- Physikalische Eigenschaften bezüglich der Sortierprozesse: Dichte, Magnetisierbarkeit, elektrische Leitfähigkeit, Oberflächenbenetzbarkeit und optische Eigenschaften

Im Hinblick auf chemische Aufbereitungsprozesse können auch chemische Eigenschaften von Interesse sein (z.B. Löslichkeit). Diese drei Unterpunkte der Rohgutanalyse bilden die Grundlage für weitere Untersuchungen zur Anwendbarkeit von Sortierverfahren zur Anreicherung des Wertstoffes zu einem den Anforderungen der weiterverarbeitenden Industrie entsprechenden Konzentrat. In diesem Zusammenhang ist im Allgemeinen die Herangehensweise so zu wählen, dass Konzentrate möglichst genau an die in den Spezifikationen aufgelisteten Anforderungen aufbereitet werden, da ein höherer Wertstoffgehalt im Konzentrat immer mit höheren Verlusten in den Aufbereitungsabgängen einhergeht und somit das Wertstoffausbringen im Konzentrat insgesamt sinkt. Die durch die aufbereitungstechnischen Untersuchung zu ermittelnde „Grenzkurve der Selektivität“ ist ein probates Instrument zur Entscheidungsfindung hinsichtlich Wertstoff-Anreicherung und Wertstoff-Ausbringen.

Die in Frage kommenden Sortierverfahren definieren in Kombination mit der Dispersität des aus dem Bergbau angelieferten Rohgutes und dessen Zerkleinerungseigenschaften auch die Auslegung der notwendigen Zerkleinerungskette. Die Strategieentwicklung für neue Aufbereitungsanlagen stellt sich, zusammenfassend betrachtet, als ein Prozess dar, welcher für jede Lagerstätte einer individuellen Auslegung unter Beachtung der zuvor angeführten Punkte bedarf. Dieser Auslegungsprozess muss in enger Zusammenschau mit der geologischen und bergbaulichen Entwicklung als auch unter Betrachtung der Zielanforderungen an das Aufbereitungsprodukt abgewickelt werden.

## **Grafit**

Die natürlichen Grafitvorkommen unterteilen sich in drei Untergruppen:

- Flockengrafit: grobkörnig, Grafitgehalt im Rohgut 10–12 %
- Mikrokristalliner Grafit: mikrokristalline Struktur, Grafitgehalt im Rohgut 80–85 %
- Kristalliner Grafit: sehr selten, Grafitgehalt im Rohgut bis 95 %

Synthetischer Grafit fällt als Rückstand der Erdölverarbeitung an und ist in Reinheiten bis 99 % erhältlich, weshalb eine weitere Aufbereitung entfallen kann. Das Rohgut aus natürlichen Graphitvorkommen wird im ersten Aufbereitungsschritt der Zerkleinerung und Klassierung zugeführt, um die notwendige Dispersität für die nachfolgenden Schritte herzustellen.

Als Sortierprozess kommt – wiederum in Abhängigkeit der Rohgutzusammensetzung und der vorliegenden Verwachsungsverhältnisse – zum einen die Dichtesortierung in Frage. Für Grafit wird dabei hauptsächlich die Herdarbeit eingesetzt. Zum anderen bietet sich aufgrund der natürlichen Hydrophobie des Grafits die flotative Anreicherung als Sortierverfahren an. Die Herausforderung zur Erzeugung hochreiner Grafitkonzentrate ist daher weniger in der Auffindung eines optimalen Reagenzienregimes gegeben, sondern ergibt sich aus den in der Regel sehr engen Verwachsungsverhältnissen, welche feinste Dispersitäten des Rohgutes erfordern und sich auf die Selektivität des Prozesses auswirkt.

In Österreich wird Grafit in Kaisersberg (Steiermark) abgebaut. Die Grobzerkleinerung erfolgt mittels Backenbrecher. Daran angeschlossen ist eine Zerkleinerung mittels Walzen-Teller-mühlen, in welchen zugleich die Trocknung stattfindet. Sofern notwendig werden auch Feinstmühlen eingesetzt, in welchen sich Körnungen mit Feinheiten bis kleiner  $1,7 \mu\text{m}$  erreichen lassen. Amorphe Grafite können in einer entsprechenden Flotationsanlage im Kohlenstoffgehalt angereichert werden.

#### **6.6.1.2 Optimierung bestehender Prozesse**

Die Optimierung bestehender Prozesse beinhaltet im ersten Schritt die Evaluierung der bestehenden Prozesskette zur Identifizierung der bestmöglichen Ansatzpunkte. Hierbei zeigt die Erfahrung, dass zum Beispiel Zerkleinerungstechnologien – und hier besonders Mahlprozesse – meistens Potenzial für Energieeinsparungen bieten. Dies ist natürlich auch eine Optimierung zur Schonung von Ressourcen, doch um die Ausnutzung im Sinne dieser Studie zu erhöhen, ist meistens eine Steigerung des Ausbringens an Wertmineralen im Konzentrat angestrebt. Diese lässt sich über die Verbesserung von Sortiertechniken und von chemischen Prozessen zur Extraktion erreichen. Dies bedeutet allerdings nicht, dass Zerkleinerungsverfahren in diesem Zusammenhang keine Rolle spielen. Eine optimale Anpassung der durch die Zerkleinerungstechnologie erzielten Dispersität des in den Sortierprozess überführten Materials ist ebenso von großer Wichtigkeit. Zwei Wege der Optimierung bieten sich in diesem Zusammenhang an:

- Optimierung der Betriebsparameter eines Prozesses
- Implementierung neuer Technologien

Bei der Implementierung neuer Technologien sollte im Anschluss ebenso eine Optimierung der Betriebsparameter erfolgen.

#### **6.6.2 Sekundärrohstoffe**

Die Aufbereitung von Sekundärrohstoffen besteht – ebenso wie im Primärsektor – in der Aufgabe, den Wertstoff aus dem Reststoff zu extrahieren. Die Notwendigkeit zur Aufbe-

bereitung entsteht auch aus den Anforderungen, die nachfolgende Prozesse an das aufbereitete Konzentrat stellen. Jedoch ergeben sich bei sekundären Rohstoffen ganz besondere Herausforderungen, welche in den Unterpunkten dieses Abschnitts genauer erläutert werden.

Die eingesetzten Verfahren decken hierbei ebenso den gesamten Bereich der klassischen physikalisch mechanischen Trenntechnik ab. Weit verbreitet sind hierbei besonders Magnetscheidungsprozesse sowie sensorgestützte Sortiermethoden. Jedoch ist die Notwendigkeit der Weiterentwicklung klassischer Aufbereitungstechnologien derzeit deutlich ausgeprägter als im Primärbereich, weil die Sekundärrohstoffaufbereitung einen vergleichsweise jungen Forschungszweig darstellt. Erwähnenswert ist hier zum Beispiel der großtechnische Einsatz von Verfahren der Dichtesortierung zur Trennung von Metallgemischen, welche einer Magnetscheidung nicht zugänglich sind, und von Kunststoffgemischen.

#### **6.6.2.1 Schwankende Rohgutzusammensetzung**

Die qualitative sowie die quantitative Zusammensetzung des Rohgutes spielt in Aufbereitungsprozessen eine wichtige Rolle. Im Sekundärbereich stellen Schwankungen dieser Zusammensetzung eine der größten Herausforderungen für die Aufbereitung dar. Dies betrifft sowohl Zerkleinerungs- als auch Sortierprozesse und macht eine Abstimmung des Verfahrens im Vergleich zur Aufbereitung von Primärrohstoffen ungleich schwieriger. Die Technologien müssen für deutlich stärkere Schwankungen in der Zusammensetzung des Rohgutes ausgelegt werden und erreichen daher gesamtheitlich betrachtet noch nicht dieselbe Güte wie dies primärseitig bereits der Fall ist. Dafür sind die Ausgangskonzentrationen der Wertstoffe in Sekundärrohstoffen zum Teil beträchtlich höher, welche sich positiv auf den Prozess auswirken können.

Auch in der sekundärseitigen Rohstoffaufbereitung liegt das Optimierungspotenzial einerseits in der Optimierung der Prozessabläufe und Prozessparameter und andererseits im Speziellen in der Implementierung neuer Technologien. Besonders die in diesen Problemstellungen angewendeten, oft äußerst komplexen Verfahrensketten bieten oftmals Potenzial für Verbesserungen der Abläufe und der Betriebsparameter. Gerade die Implementierung neuer Technologien ist in diesem Feld sehr vielversprechend. Nachfolgend sollen die spezifischen Herausforderungen einer Sekundärrohstoffaufbereitung betrachtet werden.

#### **6.6.2.2 Herausforderungen in der Zerkleinerung**

Die Zerkleinerung sekundärer Rohstoffe stellt oftmals aufgrund der Zusammensetzung des Rohgutes hohe Anforderungen an die Zerkleinerungs- und Klassiertechnik. Die vorhergehende Grobsortierung ist daher ein wichtiger Schritt zur Entlastung der Zerkleinerungskette und der Aufteilung des Rohgutes auf unterschiedliche Aggregate, die den individuellen und verschiedensten Anforderungen, welche die oftmals äußerst unter-

schiedlichen Bestandteile des Rohgutes an diese stellen, gerecht werden. Zur Thematik der Zerkleinerung von Metallspänen in der Aufbereitung sekundärer Rohstoffe wurde eine Dissertation am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung durchgeführt. Die Abbildung 31 zeigt ein Schema der im Zuge dieser Arbeit entwickelten Anlage.



Abbildung 31: Gesamtansicht der Spänezerkleinerungsanlage der Firma Kuttin Recycling [TripleM 04/2012]

Auch die Form der zerkleinerten Partikel spielt oftmals in weiterführenden Sortierprozessen eine wichtige Rolle. Somit ist auch die Erzielung möglichst ähnlicher Partikelformen aus unterschiedlichsten Aufgabematerialien ein wichtiger Aspekt der Zerkleinerung von Sekundärrohstoffen [Zhang und Forssberg 1997].

### 6.6.2.3 Elektronikschrott und Schredder-Leichtfraktion

Wichtige Anwendungsgebiete der in dieser Studie betrachteten Rohstoffe stellen die Elektro- und Elektronikindustrie dar. Daher ist eine wesentliche potenzielle sekundäre Rohstoffquelle für diese Materialien der Elektronikschrott. Aufgrund der immer stärker werdenden Rolle, welche elektronische sowie elektrische Bauteile in der Automobilindustrie spielen, ist aber auch die Schredder-Leichtfraktion aus der Automobilverwertung ein potenzieller Rohstofflieferant. Die Abbildung 32 und Abbildung 33 zeigen zwei im Einsatz befindliche Verfahrensgänge zur Aufbereitung von Elektronikschrott, welche auch im Zuge einer die Thematik der Aufbereitung von Elektroschrott behandelnden Masterarbeit am Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung erörtert wurden [Schwarz 2013].

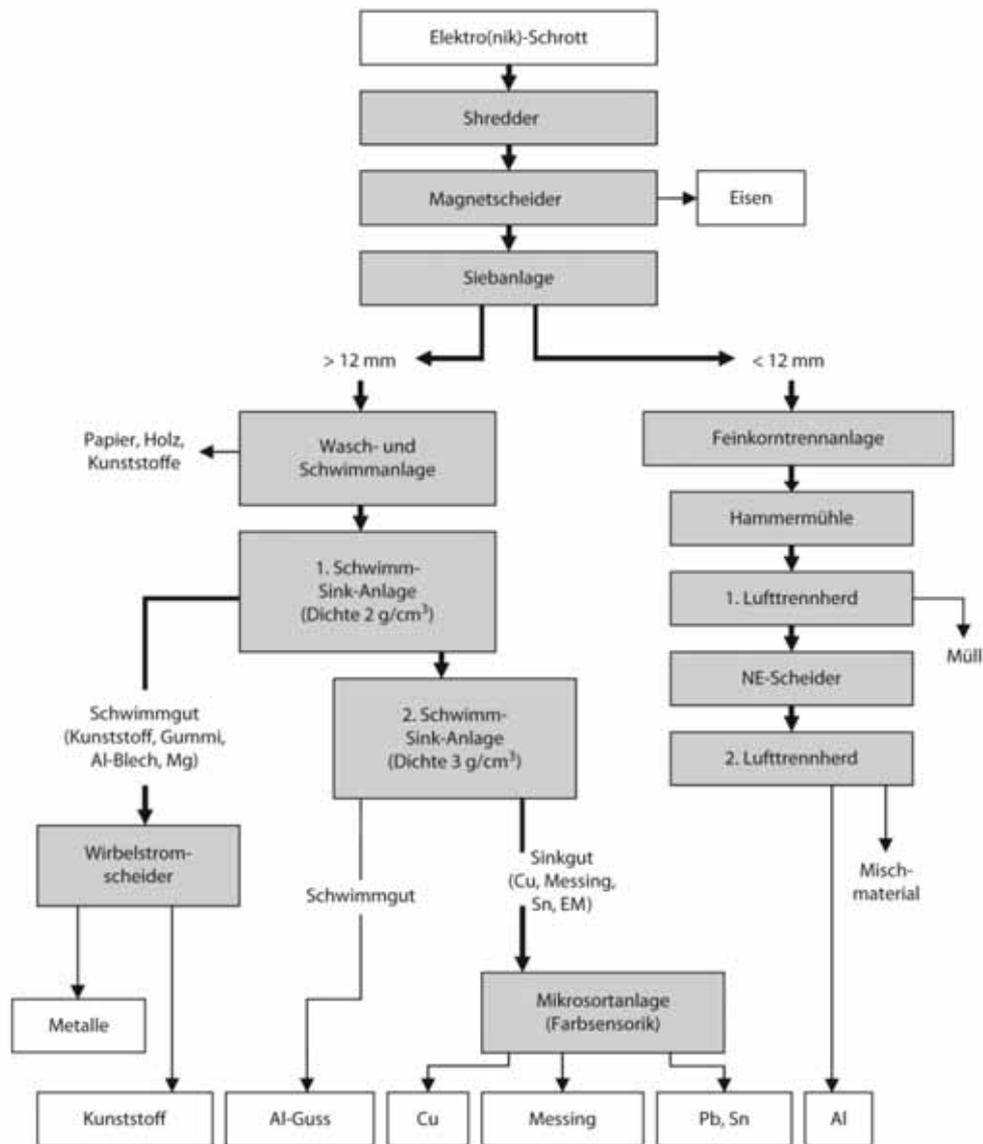


Abbildung 32: Verschaltung für die Aufbereitung von Elektrokleingeräte [Schwarz 2013]

Die im vorigen Abschnitt genannten Herausforderungen treffen auf diese Sekundärrohstoffquellen in vollem Umfang zu. Die Zusammensetzung des Rohgutes im Falle von Elektroschrott aus besonders harten metallischen Teilen in einer Mischung mit Kunststoffen und Isolationsmaterialien fordert besondere mehrstufige Zerkleinerungsketten mit zwischengeschalteten Sortierprozessen [Zhang und Forssberg 1997]. So werden zum Beispiel besondere Schneidmühlen eingesetzt, um Kabelmaterial in einer Form zu zerkleinern, welche eine Auftrennung in die isolierenden Kunststoffe und die metallischen Bestandteile herbeiführt. Im Falle der Aufbereitung von Schredder-Leichtfraktionen kommen noch andere Herausforderungen aufgrund einer noch breiteren Materialdiversität im Automobilbau hinzu. So stellt zum Beispiel die Abtrennung von Polster- und Stoffmaterialien eine wichtige Aufgabenstellung für derartige Anlagen dar [Kurose et al. 2006].

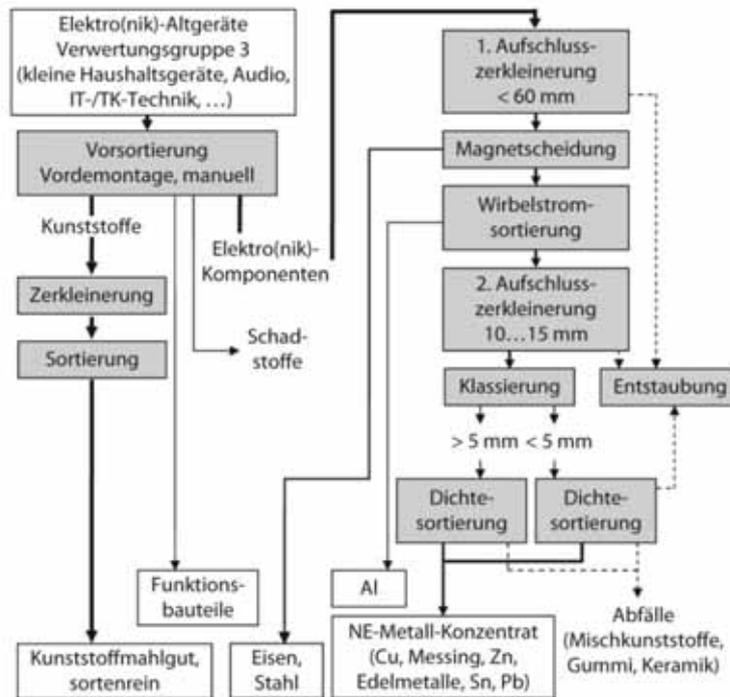


Abbildung 33: Alternative Verschaltung für die Aufbereitung von Elektrokleingeräten [Schwarz 2013]

## 6.7 Literaturverzeichnis

- Bernhart, W., 2002: Aufbereitung von Scheeliterzen. Stand der Technik. BHM, 147, 187–190.
- Bernhart, W., 2012: Skriptum zu Erzaufbereitung, Kapitel Wolfram. Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung, Leoben.
- Chegwidden, J. und D. J. Kingsnorth, 2002: Rare Earths supply and demand. Industrial Minerals, April 2002, London.
- Fisher, K. G., 2011: Cobalt Processing Developments. Proceedings to the 6<sup>th</sup> Southern African Base Metals Conference, 237–258.
- Flachberger, H. et al., 2010: Aufbereitung in Österreich (Festschrift); Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung, Montanuniversität Leoben.
- Johnson, N. L., 1966: Rare Earth Concentration at Molybdenum Corporation of America Part One. Deco Trefoil, August-September-October, Bulletin No. M4–B128.
- Kurose, K. et al., 2006: Heavy metals removal from automobile shredder residues (ASR), Journal of Hazardous Materials, B137, 1618–1623.
- Meckelburg, E., 1974: Seltene Metalle. Blaue TR-Reihe, Heft III, Techn. Rundschau in Hallwaag Verlag, Bern, Stuttgart 1974.
- Mineralienatlas: Internet: <http://www.mineralienatlas.de> (Stand April 2012).
- Mortimer, C. E., 1996: Chemie. 6. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart.

- Richter, H. und K. Schermanz, 2006: Seltene Erden. In: Winnacker/Küchler. Chemische Technik: Prozesse und Produkte, Band 6b: Metalle. Weinheim, Deutschland: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Schubert, H., 1989: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe Band 1; Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- Schubert, H., 2003: Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik; Wiley-VCH Verlag, Weinheim.
- Schwarz, H., 2013: Aufbereitungstechnische Untersuchungen zu Optimierungs- und Erweiterungspotentialen einer Aufbereitungsanlage für Elektronik- und Elektroaltgeräte, Lehrstuhl für Aufbereitung und Veredlung, Montanuniversität Leoben.
- Shedd, K. B., 2008: Cobalt. U.S. Geological Survey, Minerals Yearbook 2008 TripleM 04/2012: Montanuniversität Leoben.
- Wikipedia: Internet: <http://de.wikipedia.org> (Stand April 2012)
- Zhang S. und E. Forssberg, 1997: Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap; Resources, conservation and recycling, 21, 247–269.

## 7. Primärmetallurgie

Für die derzeit üblichen Herstellungsrouten der Technologiemetalle aus Erzen und Konzentraten stehen im Bereich der Metallurgie grundsätzlich gut entwickelte Technologien und Prozesse zur Verfügung. Dennoch lässt sich die Primärproduktion dieser Elemente bei einem enorm steigend Bedarf an diesen Metallen nicht ohne weiteres im entsprechenden Ausmaß erhöhen, weil hierbei mehrere Einschränkungen zu berücksichtigen sind. Ein Grund dafür ergibt sich daraus, dass einige dieser Elemente (wie beispielsweise Indium oder Gallium) keine eigenständigen Erze bilden, sondern sich nur als Nebenprodukte von anderen Metallen (Blei, Zink, Aluminium, etc.) gewinnen lassen. Zusätzlich sind die Bergbau- und Hüttenbetriebe oftmals auf die klassischen Massenmetalle ausgerichtet, während die weiteren Wertmetalle bisher kaum Berücksichtigung fanden (Abbildung 34). [Luidold 2012]

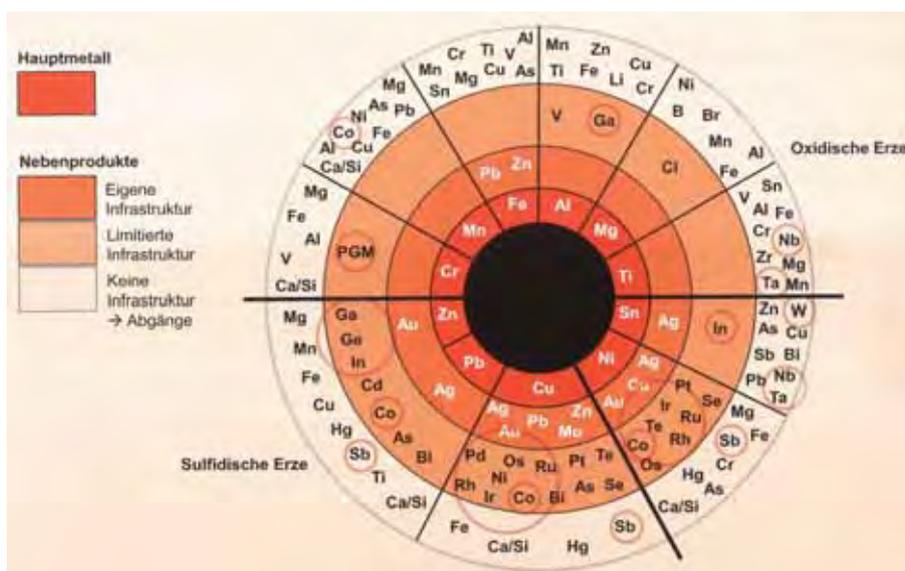


Abbildung 34: Das Metallrad – Verknüpfung von Hauptmetallen und Nebenprodukten in Erzlagerstätten nach Verhoef et al. (2008) und Reuter et al. (2005) . Eingekreist sind die von der Europäischen Kommission derzeit als kritisch identifizierten Rohstoffe. [Wellmer 2012]

Der innerste Ring des Metallrads beinhaltet die Hauptmetalle, auf welche die Bergbau- und Hüttenbetriebe ausgerichtet sind. In den weiteren Ringen folgen jeweils die mit den betreffenden Hauptelementen verknüpften Nebenmetalle. Der zweite Ring von innen listet diejenigen Metalle auf, welche fast ausnahmslos mitgewonnen werden und die auch bei der Auslegung der Infrastruktur Berücksichtigung fanden. Daran anschließend folgt der Ring mit Nebenelementen, welche zwar oftmals wertvolle Metalle darstellen, die beispielsweise in der Elektronik von Bedeutung sind, für deren Herstellung aber nur eine eingeschränkte Infrastruktur vorhanden ist. Im äußersten Ring befinden sich letztendlich jene Nebenmetalle,

welche in den Aufbereitungsabgängen, Rückständen oder Schlacken verbleiben und in der Regel nicht mitgewonnen werden.

Auch wenn, wie bereits vorhin erwähnt, für die Primärgewinnung der Technologiemetalle grundsätzlich gut entwickelte Technologien und Methoden zur Verfügung stehen, gibt es auch in diesem Bereich noch enormen Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Dieser ergibt sich unter anderem daraus, dass die stetig steigenden Anforderungen seitens der Anwendungen neue Herstellungstechnologien erfordern und dass der mit der Gewinnung verbundene oftmals extrem hohe spezifische Energiebedarf gesenkt werden sollte. Um diese Technologieentwicklung systematisch und effizient durchführen zu können, sind auch noch entsprechende Grundlagenarbeiten notwendig, weil gerade im Bereich der kritischen Rohstoffe beispielsweise die thermodynamischen Datenbanken lückenhaft sind oder überhaupt noch fehlen (z.B. Schlackensysteme mit Refraktärmetallen oder Seltenen Erden). Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass durch den steigenden Bedarf an diesen kritischen Rohstoffen sich deren Nachfrage selbst bei einer optimalen Kreislaufwirtschaft nicht vollständig über das Recycling abdecken lässt, sondern zwingend die Primärgewinnung benötigt. Außerdem besteht die Rückgewinnung dieser Rohstoffe aus gebrauchten Konsumgütern, Reststoffen, Produktionsabfällen, etc. zumeist darin, diese nach einer mehr oder wenig aufwändigen Aufbereitung und Vorbehandlung in die Primärmetallurgie einzuschleusen.

Bevor nachfolgend auf die Primärmetallurgie einzelner Metalle eingegangen wird, soll noch Erwähnung finden, dass die kritischen Rohstoffe mit den Elementgruppen Seltene Erden (Y, La, Ce, Nd, Eu ...), Refraktärmetalle (W, Mo, Nb, Ta ...) und Edelmetalle (Ag, Au, Pt, Pd ...) sowie einigen weiteren Metallen (Co, Sb, In, Ga, Ge ...) hinsichtlich ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften eine extreme Bandbreite abbilden. Daraus ergibt sich in weiterer Folge, dass für deren Gewinnung nicht einige wenige klassische Prozesse ausreichen, sondern eine enorme Vielzahl an unterschiedlichsten Verfahren und Methoden heranzuziehen sind.

## **7.1 Gewinnung der Refraktärmetalle**

Unter den Begriff Refraktärmetalle wird eine Gruppe von hochschmelzenden, unedlen Metallen zusammengefasst, welche bei Raumtemperatur auf Grund von Passivierung relativ korrosionsbeständig sind jedoch bei hohen Temperaturen leicht mit vielen Nichtmetallen reagieren. Darunter befinden sich zumindest die in Tabelle 41 grau hinterlegten Elemente. Entsprechend ihrer Definition fallen auch noch Technetium und Rhenium darunter, wobei ersteres keine technische Anwendung besitzt (alle Tc-Isotope sind radioaktiv) und letzteres zum Teil ebenso als Refraktärmetall bezeichnet wird. Darüber hinaus wird manchmal auch

Titan ebenso in diese Gruppe aufgenommen, weil es trotz des geringeren Schmelzpunktes einerseits vergleichbare Eigenschaften aufweist und dessen Gewinnung in Analogie zu der Herstellung von Zirkonium und Hafnium (Kroll-Prozess) erfolgt [Luidold 2012].

Tabelle 41: Position der Refraktärmetalle im Periodensystem der Elemente [PSE 2012]

47,9	50,9	52,0	54,9	<b>Molmasse</b>
Ti	V	Cr	Mn	<b>Symbol</b>
1.660	1.890	1.857	1.244	<b>T<sub>s</sub> [°C]</b>
91,2	92,9	96,0	98,9	<b>Molmasse</b>
Zr	Nb	Mo	Tc	<b>Symbol</b>
1.852	2.468	2.617	2.172	<b>T<sub>s</sub> [°C]</b>
178,5	180,9	183,8	186,2	<b>Molmasse</b>
Hf	Ta	W	Re	<b>Symbol</b>
2.227	2.996	3.410	3.180	<b>T<sub>s</sub> [°C]</b>

Aufgrund ihrer typischen Eigenschaften erfolgt die Gewinnung der Refraktärmetalle aus den Erzen, Konzentraten oder auch Sekundärrohstoffen entsprechend dem Schema in Abbildung 35 zuerst über hydrometallurgische Prozessschritte, um reine Verbindungen zu erhalten, welche sich anschließend über pulvermetallurgische Methoden bis zum Halbzeug oder Fertigteil weiter verarbeiten lassen.

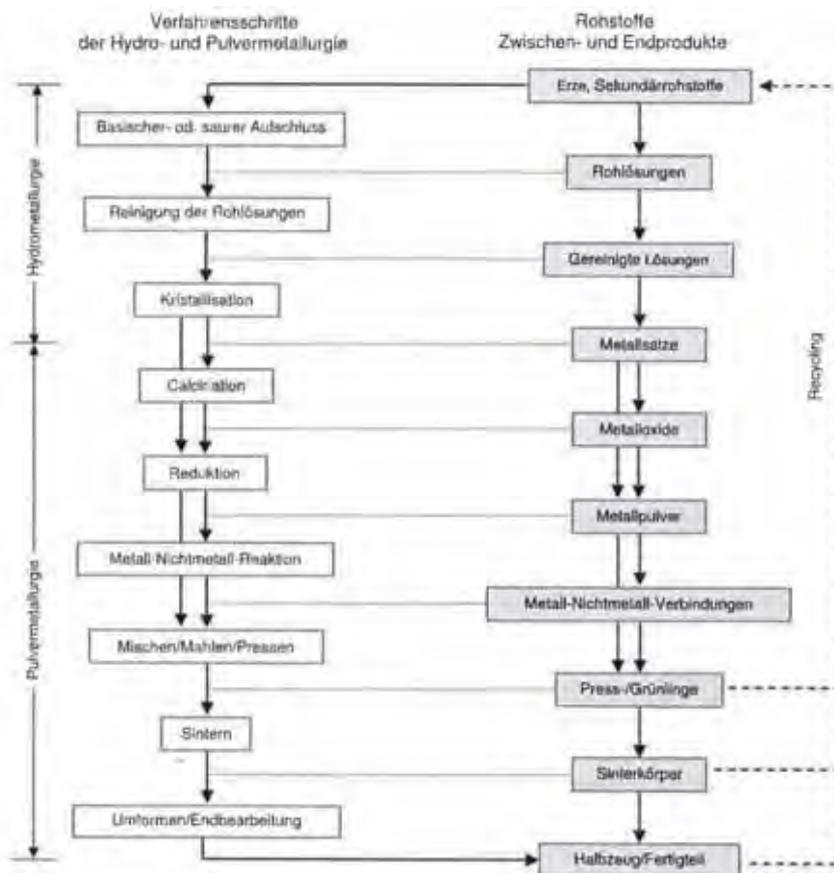


Abbildung 35: Fließbild zur Gewinnung der Refraktärmetalle [Gille et al. 2006]

## 7.1.1 Produktion von Wolfram

Nachdem Wolfram in der Natur ausschließlich in Form von Verbindungen auftritt, von denen für die industrielle Gewinnung nur Scheelit,  $\text{CaWO}_4$ , und Wolframit,  $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4$ , von Bedeutung sind, erfolgt nach der Aufbereitung der Erze (Feinmahlung, etc.) ein Druckaufschluss, um das Wolfram in Lösung zu bringen und die Gangart bzw. zumindest einen Teil der Verunreinigungen als unlöslichen Rückstand in der anschließenden Filtration abzutrennen (Abbildung 36). In diese Route lassen sich nach einer geeigneten Vorbehandlung auch die unterschiedlichen Reststoffe (Hartmetall-Weichschrott, etc.) einbringen. Während der Reststoff, welcher bei der Verarbeitung der Erzkonzentrate anfällt, im Wesentlichen Eisen, Mangan und Calcium enthält und somit zu deponieren ist, kann der unlösliche Rückstand aus der Aufarbeitung von Sekundärrohstoffen aufgrund seiner Gehalte an Cobalt, Nickel, Tantal, etc. unter Umständen einer weiteren Verwertung zugeführt werden.

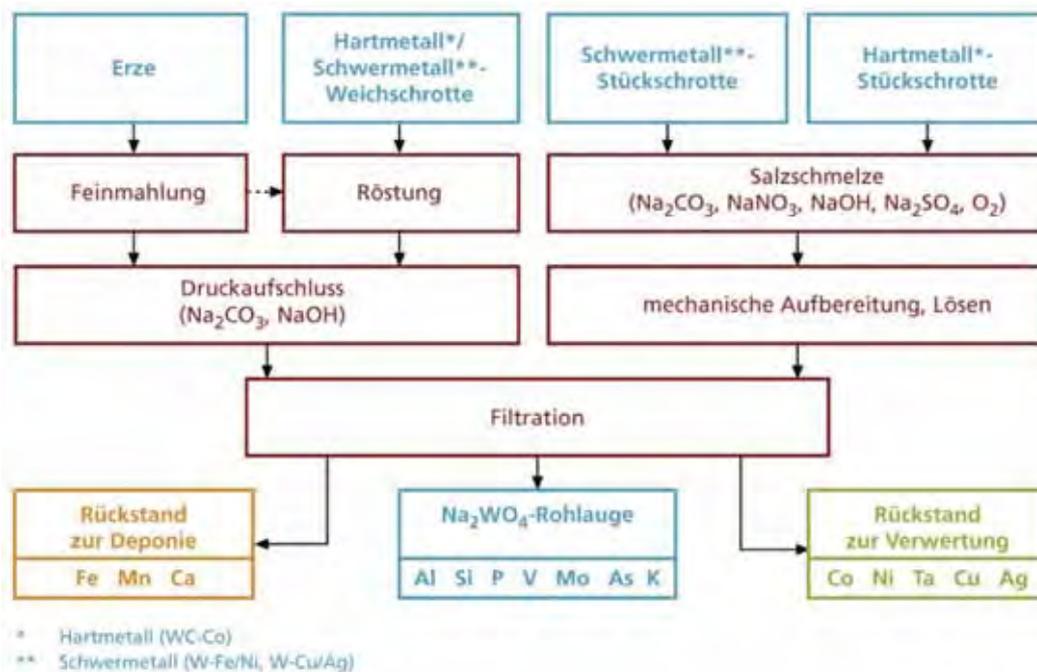


Abbildung 36: Aufschluss der W-hältigen Rohstoffe zu einer Natriumwolframat-Lösung [Gille und Meier 2012]

Um aus der  $\text{Na}_2\text{WO}_4$ -Lösung letztendlich reines Wolfram zu erhalten (Abbildung 37), müssen zuerst in zwei Reinigungsschritten die störenden Verunreinigungen durch Fällung und Filtration entfernt werden, bevor sich in der anschließenden Solventextraktion die Natriumionen durch Ammoniumionen ersetzen lassen. Dieser Schritt ist notwendig, da dadurch das in weiterer Folge aus der Kristallisation erhaltene Ammoniumparawolframat mittels Kalzination in ein Oxid überführbar ist, welches wiederum als Ausgangsstoff für die Reduktion zum Wolframpulver dient. Durch Karburierung erhält man abschließend aus

letzterem ein Wolframkarbid-Pulver als Grundstoff für das bedeutendste Anwendungsgebiet von Wolfram, den Hartmetallen.

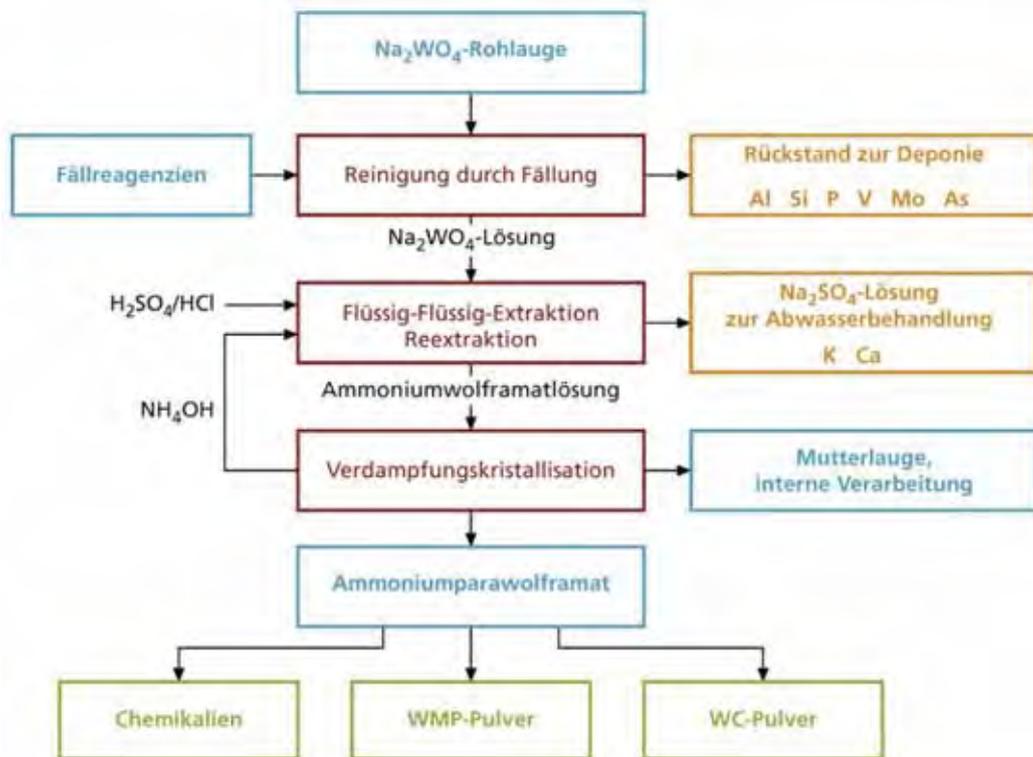


Abbildung 37: Verarbeitung der Natriumwolframat-Lösung zu Wolfram, Wolframkarbid oder W-hältigen Chemikalien [Gille und Meier 2012]

Nachdem an die Pulver üblicherweise bezüglich Reinheit sehr hohe Anforderungen gestellt werden (Tabelle 42), ergeben sich an die Prozessführung als auch an die Qualität der eingesetzten Rohstoffe entsprechende Ansprüche, um die jeweiligen Spezifikationen einhalten zu können.

Tabelle 42: Typische Analyse zweier Wolfram-Pulver [WBH 2013]

		<b>W05-10</b>	<b>W25-50</b>
Spez. Oberfläche	[m <sup>2</sup> /g]	3,19	-
Korngröße (FSSS)	[µm]	0,99	2,68
Al	[ppm]	< 5	< 5
Ca	[ppm]	< 2	< 2
Co	[ppm]	< 5	< 5
Fe	[ppm]	< 5	< 5
Mo	[ppm]	< 20	< 20
Ni	[ppm]	< 5	< 5
O	[ppm]	2.650	330
S	[ppm]	< 5	< 5
Si	[ppm]	< 10	< 10

## 7.1.2 Produktion von Niob und Tantal

Während grundsätzlich die Verarbeitung der Nb- bzw. Ta-Rohstoffe über die jeweiligen Zwischenprodukte (Abbildung 38) zu den verschiedenen Erzeugnissen eine entsprechende Ähnlichkeit zur extraktiven Metallurgie von Wolfram aufweist, gibt es im Detail doch einige wesentliche Unterschiede. Diesbezüglich ist vor allem die Solventextraktion zu nennen, deren Hauptaufgabe in diesem Falle vor allem in der Trennung der chemisch sehr ähnlichen und zumeist gemeinsam auftretenden Metalle Niob und Tantal liegt. Es lassen sich auch metallische Abfälle aus der Pulver- oder Schmelzmetallurgie in den Prozess einschleusen, wobei diese jedoch vorab zu oxidieren sind und wiederum die hydrometallurgischen Prozessschritte (Lösen, Reinigung der Lösung, Extraktion, etc.) durchlaufen müssen, sofern sie nicht eine ausreichende Reinheit besitzen [Gille und Meier 2012].

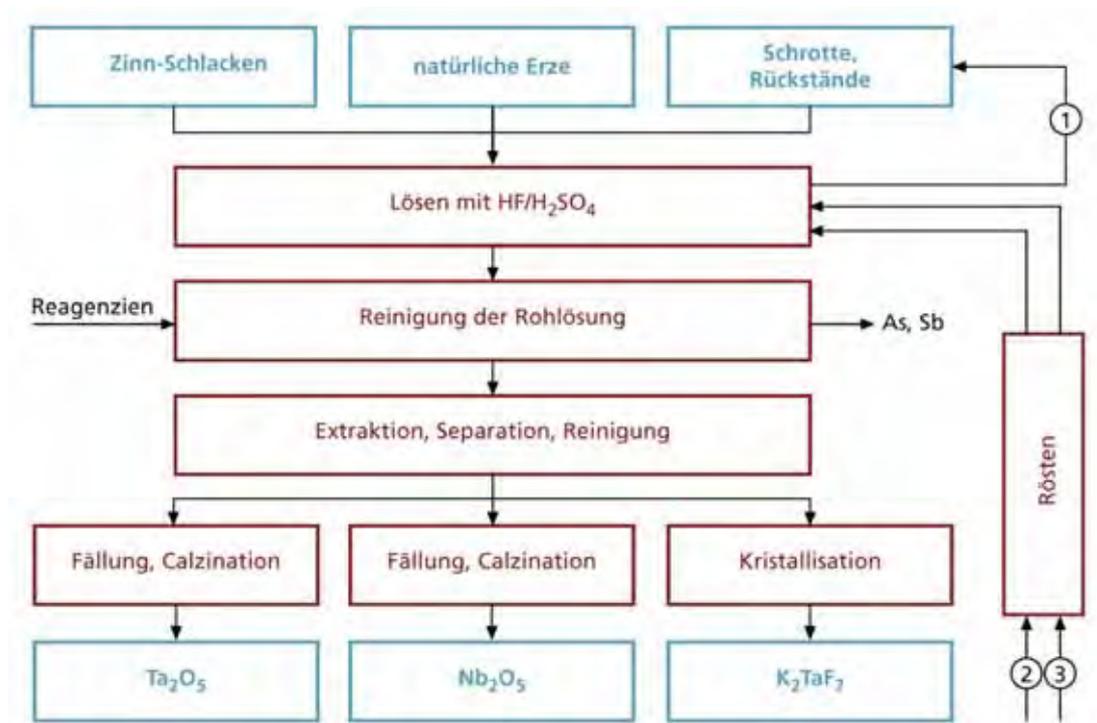


Abbildung 38: Herstellung reiner Nb- bzw. Ta-Verbindungen als Ausgangsmaterial für die Reduktionsprozesse [Gille und Meier 2012]

Während in der Vergangenheit die Produktion von Ta-Pulver über die Reduktion eines Tantalosalzes (K<sub>2</sub>TaF<sub>7</sub>) mittels Natrium erfolgte, wurde in den letzten Jahren die Reduktion von Tantaloxid durch gasförmiges Magnesium entwickelt (Abbildung 39), um den Trend zu hoch- und höchstkapazitiven Kondensatorpulver zu folgen, welche zunehmend feinere Pulverqualitäten (Abbildung 40) erfordern [Gille und Meier 2012].

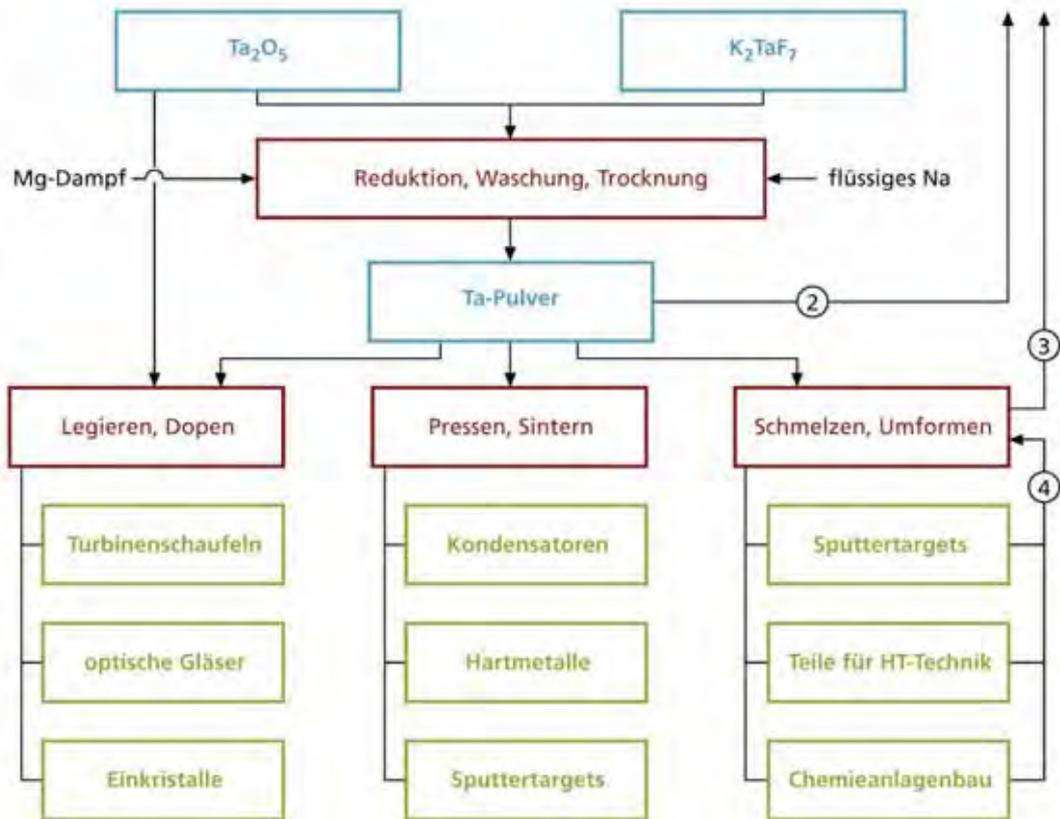


Abbildung 39: Grundsätzliche Verarbeitungswege der Ta-Verbindungen zu den jeweiligen Produkten [Gille und Meier 2012]

Die "GORDON-MOORE"-Kurve für Ta-Kondensatoren (10  $\mu\text{F}$  / 16 V)

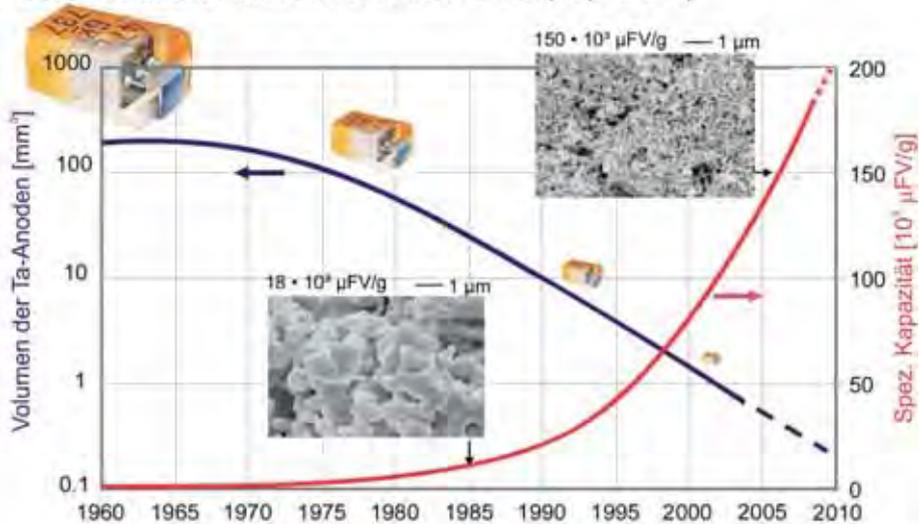


Abbildung 40: Historische Entwicklung der Bauteilgröße von Ta-Kondensatoren [Gille und Van den Berg 2010]

## 7.2 Gewinnung der Seltenen Erden

Nachdem die Vorkommen der Seltenen Erden praktisch ausschließlich polymetallische Lagerstätten darstellen, in denen nicht nur die einzelnen Elemente der Seltenen Erden in stark unterschiedlichen Gehalten vorliegen, sondern darüber hinaus auch noch zahlreiche weitere Metalle enthalten sind, stellt der Aufschluss der Konzentrate und die Trennung der jeweiligen Elemente voneinander eine enorme Herausforderung dar. Stellvertretend für die zahlreichen Prozessvarianten der unterschiedlichen SE-haltigen Konzentrate zeigt die Abbildung 41 ein Fließbild für die Verarbeitung von Bastnäsit, einem SE-Fluorkarbonat welches geringe Mengen an Thorium und Uran enthalten kann, und Abbildung 42 ein Schema für die Behandlung von Monazit, einem SE/Th-Phosphat. Aus diesem Grund ist mit deren Aufbereitung auch die Handhabung radioaktiver Substanzen verbunden, die entsprechend sorgfältig abgetrennt und zumeist aufwändig entsorgt werden müssen.

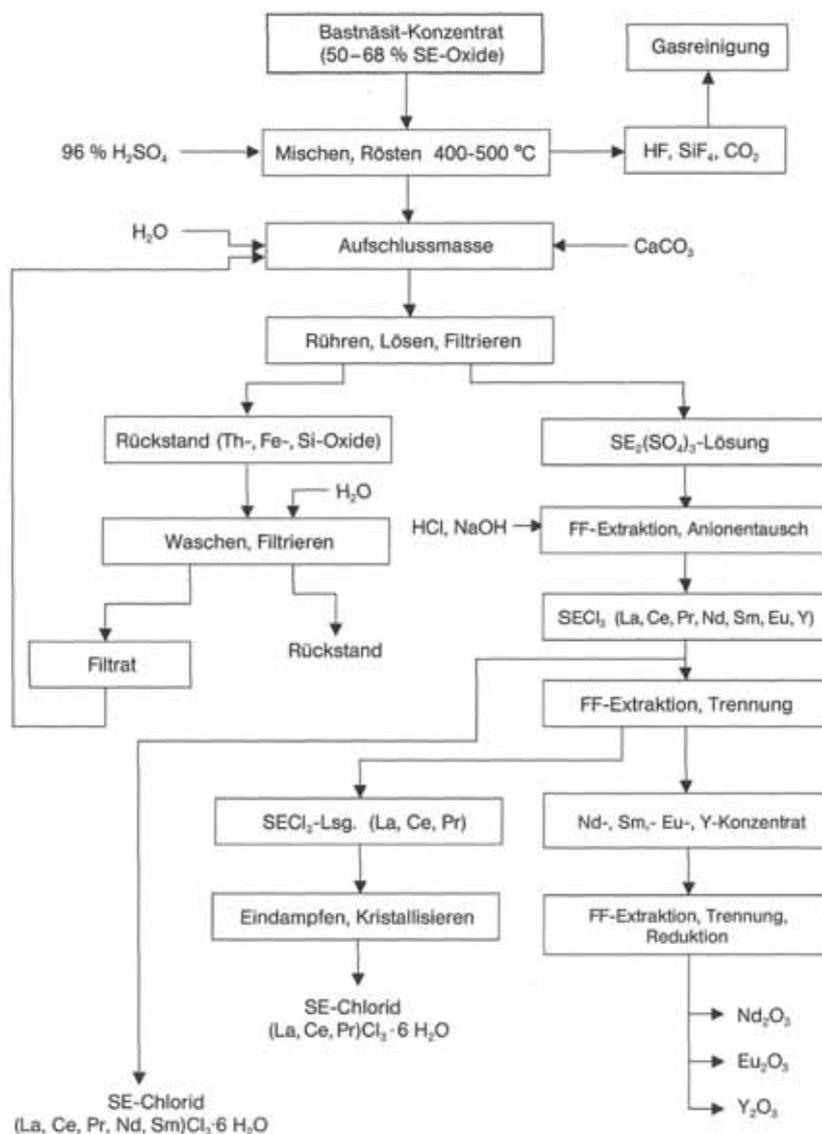


Abbildung 41: Verarbeitung von Bastnäsit (Baotou) in China [Richter und Schermanz 2006]

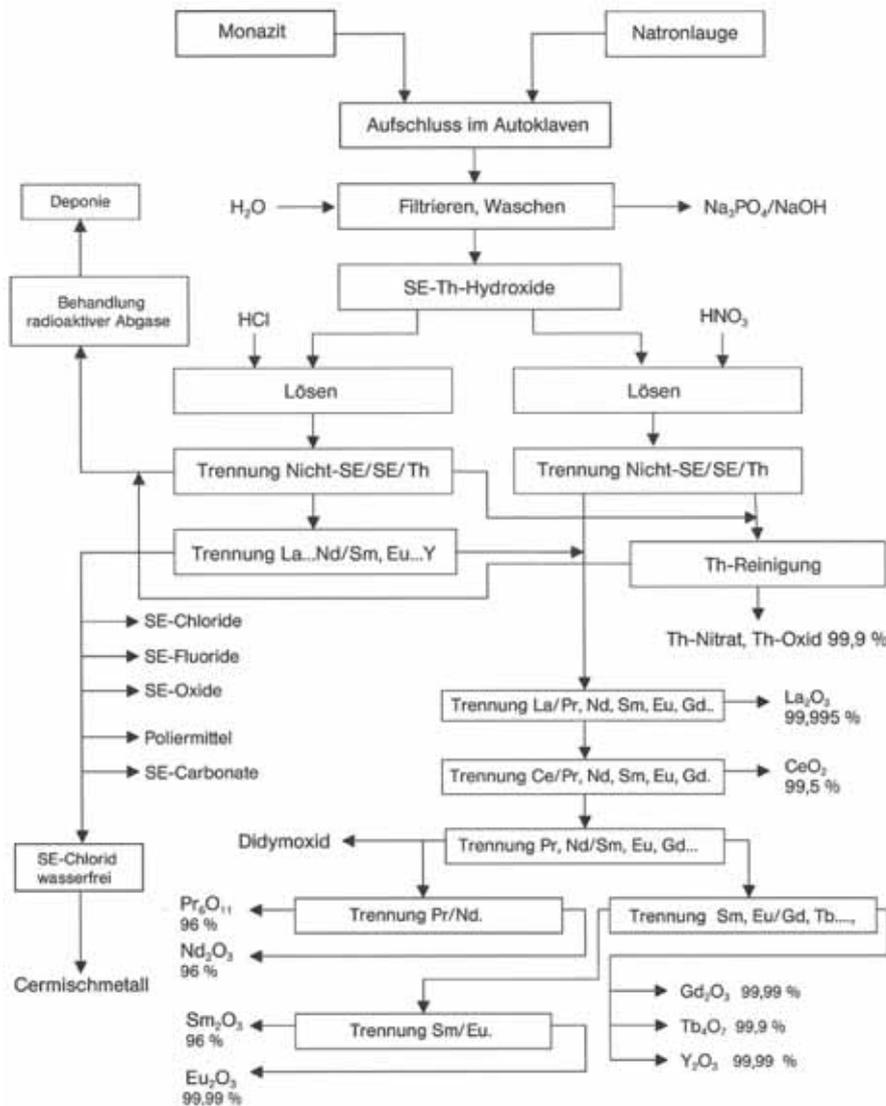


Abbildung 42: Verwertung von Monazit bei Rhone Poulenc / Rhodia [Richter und Schermanz 2006]

Das Bastnäsit-Konzentrat mit einem Gehalt von rund 60 % SE-Oxid der Molycorp (Mountain Pass, USA), welches aus der mechanischen Aufbereitung (brechen, mahlen, flotieren) erhalten wurde, stellt bereits ein Verkaufsprodukt für andere Verarbeiter oder Zwischenprodukt für die Weiterverarbeitung in eigenen Werken dar. Aus diesem lassen sich durch selektives Herauslösen der Erdalkalien mit Salzsäure und anschließender Kalzination Konzentrate mit über 90 % SE-Oxid als Handelsprodukt erhalten. Aus der nachfolgenden Laugung in Salzsäure resultieren einerseits eine SE-Chloridlösung und andererseits ein Cer-Konzentrat als fester Rückstand. Während erstere entweder zahlreiche Trennungsprozesse durchläuft, um einzelne SE-Oxide zu gewinnen, oder als Ausgangsmaterial für Lanthan-konzentrat Verwendung findet, dient letzteres zur Produktion von Ceroxid und -salzen. [Richter und Schermanz 2006]

Im Gegensatz zu den anderen Mineralen findet der Aufschluss von Loparit auch durch Chlorierung unter Zusatz von Kohlenstoff bei 750–850 °C statt. Hierbei führen die zum Teil

stark unterschiedlichen Dampfdrücke der jeweiligen Verbindungen zu einer Trennung der bei niedrigen Temperaturen verdampfenden Chloride ( $\text{NbCl}_5$ ,  $\text{NbOCl}_3$ ,  $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{TaCl}_5$ ,  $\text{TiCl}_4$ ,  $\text{FeCl}_3$  und  $\text{SiCl}_4$ ) von der SE/Ca/Na-Schmelze. Diese dient beispielsweise direkt zur Gewinnung von Mischmetall mittels Schmelzflusselektrolyse oder als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Ceroxid-Poliermittel und reinen SE-Salzen (Abbildung 43). [Richter und Schermanz 2006]

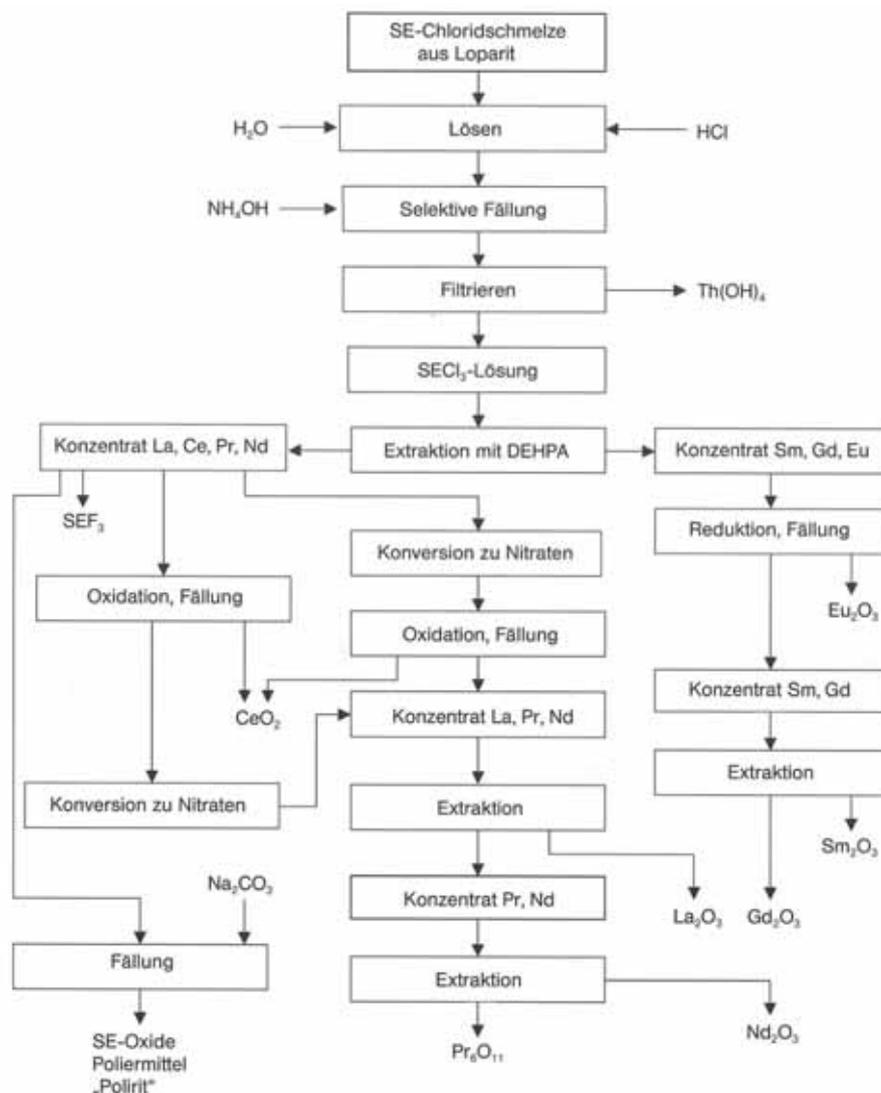


Abbildung 43: Trennung von Seltenen Erden aus Loparit-Konzentrat in Russland [Richter und Schermanz 2006]

Die Trennung der einzelnen Metalle der Seltenen Erden voneinander ist aufgrund ihrer großen chemischen Ähnlichkeit entsprechend schwierig und aufwändig. Während sich Cer und Europium noch einigermaßen leicht sowie Samarium und Ytterbium mäßig durch die Änderung ihrer Wertigkeiten abtrennen lassen, führt eine Prozessstufe bei der Trennung der übrigen, dreiwertigen SE-Elementen nur zu geringfügigen Verschiebungen der Konzentrationsverhältnisse, weshalb für die Erzielung reiner Verbindungen eine sehr hohe Anzahl von

Trennstufen benötigt wird. Neben den gängigen Methoden, wie fraktionierte Kristallisation bzw. Fällung, thermische Zersetzung sowie Oxidations- bzw. Reduktionsverfahren, haben sich im Industriemaßstab vor allem der Ionenaustausch sowie die Solventextraktion (Flüssig/flüssig-Extraktion) durchgesetzt. Das letztere Verfahren verfügt über den Vorteil, dass es wesentlich höhere Durchsätze bei relativ kleinen Apparaturen sowie Lösungen mit viel höheren Konzentrationen erlaubt, woraus bedeutend bessere Raum-Zeit-Ausbeuten resultieren. Ionenaustauschprozesse finden deshalb jetzt vor allem noch für spezielle Fälle Verwendung, wenn kleinere Mengen einzelner SE mit besonders hoher Reinheit (6N bis 8N) herzustellen sind. Für die Solventextraktion im Industriemaßstab werden zumeist Mixer-Settler-Extraktoren (Abbildung 44) in Gruppen von 10 bis 100 Stufen eingesetzt. Beispielsweise verfügt die Anlage von Rhodia in La Rochelle über etwa 1000 derartige Einheiten, womit sich fast alle Komponenten des Gemischs gewinnen lassen. Während in China Anlagen ähnlicher Größenordnung in Betrieb sind, reichen für die Abtrennung einzelner Seltener Erden aber bereits etwa 100 Extraktoren. [Richter und Schermanz 2006]

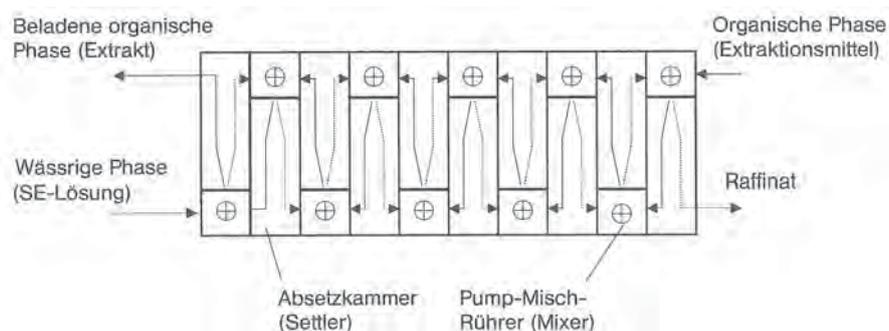


Abbildung 44: Prinzipschema eines Blocks von Flüssig/flüssig-Extraktoren (Mixer-Settler) [Richter und Schermanz 2006]

### 7.3 Produktion von Edelmetallen

Aufgrund ihrer hohen Oxidationsbeständigkeit, ihres wirtschaftlichen Wertes und der benachbarten Position im Periodensystem werden die Elemente Silber, Gold und die Platingruppenmetalle (Platin, Palladium, Rhodium, Iridium, Osmium sowie Ruthenium) zur Gruppe der Edelmetalle zusammengefasst. Ihre durchschnittliche Konzentration in der Erdkruste liegt zwischen 0,001 ppm für Iridium sowie Rhodium und 0,07 ppm für Silber [Beck et al. 1995].

Für ihre Primärgewinnung stehen grundsätzlich gut entwickelte Verfahrenstechnologien zur Verfügung, weil die industrielle Produktion aus Erzen und Konzentraten bereits seit sehr langer Zeit erfolgt. Während auch Cu/Ni- und Ag/Au-Erze als primäre Rohstoffquelle in Frage kommen, stellt Silber derzeit in erster Linie ein Nebenprodukt der Verarbeitung von Blei- bzw. Blei/Zink-Erzen dar. Hierbei folgt das Silber zunächst dem Blei und wird erst im Anschluss an die Reduktion im Bereich der Raffination durch Einrühren von Zink in die Blei-

schmelze zur Ausscheidung von Zinkschaum (Zn/Ag-Mischkristall) von diesem abgetrennt (Raffination mittels Parkes-Verfahren) und durch die nachfolgende Oxidation des Bleis (Treibarbeit) und Raffinationselektrolyse (Möbius-Elektrolyse) weiterverarbeitet. Die Gewinnung von Gold aus den Erzen kann unter anderem durch die klassische Cyanidlaugung erfolgen. Dazu wird das feingemahlene Erz unter Einleitung von Luft mit einer Natriumcyanid-Lösung behandelt, wodurch das Gold in Lösung geht. Nach der Abtrennung des unlöslichen Rückstands lässt sich das Edelmetall mittels Zink zementieren oder an Aktivkohle adsorbieren und der erhaltene Feststoff in weiterer Folge durch Behandlung mit Schwefelsäure und Röstung an Luft sowie Einschmelzen unter Zusatz von Flussmitteln zu Rohgold verarbeiten. Durch entsprechende Raffinationsverfahren (nasschemische Raffination, Millerprozess bzw. Wohlwill-Elektrolyse) entsteht daraus letztendlich Feingold mit einer Reinheit von 99,99 %. [Beck et al. 1995]

Nachdem die Platingruppenmetalle (PGM) in den natürlichen Lagerstätten gemeinsam auftreten und zusätzlich oftmals mit Gold und Silber sowie Nickel aus auch Kupfer vergesellschaftet sind, ist für die Gewinnung der individuellen Elemente eine entsprechend aufwändige Prozesskette notwendig. Die feingemahlene Erze werden hierbei in einem ersten Schritt vorwiegend mittels Flotation aufbereitet und in Elektrolichtbogenöfen zu einer eisenhaltigen Silikatschlacke sowie einem edelmetallhaltigen Kupferstein geschmolzen. Letzterer lässt sich in Peirce-Smith- oder TBR-Konvertern entschwefeln und nach einer weiteren Fe-Abtrennung (Fayalitschlacke) in Blöcke abgießen. Durch langsames, kontrolliertes Abkühlen über zwei bis fünf Tage entstehen zwei Phasen, wobei in der feinkristallinen, metallischen Ni/Co/Fe-Phase die PGMs mit bis zu 98 % Ausbeute angereichert sind. Nach einer Mahlung und Magnetscheidung löst eine Drucklaugung mit  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{O}_2$  die Buntmetalle aus der magnetischen Fraktion, während das verbleibende Konzentrat (40–90 % PGM) in die Feinscheidung gelangt. [Brumby et al. 2006]

Um die einzelnen Elemente der Platingruppenmetalle voneinander zu trennen, lassen sich neben unterschiedlichen selektiven Lösungs- und Fällungsstufen (siehe Abbildung 45) auch verschiedene Solventextraktions- bzw. Ionenaustauschverfahren nutzen. Zur Gewinnung der individuellen Platingruppenmetalle erfolgt abschließend noch eine thermische Zersetzung bzw. Reduktion der entsprechenden Salze, für welche zumeist eine Wasserstoffatmosphäre Verwendung findet.

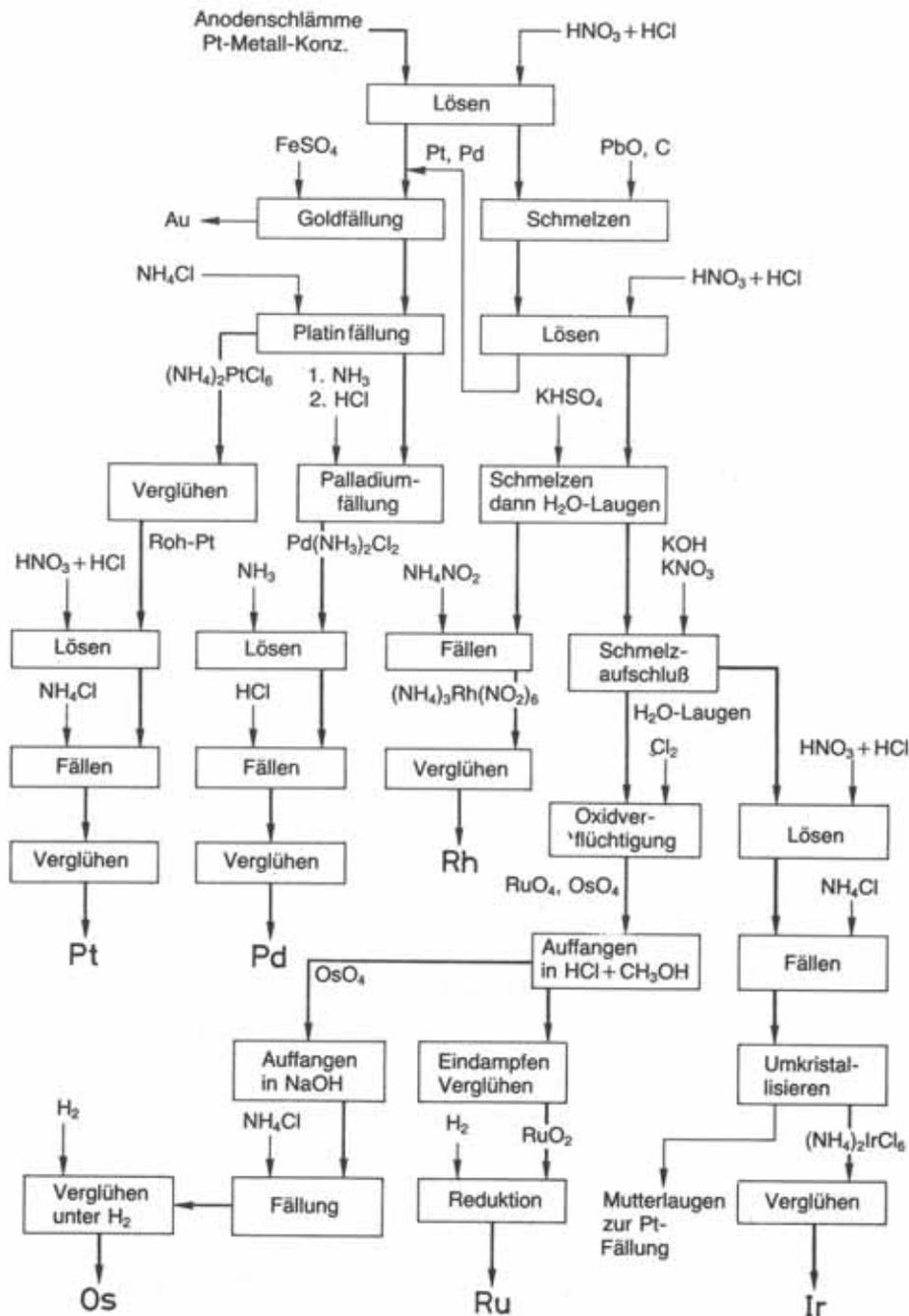


Abbildung 45: Stammbaum eines Verfahrens zur Trennung der PGMs [Pawlek 1982]

## 7.4 Literatur

Beck, G. et al., 1995: Edelmetall-Taschenbuch. Heidelberg, Deutschland: Hüthig-Verlag.

Brumby, A. et al., 2006: Edelmetalle. In: Chemische Technik – Prozesse und Produkte, 6b – Metalle. Weinheim, Deutschland: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Gille, G. et al., 2006: Die Refraktärmetalle Niob, Tantal, Wolfram, Molybdän und Rhenium. In: Chemische Technik: Prozesse und Produkte, 6b. Weinheim, Deutschland: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

- Gille, G. und H. Van den Berg, 2010: Refraktärmetalle – Unverzichtbare Werkstoffe für Schlüssel- und Zukunftstechnologien. In: 44. Metallurgisches Seminar, Harre, J. (Hrsg.). Hanau, Deutschland: GDMB Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik, 19–21.
- Gille, G. und A. Meier, 2012: Recycling von Refraktärmetallen. In: Recycling und Rohstoffe, Band 5, Thome-Kozmiensky, K. J. und D. Goldmann (Hrsg.). Neuruppin, Deutschland: TK Verlag, 537–560.
- Luidold, S., 2012: Verfahrenstechnik bei der Primärmetallurgie und dem Recycling von Technologiemetallen. Habilitationsschrift, Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich.
- Pawlek, F., 1982: Metallhüttenkunde. Berlin, Deutschland: Walter de Gruyter.
- PSE, 2012: Periodensystem der Elemente. Weinheim, Deutschland: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Reuter, M. A. et al., 2005: The metrics of material and metal ecology. *Developments in Mineral Processing*, 16. Amsterdam, Niederlande: Elsevier, B. V.
- Richter, H. und K. Scherzmann, 2006: Seltene Erden. In: *Chemische Technik: Prozesse und Produkte*, 6b. Weinheim, Deutschland: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Verhoef, E. V. et al., 2008: Process knowledge, system dynamics, and metal ecology. *Journal of Industrial Ecology*, 8, 23–43.
- WBH, 2013: Wolframmetall – Pulver. Internet: [http://www.wolfram.at/wolfram\\_at/wDeutsch/produkte/index3223655460navidW2688000000000.html?navid=8](http://www.wolfram.at/wolfram_at/wDeutsch/produkte/index3223655460navidW2688000000000.html?navid=8).
- Wellmer, F.-W. et al., 2012: Wirtschaftsstrategische Rohstoffe für den High-Tech-Standort Deutschland. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Referat Ressourcen und Nachhaltigkeit, Bonn, Deutschland.

## 8. Einsatzgebiete von kritischen Rohstoffen

Die kritischen Rohstoffe beziehungsweise Technologiemetalle weisen nicht nur, wie bereits im vorhergehenden Kapitel erwähnt, eine extreme Bandbreite hinsichtlich ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften auf und erfordern eine Vielzahl von unterschiedlichsten Verfahren und Prozessstufen zu ihrer Primär- bzw. Sekundärgewinnung, sondern finden auch in einer enormen Fülle verschiedenartigster Produkte Verwendung. Nachdem diese am Ende ihrer Lebensdauer grundsätzlich Ausgangsmaterialien für das Recycling dieser Elemente darstellen und sich daraus zumindest ein theoretisches Rückgewinnungspotenzial ableiten lässt, werden diese im Nachfolgenden kurz erläutert.

### 8.1 Anwendungsfelder von Refraktärmetallen

Innerhalb der Gruppe der Refraktärmetalle weisen die Elemente Wolfram, Niob und Tantal die größte Bedeutung auf beziehungsweise werden diese bezüglich ihrer Verfügbarkeit als kritisch eingestuft, wobei diese drei Metalle auf sehr unterschiedliche Art und Weise Verwendung finden. Beispielsweise lassen sich die Einsatzgebiete für Wolfram mit einem Bedarf von 92.800 t im Jahr 2011 entsprechend der Abbildung 46 grob in mehrere Kategorien unterteilen.

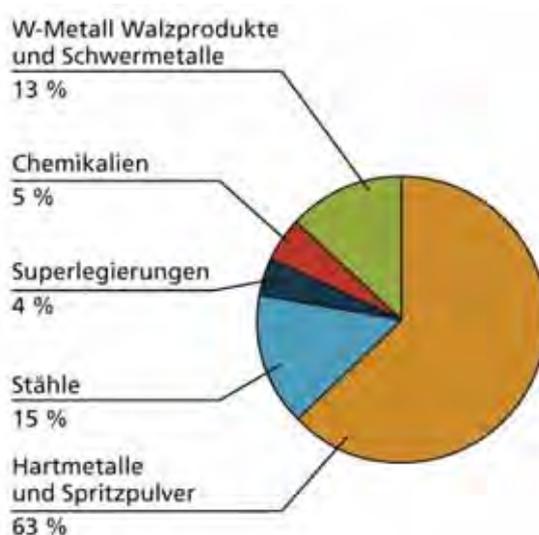


Abbildung 46: Verbrauch von Wolfram in den unterschiedlichen Anwendungen [Gille und Meier 2012]

Diese breit gefächerte Nutzung von Wolfram in der Hochtemperatur- und Vakuumtechnik, in der Elektronik sowie Elektrotechnik, in der Energie-, Licht- und Röntgentechnik, aber vor

allein in der Werkzeugindustrie und im Verschleißschutz ergibt sich aus seinen einzigartigen Eigenschaften mit einigen Spitzenwerten: [Gille und Meier 2012]

- Höchster Schmelzpunkt (3.410 °C), höchste Sublimationsenthalpie (850 kJ/mol), niedrigster Dampfdruck ( $10^{-7}$  Pa bei 1.700 °C) und niedrigster Ausdehnungskoeffizient von allen Metallen ( $4,59 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ).
- Auch die Dichte ( $19,3 \text{ kg/dm}^3$ ), der Elastizitätsmodul (410 GPa) sowie die thermische und elektrische Leitfähigkeit ( $175 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  bzw.  $0,18 \text{ } (\mu\Omega\cdot\text{cm})^{-1}$ ) sind sehr groß und werden nur von wenigen Metallen übertroffen.
- Dotiertes Wolfram und W-Legierungen zeigen ein sehr hohes Emissionsvermögen für Licht, Röntgenstrahlen und Elektronen.
- Die Carbide und Boride des Wolframs sind sowohl bei Raumtemperatur als auch im Hochtemperaturbereich sehr hart, verschleißfest und chemisch beständig.
- Durch W-Legierungszusätze lassen sich die mechanischen Eigenschaften von Stählen, Superlegierungen, Stellite, etc. deutlich verbessern.
- Ausreichend fein verteilte Oxide, Carbide, etc. des Wolframs zeigen katalytische Wirkung in zahlreichen Prozessen.

Den größten Anteil am weltweiten Wolframbedarf weist die Produktgruppe der Hartmetalle (und Spritzpulver) auf, wobei diese von wenigen Ausnahmen abgesehen als Hauptkomponente Wolframkarbid (WC) enthalten, wobei jedoch zusätzlich auch Carbide und Nitride von Titan, Niob, Tantal und Hafnium vorliegen können. Diese Hartstoffpulver werden mittels Cobalt, aber auch Nickel oder Eisen als duktilen, metallischen Binder zu kompakten Werkstücke gebunden. Gebrauch finden die Hartmetalle bzw. Hartstoffe vor allem für die nachfolgend aufgelisteten Anwendungen. [Lassner et al. 1996]

- Schneidwerkzeuge bei der Metallbearbeitung (drehen, fräsen und bohren)
- Holz- und Kunststoffbearbeitung
- Bohrwerkzeuge für den Bergbau und die Öl- bzw. Wasserförderung
- Verschleißfeste Bauteile
- Elastisch gebundene Schleif- und Poliermittel

Darüber hinaus enthalten einige Stahlsorten (Schnellarbeitsstähle, warmfeste Stähle, Werkzeugstähle, etc.) etwa 1–18 Gew.-% Wolfram, um die Härte und Verschleißbeständigkeit bei hohen Temperaturen, die Thermoschockbeständigkeit und die Hochtemperatureigenschaften zu verbessern. Aus prozesstechnischen und vor allem wirtschaftlichen Gründen findet jedoch

nicht reines Wolfram, sondern Ferrowolfram zum Legieren Verwendung. [Lassner et al. 1996]

Als Reinmetall oder Legierung [Lassner et al. 1996] dient Wolfram vor allem in Bereich der Beleuchtungs- und Elektrotechnik, Elektronik, Hochtemperaturtechnologie, Metallbeschichtungen durch Vakuum oder Plasma, Röntgen-, Strahlen- und Medizintechnik, Maschinen- und Motorenbau, chemische Industrie, Luft- und Raumfahrt, Rüstungsindustrie und Lasertechnologie, während dessen Chemikalien (Tabelle 43) in Katalysatoren für Spalt-, Hydrier/Dehydrier- und Reformierreaktionen bis hin zu DENOX-Katalysatoren, aber auch als Ausgangsstoffe für CVD-Prozesse [Gille et al. 2006] und in einigen weiteren Bereichen Verwendung finden.

Tabelle 43: Wolframverbindungen und ihre Anwendungen [ITIA]

<b>Verbindungen</b>	<b>Anwendungen</b>
Wolframsilizid	Mikroelektronik
Kalziumwolframat	Leuchtstoff
Heteropolywolframate	Lacke und Toner, Katalysatoren, Passivierung von Stahl
Na-12-Wolframatophosphat	Herstellung organischer Pigmente, Oberflächenbehandlung von Fellen, Antistatikum für die Behandlung von Acrylfasern, Gerben von Leder, Imprägnierung, Zusatz zu Galvanikbädern, in Bindemitteln und Klebstoffen, um die Beständigkeit gegen Wasser zu gewährleisten
Wolframdisulfid	Schmiermittel
Wolframdiselenid	Schmiermittel
Wolframhexafluorid	Metallbeschichtung in der Halbleiterindustrie
Wolframhexachlorid	Metallbeschichtung
Wolframhexakarbonyl	Herstellung von Katalysatoren und organometallischen Verbindungen

Auch bezüglich der beiden Elemente Niob und Tantal gibt es trotz ihrer hohen chemischen Ähnlichkeit beträchtliche Unterschiede hinsichtlich der Einsatzgebiete (Abbildung 47). Vor allem geht der Großteil von Niob in Form einer Ferrolegierung in die Stahlindustrie, woraus der wesentlich höhere weltweite Verbrauch resultiert. Im Gegensatz hierzu benötigen die Festelektrolytkondensatoren den größten Anteil an der weltweiten Tantalproduktion, die vor allem in unterschiedlichen elektronischen Geräten, wie Mobiltelefone, Laptops und auch Steuereinrichtungen von Flug- und Fahrzeugen enthalten sind. Darüber hinaus lassen sich aus Niob in Form von NbTi oder Nb<sub>3</sub>Sn supraleitende Magnetspulen herstellen, wie sie nicht nur in Kernfusionsreaktoren und in der Hochenergiephysik, sondern auch in der Magnetresonanztomografie benötigt werden.

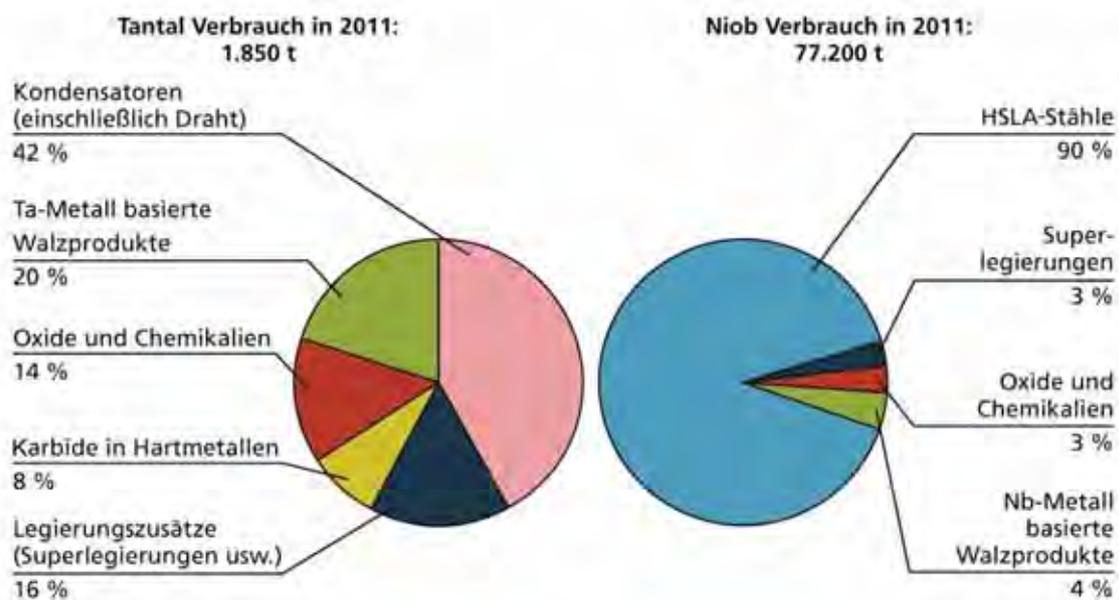


Abbildung 47: Verbrauch an Niob und Tantal in den unterschiedlichen Anwendungsgebieten [Gille und Meier 2012]

Außerdem finden Nb-haltige Beschichtungen vor allem in der chemischen Industrie (Reaktionsbehälter, Rührer, Tauchhülsen, Wärmetauscher, Rohrleitungen, Ventile, Tiegel, Pumpenteile, etc.) als Korrosionsschutz, aber auch bei medizinischen Geräten und Implantaten Verwendung, während Sputtertargets aus Niob auch für die Herstellung integrierter Schaltkreise, Halbleiter und anderer elektrischer, magnetischer und optischer Produkte erforderlich sind [Luidold 2011]. Niobhaltige Oxide und Chemikalien finden sich unter anderem auch in keramischen Vielschichtkondensatoren, Laserkommunikationssysteme, optische Speichersysteme, in Piezokeramiken und optischen Linsen als auch in diversen Katalysatoren [Gille et al. 2006, Tanabe 2003], während Ta-Oxide und -Chemikalien ebenso in vielfältigen Produkten enthalten sind (Tabelle 44).

Tabelle 44: Auswahl an Produkten mit Bedarf an Ta [Lambert 2001, Andersson et al. 2005]

Verbindungen	Anwendungen
$\text{LiTaO}_3$	Piezokristalle und Oberflächenwellenfilter (Bandpassfilter)
$\text{Ba}_3\text{MgTa}_2\text{O}_9$ , $\text{Ba}_3\text{ZnTa}_2\text{O}_9$	Hochfrequenz-Resonatoren
TaN	Diffusionsbarriere in LEDs und photovoltaischen Anwendungen, Transistoren und als Widerstandsmaterial in der Zündkapsel von Airbags
$\text{Ta}_3\text{N}_5$	Rotpigment in Kunststoffen und Farben
$\text{TaF}_5$	Katalysator zur Isomerisation und Alkylation
$\text{Ta}_2\text{O}_5 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Katalysator
Ta-Alkoxide, -chloride	Erzeugung von dünnen Ta-Schichten (CVD-Verfahren)
TaO	Herstellung von hitzereflektierenden Scheiben
$\text{YTaO}_4$	Leuchtstoff in der Röntgentechnik

## 8.2 Verwendung von Seltenen Erden

Die zahlreichen Anwendungen der Seltenen Erden (SE) lassen sich gemäß Abbildung 48 grob in mehrere verschiedene Gebiete zusammenfassen, in denen jeweils unterschiedliche individuelle Elemente eine bedeutende Rolle spielen. Nachdem diese Metalle eine besondere Position im Periodensystem aufweisen (f-Block-Elemente, Lanthanoide), weisen sie herausragende chemische Eigenschaften auf, weshalb sie in vielen Einsatzgebieten nicht durch andere Elemente ersetzbar sind. Während beispielsweise Europium vor allem für Leuchtstoffe von Bedeutung ist, findet Dysprosium vorwiegend in Werkstoffen für Permanentmagneten Verwendung. [Luidold und Antrekowitsch 2012]

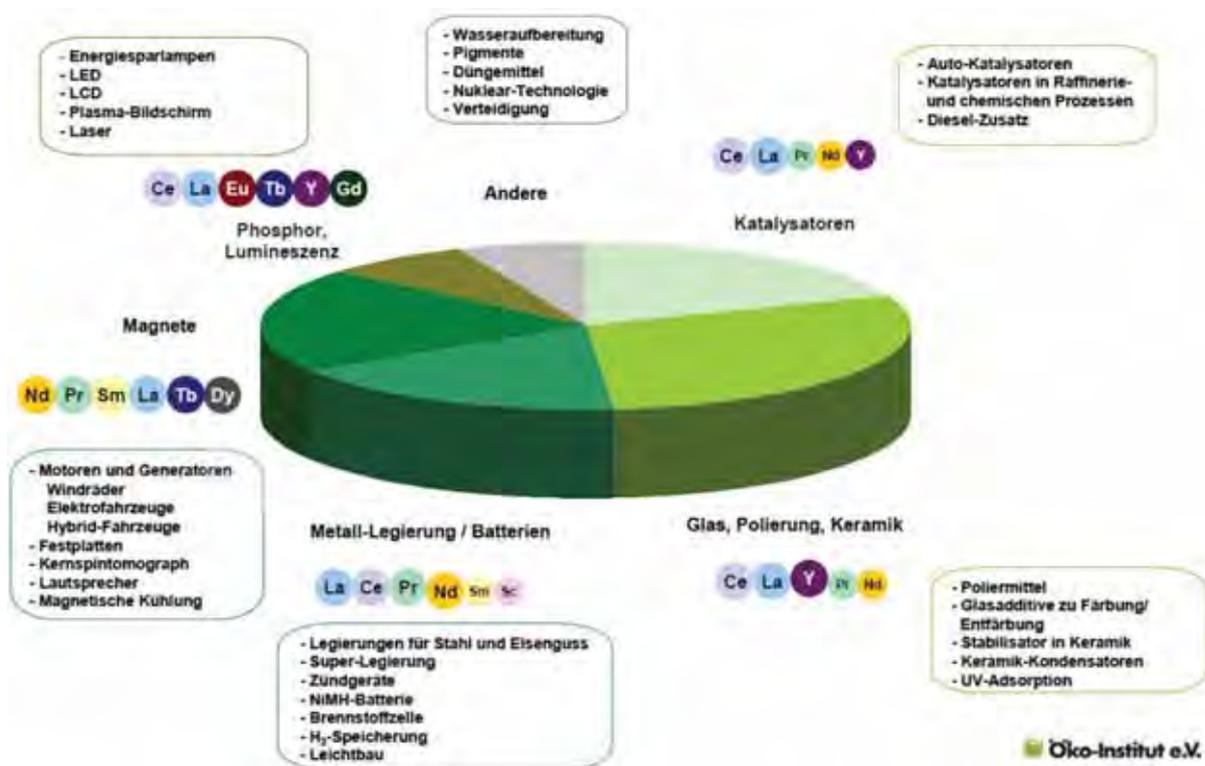


Abbildung 48: Übersicht von den vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten der Seltenen Erden

[Schüler 2011]

Die globale Produktionsmenge an Seltenen Erden belief sich im Jahr 2008 auf 120.000 t [Brown et al. 2012], von denen 97,4 % in China und 2,0 % in Russland gewonnen wurden und welche sich gemäß Tabelle 45 auf die jeweiligen Produktgruppen verteilt. Davon importierte die gesamte Europäische Union 23.013 t, wovon wiederum rund 24 % (Abbildung 49) alleine auf Österreich entfielen. Somit benötigt Österreich etwa einen Anteil von 4,6 % der weltweiten Produktion an diesen Elementen, während es über praktisch keine entsprechenden Primärvorkommen verfügt.

Tabelle 45: Globaler Bedarf an Seltenen Erden für unterschiedliche Anwendungen [Schüler 2011]

Anwendungsgebiet	Menge	
	[kt/a]	[%]
Glas, Poliermittel, Keramik	33–42	30
Magnete	21–27	20
Katalysatoren	20–25	20
Legierungen, Batterien	17–23	18
Leuchtstoffe	9	7
Sonstiges		5

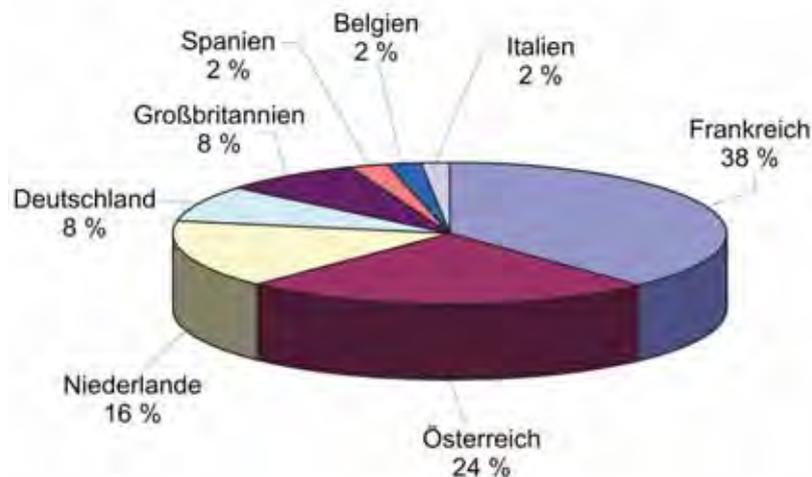


Abbildung 49: Anteil der einzelnen Staaten am Gesamtimport der EU an Seltenen Erden [Schüler 2011]

In Metall-Legierungen dienen die SE zur Bindung von Sauerstoff, Schwefel, Stickstoff, Wasserstoff und einigen anderen Störelementen, wobei im Stahl vor allem die Sulfidmorphologie und im Besonderen bei Edelstählen die Bearbeitbarkeit beeinflusst wird. In Heizleiter- und Superlegierungen bewirkt Yttrium eine Verbesserung der Oxidationsbeständigkeit, während allgemein die Metalle der Seltenen Erden in Mg- und Al-Legierungen die Warmzugfestigkeit und -streckgrenze erhöhen. Weitere positive Einflüsse zeigen sich bei Cu- und Ti-Werkstoffen. Hochwertige Permanentmagnete auf der Basis von  $\text{SmCo}_5$  und  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  und vor allem  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  besitzen die höchsten erzielbaren Energiedichten und ermöglichen somit drastische Gewichtseinsparungen im Vergleich zu anderen Magnetwerkstoffen und finden daher Verwendung in Computer, Drucker, CD/DVD-Rekorder, elektrische Uhren, KFZ-Ausstattungen, Haushaltselektronik, Industrieroboter und vielen anderen Gebieten, wie beispielsweise Windkraftanlagen. Einsatz finden die Elemente der Seltenen Erden auch aufgrund ihrer katalytischen Wirkung, wie unter anderem in Spalt-Katalysatoren (FCC-Katalysatoren), die auf Basis synthetischer Zeolithe rund 1–5 % SE-Oxide enthalten. Darüber hinaus beinhalten die Abgaskatalysatoren von benzinbetriebenen Kraftfahrzeugen  $\text{CeO}_2$  oder

$\text{CeO}_2/\text{ZrO}_2$ , um die große spezifische Oberfläche des Aluminiumoxidträgers zu stabilisieren. Auch bezüglich der Partikelemission von Dieselfahrzeugen wurden Treibstoff-Additive auf Basis von organischen Cerverbindungen entwickelt, welche einerseits eine effizientere Verbrennung im Motor und eine > 99 %ige Entfernung der Rußpartikel ermöglichen. Die Glasindustrie nutzt SE-Oxide in mehrfacher Hinsicht. So beeinflusst das farblose Lanthanoxid als Bestandteil optischer Gläser (bis 40 %  $\text{La}_2\text{O}_3$ ) deren Brechungsindex und Transparenz, während zur Verhinderung der Rekristallisation Y- und Gd-Oxide zugesetzt werden. Derartige Materialien befinden sich vor allem in Präzisionsoptiken von Mikroskopen, Fernrohren, Kameraobjektiven, etc. Darüber hinaus bewirkt Ceroxid durch die Oxidation von  $\text{Fe}^{2+}$  zu  $\text{Fe}^{3+}$  eine Entfärbung von Gläsern und besitzt als  $\text{Ce}^{3+}$  und  $\text{Ce}^{4+}$  eine starke Absorption im UV-Bereich. Deshalb stellt es einen Bestandteil von farblosem Glas dar, welches vor allem für UV-lichtempfindliche Getränke und Lebensmittel oder auch für Sonnenschutz Zwecke Verwendung findet. Neben einigen anderen Gebrauchsmöglichkeiten von SE in der Glasindustrie ist vor allem noch die Nutzung von Materialien auf Basis von Ceroxid zum Polieren von Glasoberflächen, wie beispielsweise bei Spiegeln, Kamera-, Teleskop- und Mikroskoplinsen, Präzisionsoptik, Schirmteilen von Bildröhren, LCD-Monitore, Brillengläser, etc. und von Elektronik-Komponenten zu erwähnen. In der Beleuchtungsindustrie dienen die Elemente der Seltenen Erden zur Herstellung von Leuchtstoffen, welche eine sichtbare Strahlung definierter Wellenlänge aussenden, wenn die SE-Ionen entweder direkt über elektromagnetische oder Korpuskularstrahlung angeregt werden oder die Anregung durch einen Elektronentransfer über die Ionen des Wirtsgitters auf den Aktivator erfolgt. Einsatz finden diese unter anderem in Farbbildröhren, Flach- und Plasmabildschirmen, Leuchtstoffröhren, LEDs etc., wobei je nach Bedarf unterschiedlichste Verbindungen zur Verfügung stehen, von denen eine Auswahl in Tabelle 49 aufgelistet ist. Darüber hinaus haben SE-Verbindungen weitere Anwendungen in der elektronischen Industrie, in welcher diese unter anderem als Zusätze zu keramischen Dielektrika (Bariumtitanat, Bleizirkonat-Bleititanat, etc.) auftreten. In der Energietechnik eignen sich Eu, Sm, Dy und Gd für Regelstäbe in Kernreaktoren und zum Schutz vor Neutronenstrahlung aufgrund der hohen Einfangquerschnitte für thermische Neutronen, wobei der Einsatz in oxidischer Form, dispergiert in Edelstahl erfolgt. Außerdem hat das System  $\text{LaNi}_5$  eine hervorragende Eignung als Wasserstoffspeicher, welcher als Kathodenmaterial in Nickelmetallhydrid-Akkumulatoren breitere Anwendung für tragbare Elektrogeräte und -werkzeuge gefunden hat. Mit Yttrium- bzw. Ceroxid stabilisierte Zirkoniumoxide bilden Feststoffelektrolyte einerseits in oxidkeramischen Brennstoffzellen (SOFC) und andererseits auch in den Lamba-Sonden bei Verbrennungsmotoren, während Oxide von La, Y und Ce mit Ni, Co, Zn oder Cr als Elektroden in den SOFCs dienen. Letztendlich werden SE in Form von Salzen auch in der Landwirtschaft als Zusätze zu Tierfutter oder auch von Düngemittel, sowie in einigen weiteren Einsatzgebieten

(Pigmente für Polymere und Lacke, Holzschutzmittel, Dentalkeramik, Hochtemperaturschmiermittel, etc.) genutzt. [Richter und Schermanz 2006]

Tabelle 46: Darstellung der SE-haltigen Leuchtstoffe [Jüstel]

Aktivator	Wirtsgitter	Emission [nm]	Farbe	Anwendungen
Ce <sup>3+</sup>	LaPO <sub>4</sub>	320	UVB	Solarium
	YPO <sub>4</sub>	335, 355	UVA	Solarium
	Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	560	Gelb	Gasentladungslampen, LEDs
Pr <sup>3+</sup>	Gd <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S	510	Grün	Computertomographen
	CaTiO <sub>3</sub>	610	Rot	Feldemissionsbildschirme
Sm <sup>3+</sup>	Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (Granat)	620	Rot	Laser
Eu <sup>2+</sup>	SrB <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	368	UVA	Solarium
	BaMgAl <sub>10</sub> O <sub>17</sub>	453	Blau	Gasentladungslampen, Plasmabildschirm
	Sr <sub>4</sub> Al <sub>14</sub> O <sub>25</sub>	490	Blau-grün	Gasentladungslampen
Eu <sup>3+</sup>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	611	Rot	Gasentladungslampen
	YVO <sub>4</sub>	615	Rot	Hg-Hochdrucklampen
Gd <sup>3+</sup>	(La, Bi)B <sub>3</sub> O <sub>6</sub>	311	UVB	Medizinische Gasentladungslampen
Tb <sup>3+</sup>	LaPO <sub>4</sub>	544	Grün	Gasentladungslampen
	CeMgAl <sub>11</sub> O <sub>19</sub>	544	Grün	Gasentladungslampen
	(Gd, Ce)MgB <sub>5</sub> O <sub>10</sub>	544	Grün	Gasentladungslampen
Yb <sup>2+</sup>	SrSi <sub>2</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	620	Rot	-

### 8.3 Einsatzgebiete der Edelmetalle

Auch die Elemente der Platingruppe sowie Silber und Gold weisen auf Grund ihrer besonderen chemischen und physikalischen Eigenschaften vielfältige Einsatzgebiete auf und befinden sich in vielen Produkten des täglichen Lebens (Abbildung 50). Neben den technischen Anwendungen sind dies vor allem Münzen, Medaillen und Schmuck als auch Barren, bei denen vor allem der Werterhaltungsaspekt überwiegt. Mengenmäßig besitzt von allen Edelmetallen Silber (Abbildung 51) die größte Bedeutung, wobei sich der Gebrauch einigermaßen gleichmäßig auf die Industrie, Schmuck sowie Silberwaren als auch die Fotografie aufteilt, wobei letztere aufgrund der Digitaltechnik stark an Bedeutung verloren hat. Gold hingegen dient zu einem überwiegenden Anteil zur Schmuckherstellung und verfügt mit der Wertanlage und der Elektronikindustrie über zwei weitere bedeutende Verwendungszwecke. Im Bereich der Platingruppenmetalle (Abbildung 52) stellen die KFZ-Abgaskatalysatoren das bedeutendste Einsatzgebiet dar, wobei hier vor allem die Elemente Platin, Palladium und Rhodium von Belang sind. Auch wenn sich das sehr teure Platin durch zunehmend größere Anteile an Palladium ersetzen lässt und auch in den sonstigen Produkten manche PGMs mit gewissen Effizienzverlusten durch andere Elemente dieser

Gruppe ersetzen lassen, ist eine generelle Substitution dieser Metalle durch andere Werkstoffe bisher kaum gegeben. [Brumby et al. 2006]

	Au	Ag	Pt	Pd	Rh	Ir	Os	Ru
Katalyse	○	×	xx	xx	×	○	○	○
Schmuck	xx	xx	xx	×	○	○		○
Dentaltechnik	xx	○	○	×		○		
Elektronik/Elektrotechnik	xx	xx	×	xx	○	○		○
Dünnschichttechnik	xx	xx	×	×	×			○
Fotografie		xx						
Löttechnik	×	xx						
Messtechnik			xx		×			
Glasindustrie			xx		×			
Medizintechnik			xx			×	○	○

(xx = sehr starke Bedeutung; × = starke Bedeutung; ○ = spezielle Verwendung/für jeweiliges Anwendungsfeld)

Abbildung 50: Anwendungsfelder der Edelmetalle [Brumby et al. 2006]

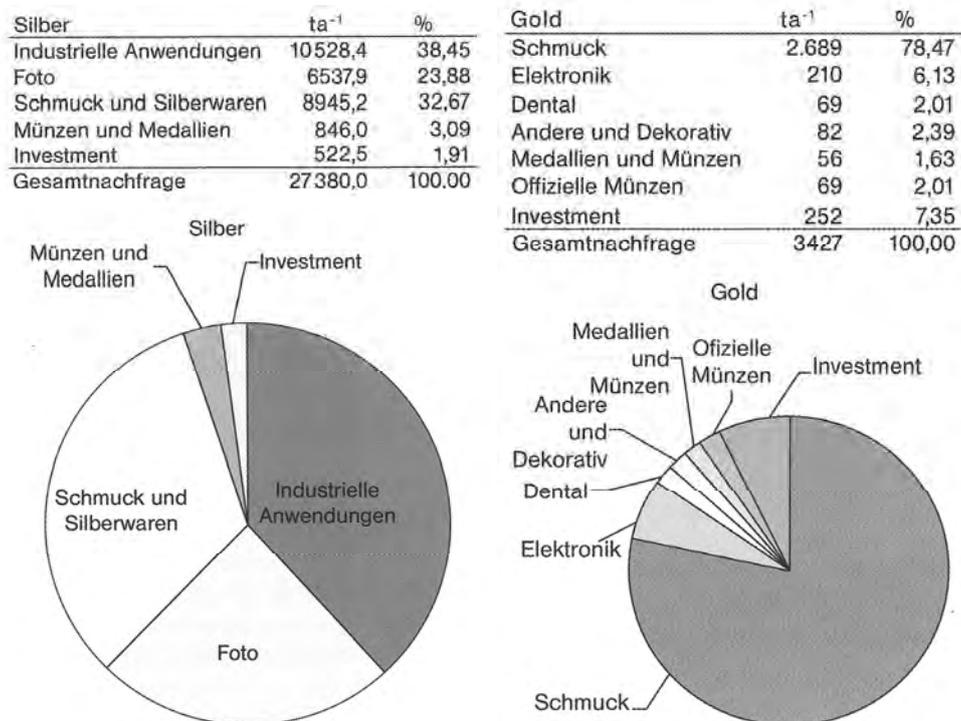


Abbildung 51: Verbrauch von Silber und Gold in den jeweiligen Einsatzgebieten [Brumby et al. 2006]

<b>Platin</b>	ta <sup>-1</sup>	%	<b>Palladium</b>	ta <sup>-1</sup>	%	<b>Rhodium</b>	ta <sup>-1</sup>	%
Autoabgaskatalysator	85,1	42,3	Autokatalysator	97,2	50,9	Autokatalysator	18,2	86,3
Schmuck	68,4	34,0	Elektronik	28,5	14,9	Chemie	1,2	5,7
Chemie und Ö Raffination	15,6	7,8	Dental	26,1	13,7	Sonstiges	1,7	8,1
Investment	0,2	0,1	Sonstiges	39,2	20,5	<b>Gesamtnachfr.*</b>	<b>21,1</b>	
Sonstiges	31,9	15,9	<b>Gesamtnachfr.*</b>	<b>191,0</b>				
<b>Gesamtnachfrage*</b>	<b>201,2</b>							

Summe PGM für Autokat. (netto) = 200,5 49%

\* Netto-Nachfrage  
= Brutto-Nachfrage-Recycling

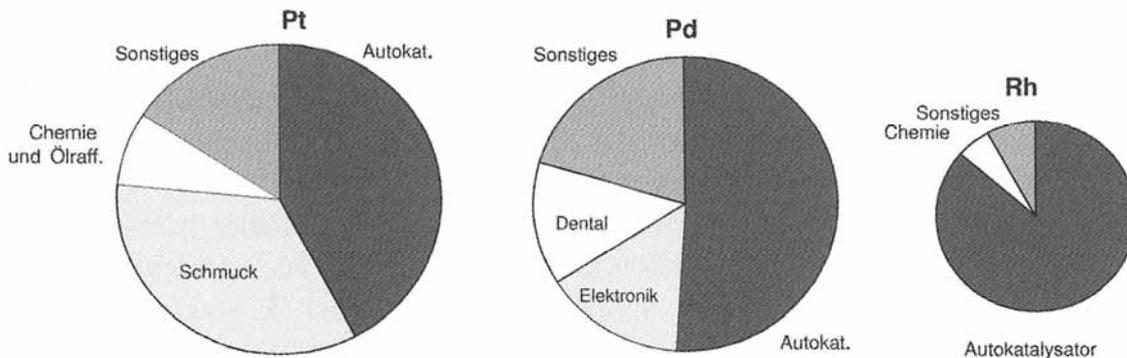


Abbildung 52: Verbrauch von PGMs in den jeweiligen Einsatzgebieten [Brumby et al. 2006]

Obwohl die Gehalte an den Platingruppenmetallen in den einzelnen Elektronik-Geräten durchaus sehr gering ausfallen (Abbildung 53), weisen Mobiltelefone, PCs, Laptops, etc. einen nennenswerten Einfluss auf den Gesamtbedarf an diesen Elementen auf (Abbildung 54). Darüber hinaus lässt sich erkennen, dass neben den Edelmetallen auch noch eine Reihe weiterer kritischer Rohstoffe in diesen Produkten enthalten ist, jedoch ebenso nur in geringsten Spuren, woraus für das in Kapitel 11 beschriebene Recycling eine enorme Herausforderung resultiert, wenn auch diese wieder in den Stoffkreislauf zurückzuführen sind.

<b>Material</b>	<b>Gewicht</b>	<b>Material</b>	<b>Gewicht</b>
Silizium	24,8803	Bismut	0,0063
Kunststoff	22,9907	<b>Chrom</b>	<b>0,0063</b>
Eisen	20,4712	Quecksilber	0,0022
Aluminium	14,1723	<b>Germanium</b>	<b>0,0016</b>
Kupfer	6,9287	Gold	0,0016
Blei	6,2988	<b>Indium</b>	<b>0,0016</b>
Zink	2,2046	<b>Ruthenium</b>	<b>0,0016</b>
Zinn	1,0078	Selen	0,0016
Nickel	0,8503	Arsen	0,0013
Barium	0,0315	Gallium	0,0013
Mangan	0,0315	<b>Palladium</b>	<b>0,0003</b>
Silber	0,0189	Europium	0,0002
Beryllium	0,0157	<b>Niob</b>	<b>0,0002</b>
<b>Kobalt</b>	<b>0,0157</b>	Vanadium	0,0002
<b>Tantal</b>	<b>0,0157</b>	Yttrium	0,0002
Titan	0,0157	<b>Platin</b>	<b>in Spuren</b>
Antimon	0,0094	<b>Rhodium</b>	<b>in Spuren</b>
Kadmium	0,0094	Terbium	in Spuren

Abbildung 53: Zusammensetzung eines durchschnittlichen Mobiltelefons [Bardt 2010]

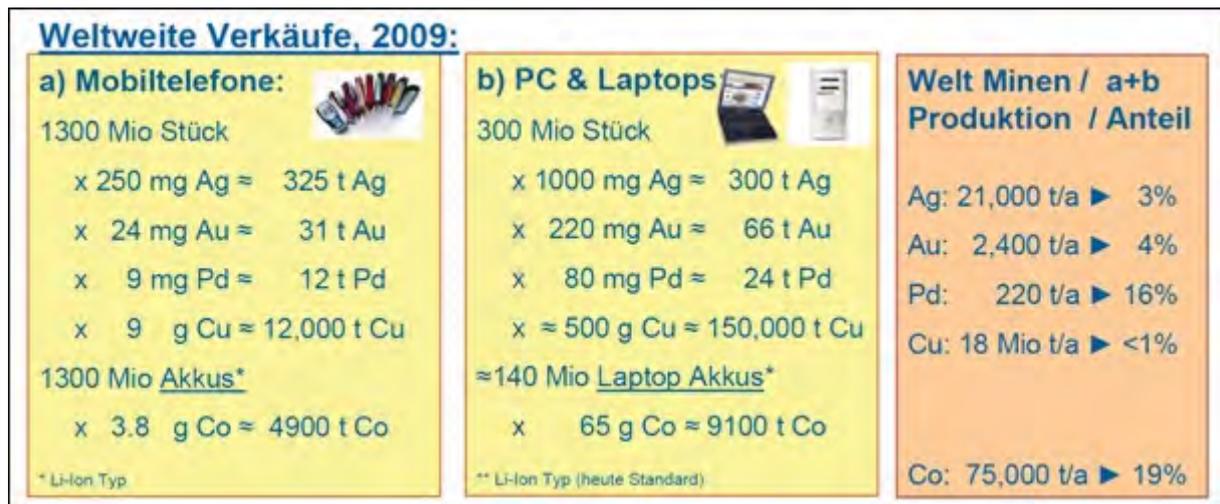


Abbildung 54: Inhalt an Kupfer und Edelmetallen in den weltweit verkauften Produkten

[Hagelüken 2010]

## 8.4 Literatur

- Andersson, K. et al., 2005: Tantalum and tantalum compounds. In: Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry, A 26. Weinheim, Deutschland: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Bardt, H., 2010: Keine Zukunft ohne Rohstoffe – Strategien und Handlungsoptionen. Internet: [http://www.urbanmining.com/fileadmin/pdfs/vortraege/Dr\\_Bardt\\_Urban\\_Mining\\_Iserlohn.pdf](http://www.urbanmining.com/fileadmin/pdfs/vortraege/Dr_Bardt_Urban_Mining_Iserlohn.pdf) (Zugriff: 9.7.2012).
- Brown, T. J. et al., 2012: World Mineral Production. Keyworth, Großbritannien: British Geological Survey.
- Brumby, A. et al., 2006: Edelmetalle. Chemische Technik – Prozesse und Produkte, 6b – Metalle. Weinheim, Deutschland: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Gille, G. et al., 2006: Die Refraktärmetalle Niob, Tantal, Wolfram, Molybdän und Rhenium. In: Chemische Technik: Prozesse und Produkte, 6b. Weinheim, Deutschland: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Gille, G. und A. Meier, 2012: Recycling von Refraktärmetallen. In: Recycling und Rohstoffe, Band 5, Thome-Kozmiensky, K. J. und D. Goldmann (Hrsg.). Neuruppin, Deutschland: TK Verlag, 537–560.
- Hagelüken, C., 2010: Wir brauchen eine globale Recyclingwirtschaft. Internet: [http://www.nachhaltigwirtschaften.at/nw\\_pdf/events/20101011\\_rohstoffversorgung\\_christian\\_hagelueken.pdf](http://www.nachhaltigwirtschaften.at/nw_pdf/events/20101011_rohstoffversorgung_christian_hagelueken.pdf) (Zugriff: 22.08.2012).

- ITIA: Tungsten compounds. Internet: <http://www.itia.info/tungsten-compounds.html> (Zugriff: 31.1.2012).
- Jüstel, T.: Leuchtstoffe. Internet: [https://www.fh-muenster.de/fb1/downloads/personal/7\\_InkohaerenteLichtquellen-Leuchtstoffe.pdf](https://www.fh-muenster.de/fb1/downloads/personal/7_InkohaerenteLichtquellen-Leuchtstoffe.pdf) (Zugriff: 04.04.2011).
- Lambert, J. B., 2001: Tantalum and tantalum compounds. In: Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. DOI: 10.1002/0471238961.200114202180916.a01. pub2.
- Lassner, E. et al., 1996: Tungsten, tungsten alloys, and tungsten compounds. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry, A 27. Weinheim, Deutschland: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Luidold, S., 2011: Niobium powders: Uses and process developments for their production. In: Chemical Engineering Methods and Technology, Niobium: Properties, Production and Applications. Nova Science Publishers, 143–165.
- Luidold, S. und H. Antrekowitsch, 2012: Gewinnung von Technologiemetallen aus alternativen Rohstoffquellen. In: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 157, 32–37.
- Schüler, D. et al., 2011: Study on rare earths and their recycling. Final Report for the Greens/EAF Group in the European Parliament, Öko-Institut e.V.
- Tanabe, K., 2003: Catalytic applications of niobium compounds. Catalysis Today, 78, 65–77.

## 9. Stoffflussanalysen

Die Methode der Stoffflussanalysen (SFA) nach Baccini und Brunner (1991) und Brunner und 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) [ÖNORM 2005a, 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 die Möglichkeit besteht, ein komplexes System auf die für eine Fragestellung relevanten Stoffe/Güter und Prozesse zu reduzieren und auf anschauliche Weise darzustellen. Durch die Kenntnis der Stoffströme können Systeme so gestaltet werden, dass Stoffe optimal verwendet, verwertet, recycelt oder abgelagert werden können. Auch zielgerichtete Maßnahmen und Szenarien zur Optimierung sind damit ableitbar. Besonders relevant ist, dass die Potenziale sekundärer Rohstoffe in anthropogenen Systemen aufgezeigt werden können – Stichwort „urban mining“.

Als System sind z.B. Betriebe, private Haushalte, Städte oder Regionen zu definieren und zu modellieren. Um mit SFAs arbeiten zu können, müssen zunächst die wichtigsten Begriffe definiert werden (Brunner et al. 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:  $\text{Input} = \text{Output} \pm \text{Lageränderung}$ .

- Als Fluss wird die pro Zeiteinheit zwischen zwei Prozessen bewegte Masse an Gütern bzw. Stoffen bezeichnet (Einheit Masse/Zeit).
- Ein Lager wird als der Bestand von Gütern oder Stoffen innerhalb eines Prozesses definiert.
- 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 zwischen zwei 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 Stoffflusssystem, damit eine Quantifizierung der Flüsse und Lager möglich ist.

## 9.1 Hintergrund

Eine von der Europäischen Kommission im Zuge der Rohstoffinitiative der EU (COM (2008) 699) veröffentlichte Studie [Ad-hoc Working Group 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 potenzieller Sekundärrohstoffmengen in anthropogenen Systemen dar und wurden in der Vergangenheit sowohl auf nationaler [Daxbeck et al. 2003, Döberl et al. 2004, Mattenberger et al. 2008, Schöller et al. 2006] als auch auf internationaler Ebene [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 [Du und Graedel 2011], gibt es weder auf europäischer Ebene noch für Österreich entsprechende Untersuchungen [Ad-hoc Working Group 2010]. Neuere Arbeiten deuten aber darauf hin, dass die Potenziale an Hochtechnologierohstoffen in anthropogenen Lagern [Du und Graedel 2011] und bestimmten Abfallströmen (z.B. Elektroaltgeräte, siehe [Chancerel et al. 2009] oder [Oguchi et al. 2011]) beträchtlich sein können. Diese Rohstoffpotenziale wurden bisher kaum erforscht, weswegen ein gezieltes Recycling für viele Rohstoffe (z.B. Seltene Erden) praktisch nicht stattfindet [Graedel 2011].

## **9.2 Ziele und Fragestellungen**

Die Erstellung von Stoffflussanalysen für kritische Rohstoffe in Bezug auf Hochtechnologieanwendungen in Österreich stellt eine Grundlage für die Abschätzung vorhandener Sekundärrohstoffpotenziale und für die Entwicklung gezielter Recyclingstrategien zur Nutzung dieser Rohstoffpotenziale dar. Das Ziel dieser Arbeit war es, eine konsistente Auswertung vorhandener Daten zum österreichischen Haushalt dreier ausgewählter kritischer Rohstoffe anhand von Stoffflussanalysen (SFA) durchzuführen und basierend darauf Sekundärrohstoffpotenziale (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 Sekundärrohstoffpotenziale abgegeben werden?
- Welche Lager und Flüsse stellen die größten Potenziale für die Nutzung als Sekundärrohstoffquellen dar?

Zur Beantwortung der Fragestellungen werden zunächst drei systemrelevante Rohstoffe anhand der für Österreich adaptierten EU-Methode zur Beurteilung der Rohstoffkritikalität bestimmt. Basierend auf der Identifikation der drei Rohstoffe wurden Grob-Stoffflussanalysen zur Abschätzung vorhandener (und zukünftig zu erwartender) Sekundärrohstoffpotenziale erstellt. Unsicherheiten ließen sich im Rahmen der Bilanzen entsprechend der Verfügbarkeit und Qualität der Daten berücksichtigen. Die Datenlage wurde 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 Sekundärrohstoffpotenziale dargestellt.

### **9.3 Kritikalitätsbeurteilung für Österreich und Auswahl der Stoffe für die Stoffflussanalysen (SFA)**

Als Grundlage für die Stoffauswahl wurde die Methode zur Kritikalitätsbeurteilung der Ad-hoc Working Group der Europäischen Kommission (Kapitel 3) 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 zwei Komponenten zusammen, der wirtschaftlichen Bedeutung  $E_i$  des Rohstoffs für eine Volkswirtschaft (in Abbildung 55 auf der Abszisse aufgetragen) und

dem Versorgungsrisiko  $SR_i$ , mit dem dieser Rohstoff behaftet ist (auf der Ordinate in Abbildung 55).

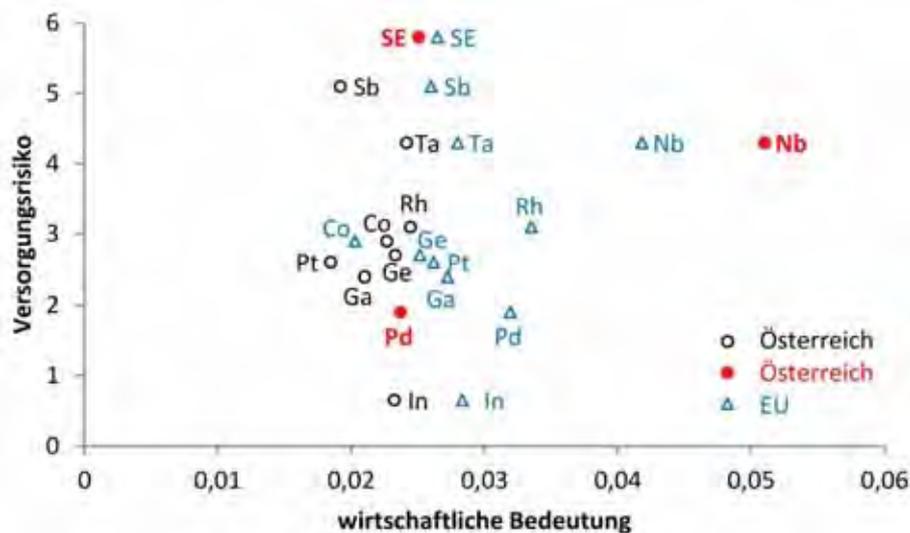


Abbildung 55: Darstellung der wirtschaftlichen Bedeutung und des Versorgungsrisikos kritischer Elemente für Österreich und die EU (Abbildung auf Grundlage von Daten aus Angerer et al. (2009) und Weber et al. (2011))

Die wirtschaftliche Bedeutung  $EI_i$  wird auf das österreichische BIP 2011 bezogen. Welche Produktionszweige zu Megasektoren zusammengefasst wurden, wird im EU-ad-hoc-Bericht durch NACE-Codes beschrieben. Als Äquivalent für Österreich fanden hier die ÖNACE-2008-Codes Verwendung. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den EU-Daten und jenen 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 Euro (im EU-ad-hoc-Bericht wird dieser Wert als „Wertschöpfung“ bezeichnet) wird in Prozent ausgedrückt.

Die 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, wurden 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 55 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 wurden. Eine Abschätzung der Kritikalität erfolgte für folgende Rohstoffe: Metalle der Seltenen Erden, drei Vertreter der Platingruppenmetalle (Palladium, Platin und Rhodium), Niob, Tantal, Gallium, Germanium, Indium, Antimon und Cobalt. Für Beryllium, Fluorapat, Graphit, Magnesium, Wolfram und die drei Platingruppen-

metalle 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 55 nicht inkludiert. 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 55 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, das heißt der Metallbereich 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, welche eine deutlich niedrigere Wertschöpfung haben als die Megasektoren „Metalle“ und „Maschinelle Ausrüstung“. – In Österreich dominieren diese beiden 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. Cobalt 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 55), wurden die Ergebnisse aus den Gesprächen der Montanuniversität Leoben mit den Industriepartnern berücksichtigt. Dadurch ließ sich auch die Einschätzung ausgewählter Hochtechnologieunternehmen bei der Stoffauswahl miteinbeziehen. Schließlich wurden folgende Stoffe für die SFA ausgewählt:

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

## 9.4 Methode

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

Österreich hinaus Exporte. Die zeitliche Grenze der Systeme ist jeweils das Kalenderjahr 2011.

Ziel der SFAs war 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 vor allem öffentliche Statistiken, wissenschaftliche Berichte und Anfragen bei relevanten Unternehmen und Institutionen. Aufgrund der unsicheren Datenlage wurde 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 wurden. Diese ließen sich durch Flüsse miteinander verbinden und es wurde versucht, sowohl die Flüsse als auch die Lager innerhalb der Prozesse zu quantifizieren, um das anfangs approximative System zu präzisieren. Die Stoffflüsse wurden 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 erlaubte trotz teilweise gravierender Datenlücken bzw. hoher Unsicherheiten (zumindest indirekt) Schlüsse zur Plausibilität der Stoffbilanzen zu ziehen.

#### **9.4.1 Softwareprogramm STAN<sup>®</sup>**

Für die ausgewählten Stoffe Nd, Nb und Pd wurden zunächst qualitative Stoffhaushaltssysteme mittels STAN<sup>®</sup>, einer an der TU Wien entwickelten Spezialsoftware für SFA, erstellt. STAN (kurz für SToffflussANalyse) ermöglicht die Durchführung von Güter- und Stoffflussanalysen gemäß ÖNORM S 2096. Mit Hilfe dieses Programms sollten 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.

Weiters ist basierend auf der Berücksichtigung von Unsicherheiten der Inputdaten eine Fehlerfortpflanzungsrechnung möglich, wodurch eine Beurteilung der Aussagekraft der SFA-Ergebnisse erleichtert wird. Außerdem ist es möglich, die Flüsse oder Lager mit den größten Unsicherheiten zu identifizieren und entsprechenden Forschungsbedarf abzuleiten.

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 vorliegen, 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, welche es auch ermöglicht, unbekannte Größen und deren Unsicherheitsbereiche zu bestimmen.

## 9.4.2 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 [Hedbrandt und Sörme 2001].

Den einzelnen (empirisch ermittelten) Daten wurden Unsicherheitsklassen zugeordnet. Die im Rahmen von Literaturrecherchen ermittelten Werte ließen sich drei Kategorien zuordnen: sichere Datenlage, mittlere Datenlage und unsichere Datenlage. Der recherchierte Wert wurde als Mittelwert angenommen und es erfolgte die Zuordnung eines Schwankungsbereiches (Tabelle 47), der wiederum dem 95 % Konfidenzintervall der Gaußschen Glockenkurve entspricht, welcher zur Berechnung der Standardabweichung dient.

Tabelle 47: Schwankungsbereiche nach Kategorien und Berechnung der jeweiligen Standardabweichung

Kategorie	95 % Konfidenzintervall	Standardabweichung
Geringe Datenunsicherheit	$\pm 25\%$ von X	$\sigma = X + 1/8$
Mittlere Datenunsicherheit	$\pm 50\%$ von X	$\sigma = X + 1/4$
Hohe Datenunsicherheit	$\pm 90\%$ von X	$\sigma = X + 9/20$

Beispiele für Daten mit geringer Unsicherheit sind statistische Informationen (z.B. Statistik Austria), gemessene Werte und Daten aus wissenschaftlichen Berichten. Das mittlere Unsicherheitsniveau wurde Werten, die in nur einem Bericht aufzufinden waren, welche sich auf ein abweichendes Referenzjahr beziehen oder die evtl. nur bedingt übertragbar sind, zugeordnet. Eigene Schätzungen bzw. nicht belegte Literaturangaben wurden mit hohen Datenunsicherheiten versehen.

## 9.5 Stoffflussanalyse für Neodym

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. Laut Buchert et al. (2011) wurden 2010 76 % des verfügbaren Neodyms zur Herstellung von Permanentmagneten verwendet (Abbildung 56).

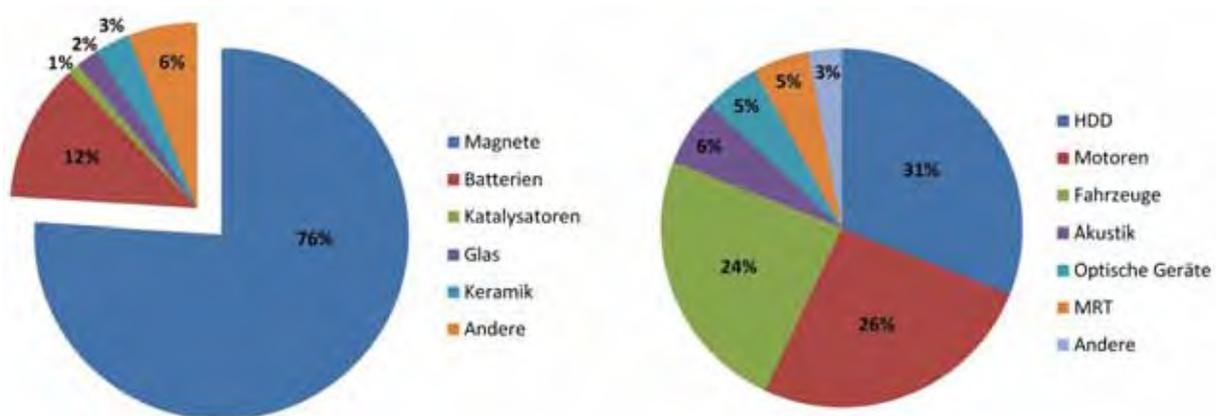


Abbildung 56: Globale Verwendung von Neodym im Jahr 2010 (links [Buchert et al. 2011]) und Anwendungen der NdFeB-Magnete 2009 (rechts [Moss et al. 2011])

Eine Darstellung der einzelnen Anwendungsgebiete mit den jeweiligen Stoffflüssen befindet sich im Anhang: Kapitel „Stoffflüsse ausgewählter kritischer Rohstoffe – Neodym“.

### 9.5.1 Ergebnisse

In Abbildung 57 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 vor allem 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 58). Aus den Stoffflussdiagrammen (Abbildung 57 und Abbildung 58) 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 sind 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 Lautsprecher (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 58), vor allem in Anbetracht der großen Inputflüsse. In Zukunft ist aber durch die

verstärkte Nutzung dieser Produkte von raschen Lagerzuwächsen dafür auszugehen (siehe dazu Kapitel 9.5.2).

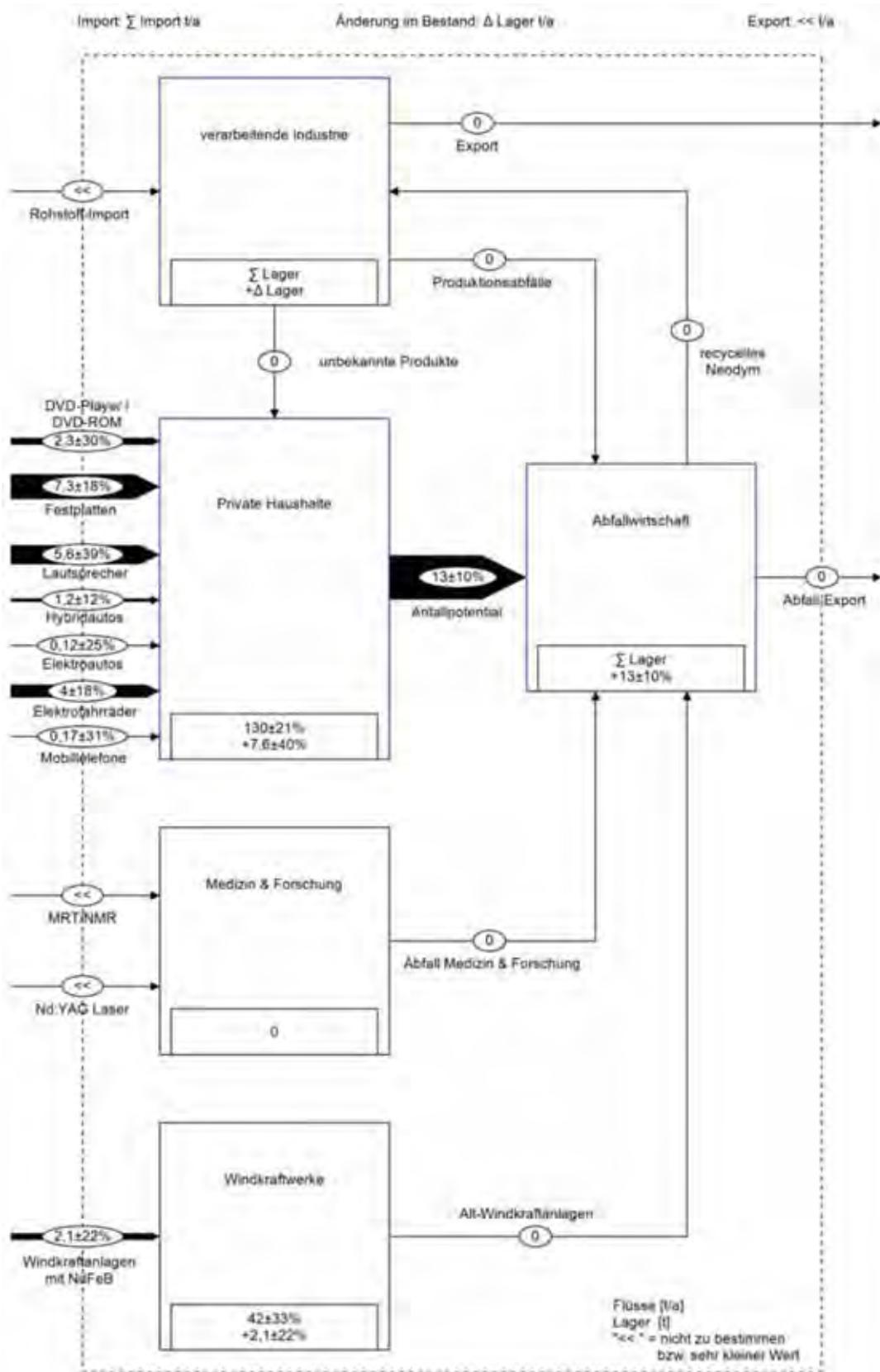


Abbildung 57: Stoffflussbild Neodym in Österreich (2011)

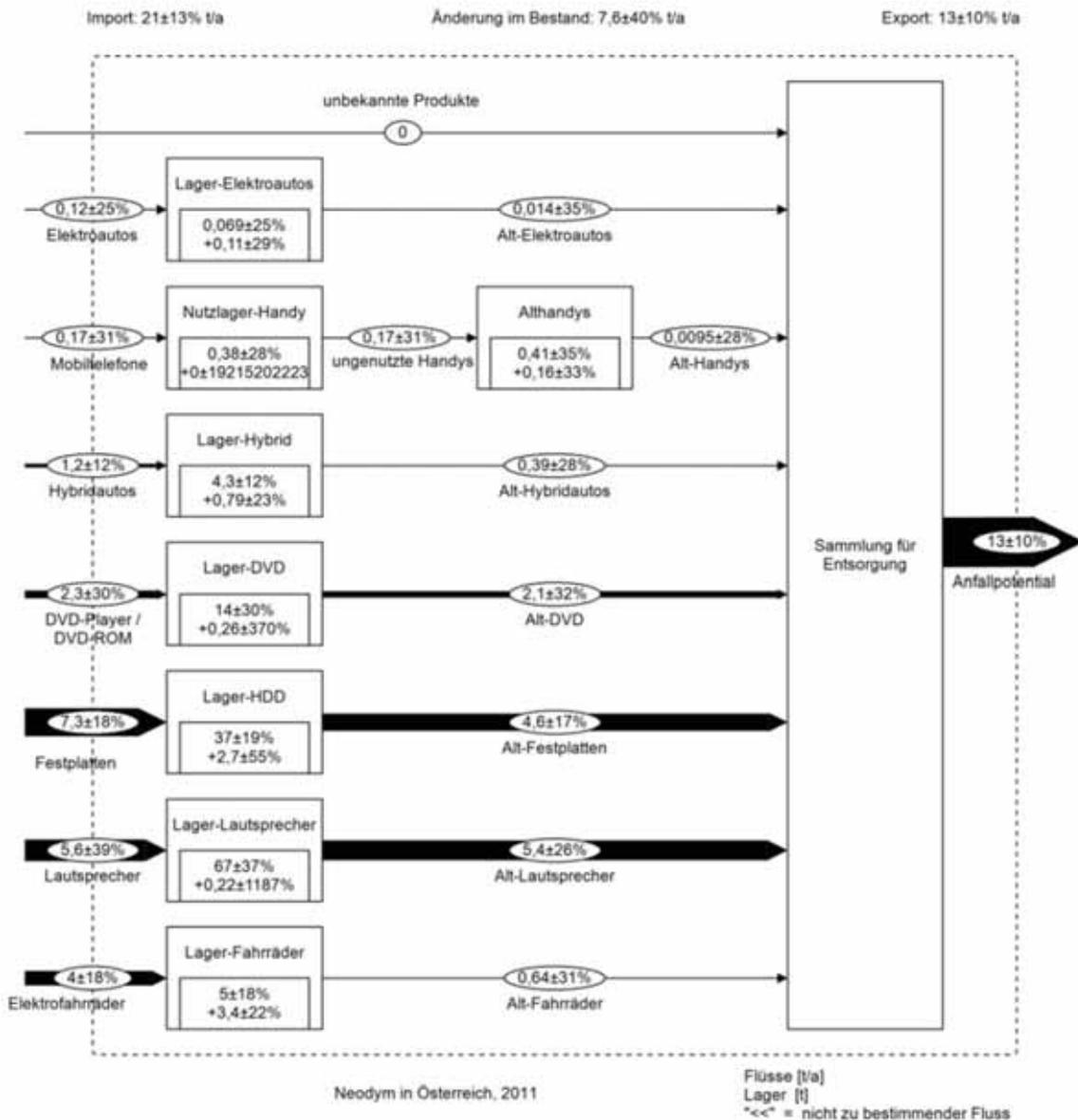


Abbildung 58: Subsystem „Private Haushalte“ im System Neodym in Österreich (2011)

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 57). Im Zuge der verstärkten Nutzung von Windkraft als Stromquelle kann für diesen Prozess in Zukunft von einem weiter wachsenden Lager ausgegangen werden (vgl. Kapitel 9.5.2). Da die Lebensdauer der Windkraftanlagen bei 20, wenn nicht sogar 30 Jahren liegt und die installierte Leistung in Österreich erst in diesem Jahrtausend stark zunahm, wird der Output-Fluss in das System Abfallwirtschaft mit 0 beziffert bzw. als sehr klein angesehen und folglich in der Darstellung mit „<<“ versehen.

Der Prozess „Verarbeitende Industrie“ konnte nicht bilanziert werden (siehe Abbildung 57), 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-Rohstoffpotenzialen in Österreich sind.

Der Prozess „Medizin und 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 57 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 57). Durch die niedrigen Nd-Konzentrationen in diesen Produkten ist auch davon auszugehen, dass diese ohnehin kaum einem Recycling zuzuführen wären.

In Bezug auf den Prozess „Abfallwirtschaft“ wurde 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 57) und somit für die bestehenden Systeme bis jetzt keine Rolle spielen (natürlich kann/wird sich das in Zukunft ändern). Eine Darstellung des Subsystems „Abfallwirtschaft“ erfolgt in Abbildung 59. Demgemäß werden Abfallflüsse im ersten Schritt einer Sortierung unterzogen. Im Anschluss wird ein Teil der Rohstoffe einem Recycling (Fluss „Abfall für Recycling“) zugeführt und ein Teil 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. Bei wiedergewonnenen Rohstoffen ist es möglich, diese erneut der verarbeitenden Industrie zur Verwertung zu übergeben. 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 machen.

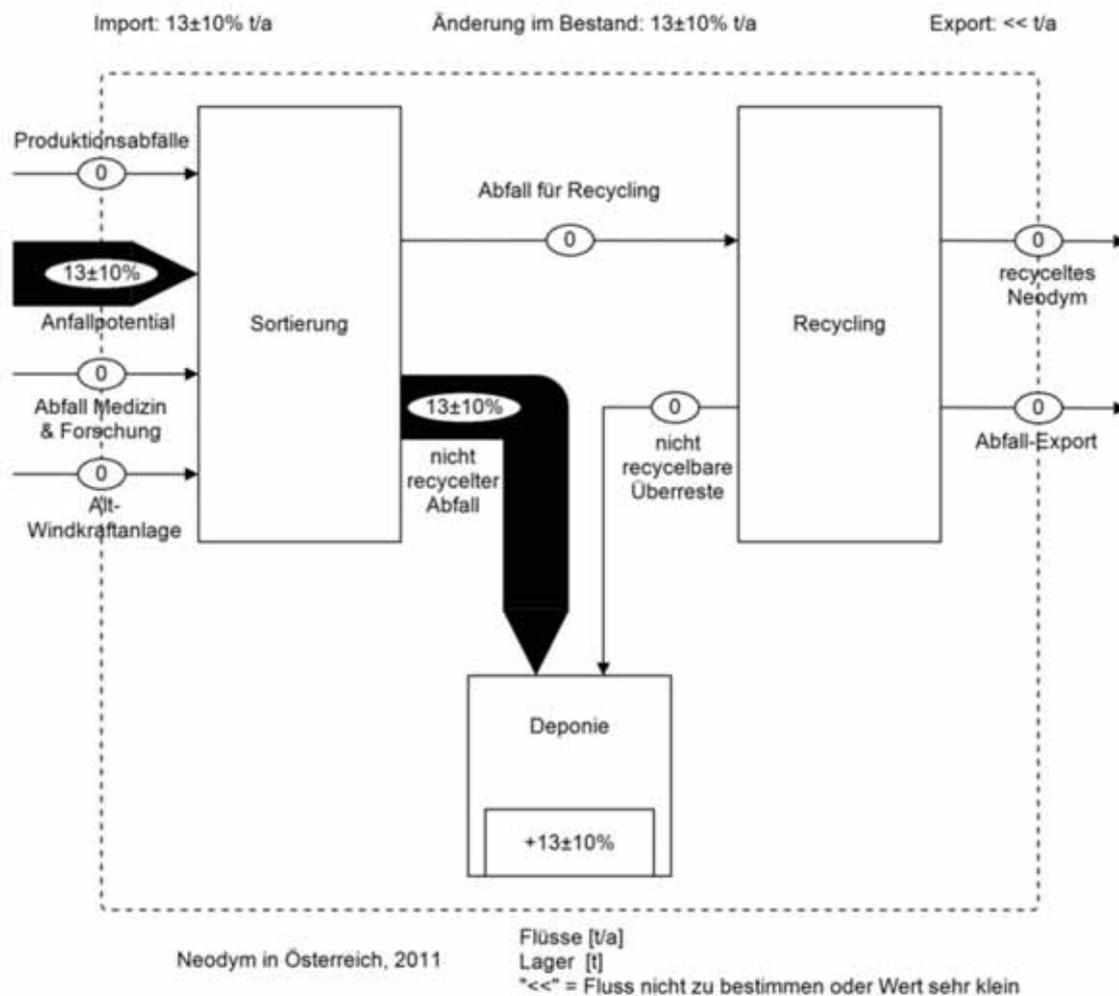


Abbildung 59: Subsystem Abfallwirtschaft im System Neodym in Österreich (2011)

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 der in Verkehr gesetzten 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 existierenden 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 näher eingegangen.

## 9.5.2 Diskussion und Nd-Rohstoffpotenziale

Dieses Kapitel soll einerseits das zukünftige Potenzial für das Recycling von Neodym aus verschiedenen Produktgruppen abschätzen als auch die Datenlage des österreichischen Neodym-Haushalts beschreiben.

### 9.5.2.1 Abschätzung zukünftiger Nd-Recyclingpotenziale

In diesem Abschnitt werden zukünftige Recyclingpotenziale 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 wurde 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 dienen, 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] erstellte anhand dieser Informationen die dazugehörige Weibull-Funktion und deren Parameter Alpha und Beta. Somit konnten 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 konnten 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 Recyclingpotenzial das liefern würde. Im Anschluss sind exemplarisch die Szenarien für Elektrofahrzeuge beschrieben und die Abschätzungen zur Ermittlung der zukünftigen Abfallmengen an Alt-Hybridautos im Detail dargestellt.

## Szenarien Elektrofahrzeuge – Fokus: Hybridautos

Um die zukünftig aufkommenden Abfallströme und das dadurch entstehende Recyclingpotenzial abschätzen zu können, wurde für Elektro- sowie 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]. Die Abbildung 60 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.

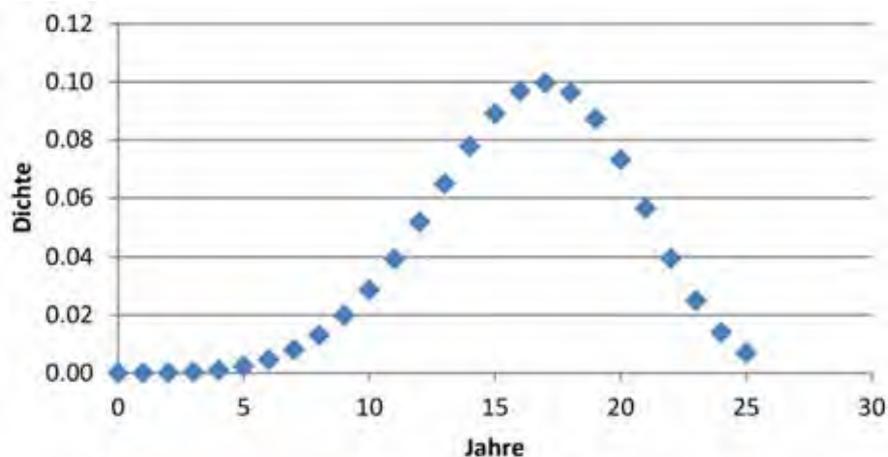


Abbildung 60: Weibull-Verteilung für Elektrofahrzeuge

Zur Abschätzung des durch Hybridautos entstehenden Recyclingpotenzials 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 zwei hier näher betrachtet werden.

Im ersten, das als „realistisches Szenario“ bezeichnet wird, würde die Anzahl der Hybridautos bis ins Jahr 2020 auf 992.874 ansteigen. Die Tabelle 48 zeigt die Entwicklung des Hybridauto-Lagers unter der Annahme, dass die Stückzahlen sich vom aktuellen Ausgangspunkt weg linear entwickeln. Um das Lager auch in die Vergangenheit abschätzen zu können, wurde ein exponentielles Wachstum bis zum Lagerstand 2011 gewählt. Als Jahresgrenze wird das Jahr 1997 herangezogen und das verbleibende Lager (200 Stück) als Fluss für dieses Jahr gewählt.

Tabelle 48: Angenommene Entwicklung des Hybridauto-Lagers bis 2020 im „realistischen Szenario“ und im „Worst-case-Szenario“

	<b>Hybridautos im Lager</b>	
<b>Jahr</b>	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

Die Abbildung 61 zeigt das entstehende Recyclingpotenzial, 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 wurden. Alle folgenden Flüsse ab dem Jahr 2020 könnten das Recyclingpotenzial 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 substituierbar ist 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.

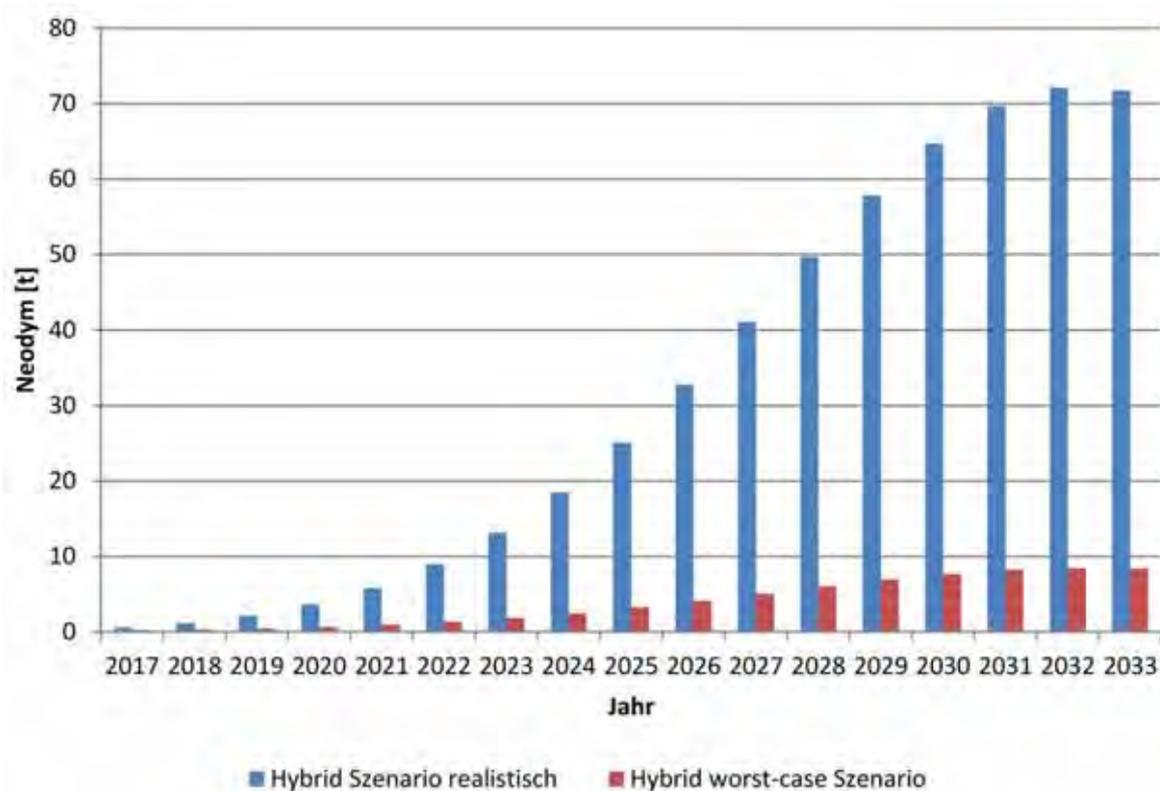


Abbildung 61: Recyclingpotenzial Hybridautos im „realistischen Szenario“ (blau) und im „Worst-case-Szenario“ (rot)

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 48). Durch Verknüpfung des Szenarios mit der Weibull-Verteilung für Elektrofahrzeuge wurde das in Abbildung 61 dargestellte Recyclingpotenzial berechnet, welches 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 Rohstoffpotenzial birgt. In Ermangelung anderweitiger Informationen wurde hier mit der durchschnittlichen Lebensdauer von Hybridautos gerechnet. Sollte die tatsächliche Lebensdauer kürzer sein, wäre diese Rohstoffquelle kurzfristiger einem Recycling zugänglich.

### Recyclingpotenziale der betrachteten Produktgruppen

Insgesamt wurden für Windkraftanlagen, Elektroautos, Hybridautos, Elektrofahrräder, Festplatten und Mobiltelefone Szenarien erstellt, um zukünftig anfallende Neodym-Mengen, die potenziell als sekundäre Ressourcen genutzt werden können, abschätzen zu können. Einige Perzentilwerte der jeweiligen Lebensdauerfunktionen sind in Tabelle 49 dargestellt.

Tabelle 49: Perzentilwerte zur Abbildung der Lebensdauer verschiedener Produktgruppen als Grundlage zur Ermittlung der entsprechenden Weibull-Verteilungen

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

In Tabelle 50 und Abbildung 62 sind die jährlich anfallenden Neodym-Mengen angeführt, 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 Recyclingpotenzial noch höher liegen würde (auch nach 2020 ist von einem Nd-Input in das System auszugehen). Im Jahr 2011 wird ein Anfallpotenzial für alle Produkte der privaten Haushalte, die Neodym enthalten, von ungefähr 13 Tonnen geschätzt. Die in Abbildung 62 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 Potenzial für ein Recycling dieser Produkte besteht.

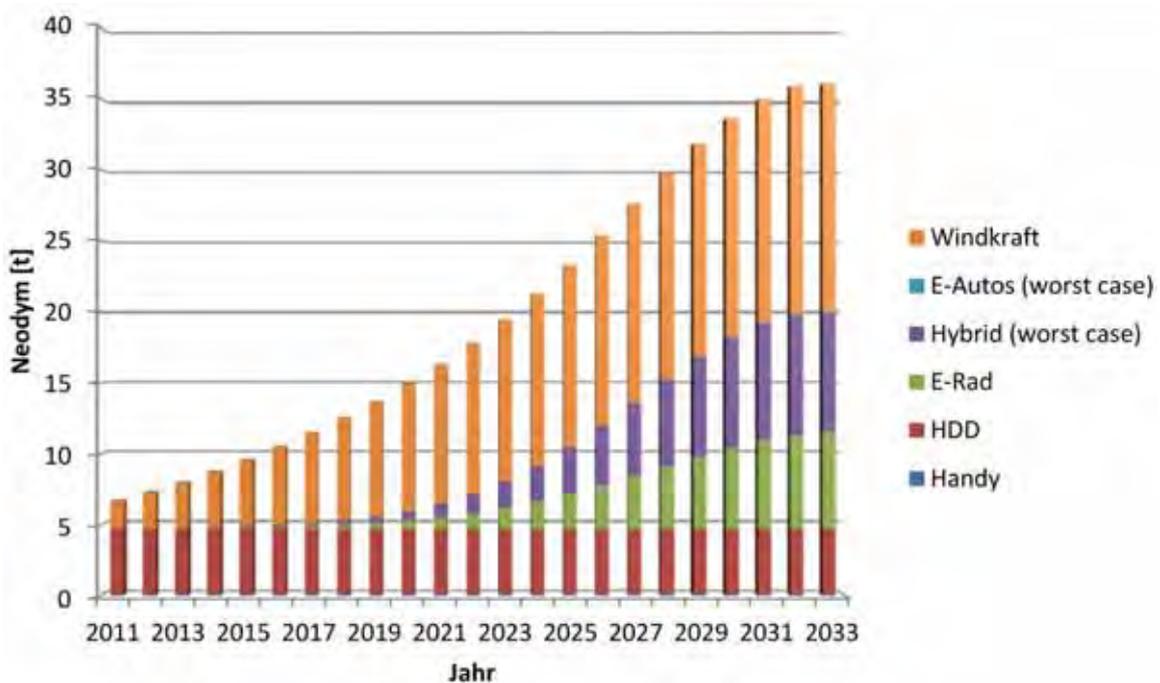


Abbildung 62: Darstellung des zukünftigen Recyclingpotenzials aller erstellten Szenarien

Tabelle 50: Recyclingpotenzial für Neodym im Prozess „Windkraft“ und in einigen Produkten aus dem Prozess „Private Haushalte“ nach Jahren

Jahr	Neodym [t]						gesamt
	Handy	HDD	E-Rad	Hybrid (worst case)	E-Autos (worst case)	Windkraft	
2011	0,165 pro Jahr	4,61 pro Jahr	0,006	0,036	0	1,88	6,70
2012			0,012	0,048	0	2,46	7,30
2013			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		

Die Abbildung 62 zeigt das Recyclingpotenzial der einzelnen, in Szenarien betrachteten Produkte aus den Prozessen Windkraft bzw. Private Haushalte (siehe Anhang: Kapitel 2.1.2 und 2.1.4). Bedingt durch das herangezogene Anfallpotenzial (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 Recyclingpotenzial aufweisen, gefolgt von den Windkraftanlagen. In den Jahren bis 2033 entwickeln die Windkraftanlagen das größte Recyclingpotenzial, gefolgt von Hybrid-Autos (Worst-case-Szenario) und den Elektrofahrzeugen. 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 vor allem die Lager, die derzeit stark anwachsen (vgl.

Abbildung 57), in Zukunft mit entsprechenden Abfallströmen verbunden sind, die große Recyclingpotenziale für Neodym aufweisen.

### **9.5.2.2 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 Nd im Wesentlichen auf eine einzige Firma beschränkt ist und die Firma Treibacher Industrie AG (TIAG) aus Datenschutzgründen keine Angaben dazu machen wollte. Obwohl die TIAG 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 Nd-Mengen als Rohstoff importiert werden. Des Weiteren war es nicht möglich, Angaben zu machen, 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 Recyclingpotenziale zu, welche auf diese Weise nicht identifizierbar sind.

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. Magneten 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 Elektro- sowie 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 Abfall-

sammlung 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 essenziell sind, um Verbesserungsvorschläge zur effizienteren Sammlung der Geräte machen zu können.

## 9.6 Stoffflussanalysen für Niob

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.

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 unedle, hochschmelzende Metalle, die einen höheren Schmelzpunkt als Platin haben (1.772 °C). Niob hat darüber hinaus mit 9,25 K (-263,9 °C) die höchste Sprungtemperatur von allen Elementen, unterhalb derer es supraleitend ist. Sein Hauptanwendungsgebiet ist die Nutzung als Stahlveredler (~90–95 %) in hochfesten Stähle, z.B. für die Automobilindustrie, Schienen, Pipelines, Werkzeuge, Schiffbau, Gebäude und Brücken. Laut Angerer et al. (2009) findet Niob (in den USA) zu mehr als 95 % in der Stahlindustrie Verwendung während nach Gille und Meier (2012) in Deutschland im Jahr 2011 90 % des verbrauchten Niobs auf HSLA-Stähle entfielen (Abbildung 63). Gemäß USGS (2012) sind es 75 % des Niobs, die als Ferro-Nb in die Stahlindustrie gehen. Weitere Anwendungen sind:

- Supraleiter
- Münzmetall
- Superlegierungen
- Elektrolytkondensatoren
- Schmuckherstellung

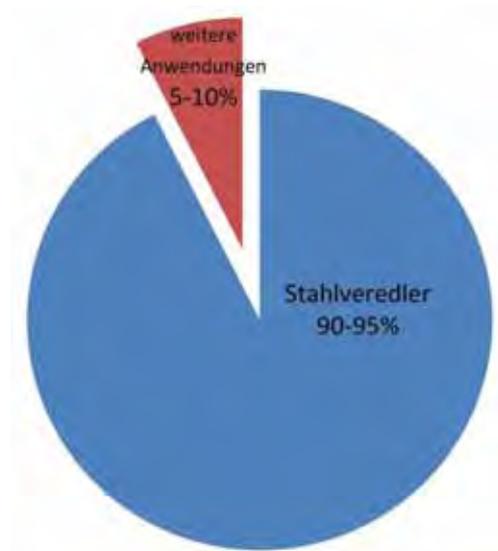


Abbildung 63: Verwendung von Niob (Angerer et al. 2009; Gille und Maier 2012)

Die SFA für Niob in Österreich (2011) wurde in folgende Prozesse gegliedert, welche im Anhang: Kapitel „Stoffflüsse ausgewählter kritischer Rohstoffe – Niob“ detailliert beschrieben sind:

- Industrie und Gewerbe
- Private Haushalte und Infrastruktur
- Abfallwirtschaft

### 9.6.1 Ergebnisse

In Abbildung 64 ist der Niob-Haushalt für Österreich im Jahr 2011 dargestellt. Die bei weitem größten quantifizierten Niob-Flüsse in dieser SFA sind jene, die zur Stahlproduktion in Österreich gehören: der Ferro-Niob-Import mit  $770 \pm 121$  t/a und der Export an Niob-haltigen Stählen mit  $616 \pm 121$  t/a, genauer dargestellt im Stoffflussdiagramm Industrie und Gewerbe (Abbildung 65). 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.

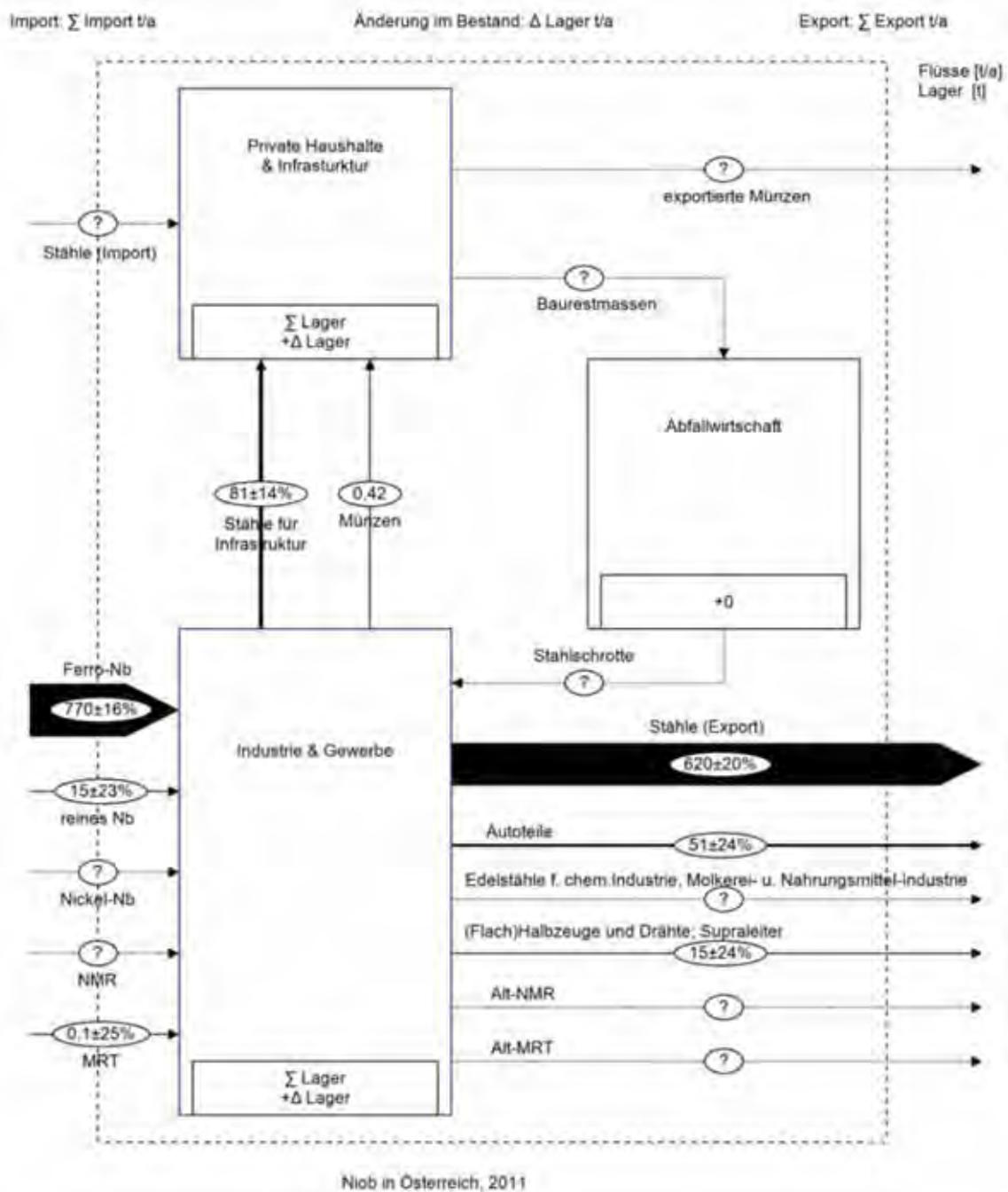


Abbildung 64: Stoffflussbild Niob in Österreich (2011)

Gepunktete Flüsse können nicht quantifiziert werden und werden daher in die Bilanzierung nicht miteinbezogen. Exakt bestimmbar ist die Niob-Menge in den in Österreich am Technologiezentrum der Plansee Group 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 verblieben – ist allerdings mit 3,75 t verglichen mit dem jährlichen Niob-Verbrauch in der Stahlindustrie sehr klein.

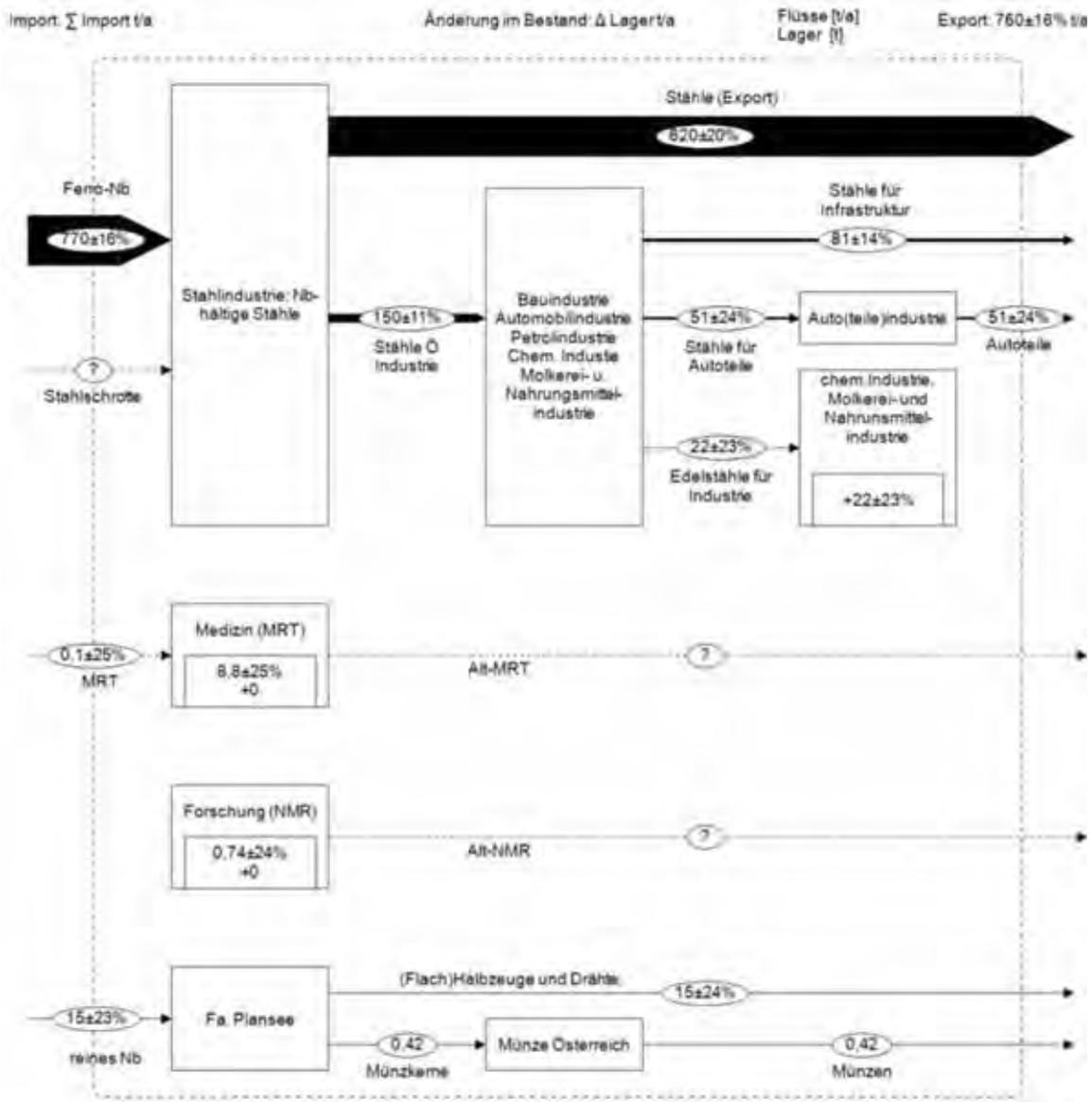


Abbildung 65: Subsystem Industrie und Gewerbe im System Niob in Österreich (2011)

Die Niob-Menge in Kernspin- und Magnetresonanztomographie-Geräten (NMR bzw. MRT), 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  $0,74 \pm 0,18$  t als sehr klein, jenes in MRT-Geräten mit  $8,75 \pm 2,2$  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 Zirkonium bzw. Molybdän hergestellt.

Der Prozess Abfallwirtschaft ist mangels Informationen als einziger nicht in einem Subsystem darstellbar. Die Nb-hältigen Stähle aus den Baurestmassen werden zwar vom mineralischen Baumaterialien abgetrennt und Stahlwerken zum Einschmelzen zugeführt, allerdings erfolgt dieser Prozess dissipativ, das heißt es erfolgt keine separate Erfassung von Niob-hältigen Stählen, sondern eine Wiederverwendung als Gesamtschrotte in der Stahlproduktion. Bei dieser Vorgehensweise ist das in den Spezialstählen enthaltene Niob auch zu einem späteren Zeitpunkt keinem Recycling mehr zugänglich.

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

Der Prozess Bauwerke und Pipelines wurde dem Subsystem Private Haushalte und Infrastruktur (Abbildung 66) zugeordnet. Niob in Stählen ist in Form von Spezialstählen in großer Menge in zahlreichen Bauwerken „gespeichert“, das heißt Bauwerke stellen ein großes Lager für Nb-hältige Stähle dar. Da Bauwerke einem stetigen Erneuerungsprozess unterliegen, entstehen hier relevante Niob-Flüsse sowohl in den Prozess Private Haushalte und 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 (vor allem für Pipelines, auch für Schienen) (siehe Abbildung 64) werden in Österreich hergestellt, aber auch aus dem Ausland importiert. Der Fluss der Stähle für die Infrastruktur von Industrie und Gewerbe (von den Stahlwerken) zu den privaten Haushalten konnte anhand der Umsatzzahlen der Voestalpine abgeschätzt werden.

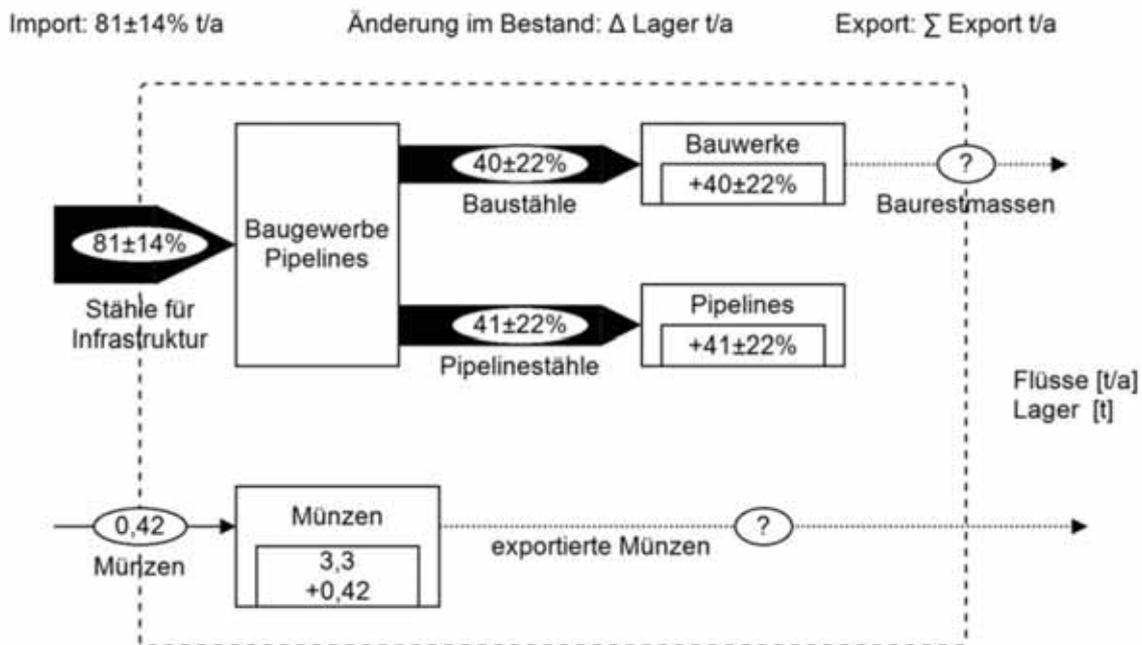


Abbildung 66: Subsystem Private Haushalte und Infrastruktur im System Niob in Österreich (2011)

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 Nb-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 sind die Ergebnisse dementsprechend als erste, grobe Abschätzungen anzusehen. Dazu kommt die große Anzahl an unbestimmten Flüssen, welche 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 näher eingegangen.

## 9.6.2 Diskussion und Nb-Rohstoffpotenziale

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

### 9.6.2.1 Recyclingpotenziale für Niob

Da Niob in erster Linie als Stahlveredler Einsatz findet, stellen die Anwendungen in Spezialstählen die wesentlichen Flüsse (und Lager) in der Stoffflussanalyse für Niob in Österreich dar (vgl. Abbildung 64). Obwohl die Verwendungsgebiete der Spezialstähle generell bekannt

sind, konnte 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 Nb-Mengen in Spezialstählen bei weitem das größte Potenzial für ein Recycling dar, ein Wiedereinsatz (bzw. Verwertung) in diesen Anwendungen erfolgt jedoch 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 Gew.-%), die 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 darüber bei den jeweiligen entsprechenden Stählen 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 Schrottreycling 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 Potenzial für das Recycling von Niob beinhalten. Eine Übergabe an die Abfallwirtschaft wird in der Regel nur unbeabsichtigt erfolgen, welche 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 65). 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 Recyclingpotenzial darstellt, ist davon auszugehen, dass die Produzenten dieses Potenzial zu nutzen wissen. Obwohl massive Unsicherheiten in Bezug auf die Niob-Gehalte der einzelnen Geräte bestehen (vgl. Anhang: Kapitel 2.2.1.2), 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 64) unterstreichen, dass ein Nb-Recycling aus diesen Geräten in jedem Fall von untergeordneter Bedeutung im Gesamtsystem wäre.

### **9.6.2.2 Datenlage für die Erstellung des österreichischen Niob-Haushaltes**

Wie im vorigen Abschnitt bereits erwähnt waren zur Erzeugung Niob-hältiger Spezialstähle nur allgemeine Angaben verfügbar. Dadurch kann die Verteilung von Niob auf unterschiedliche Stahlprodukte nur generell abgeschätzt werden – Produktionszahlen für die jeweiligen Stahlsorten waren nicht verfügbar. Insgesamt war die Bilanzierung des Niob-Einsatzes in der Stahlindustrie nur möglich, da vom Voestalpine-Konzern eine Angabe zu den insgesamt eingesetzten Niob-Mengen bei der Produktion gemacht wurde. Die Anwendungsgebiete 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, die Niob-Gehalte einzelner Stähle wurden anhand internationaler Angaben bestimmt, 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 vor-

handener Recyclingpotenziale 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 Recyclingpotenzial 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 potenziellen Verwertung des Niobs in den Münzen bei.

## 9.7 Stoffflussanalyse für Palladium

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. Es wurde 1803 entdeckt und nach dem 2 Jahre vorher aufgespürten Asteroiden Pallas benannt. 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 geht es bei Luftzutritt langsam in Lösung. 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 1.200-fache und kolloidale Palladiumlösungen das 3.000-fache des eigenen Volumens an Wasserstoff binden. Es ist möglich, die Wasserstoffaufnahme als Lösen von Wasserstoff im Metallgitter und als Bildung eines Palladiumhydrids mit der ungefähren Zusammensetzung Pd<sub>2</sub>H zu beschreiben. Bei 30 °C und Normaldruck entspricht das maximale Wasserstoff-Palladium-Verhältnis der Formel PdH<sub>0,608</sub>.

Tabelle 51: Produktionsdaten von Palladium (Quellen: [Lutz 2010, BGR 2007])

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

Die Hauptanwendungen von Pd sind 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 %

Die weiteren Anwendungen (~ 20,5 %, Abbildung 67) umfassen unter anderem:

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

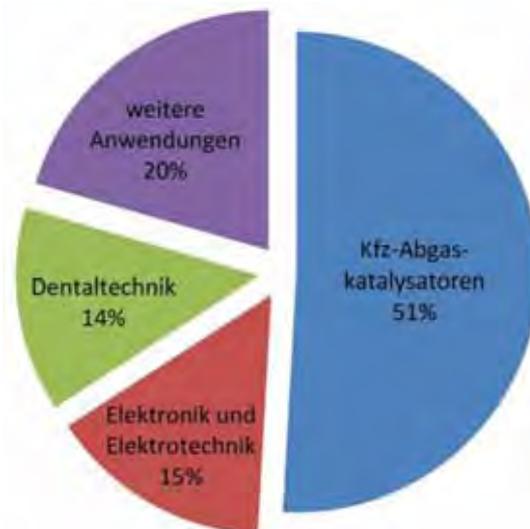


Abbildung 67: Anwendungsgebiete von Palladium [Angerer et al. 2009]

Pd soll zukünftig vermehrt in miniaturisierten Kondensatoren, zur Meerwasserentsalzung, als Elektrodenmaterial in Brennstoffzellen und als Speichermaterial für Wasserstoff in zukünftigen Wasserstoffautos zum Einsatz kommen. Die SFA für Palladium in Österreich (2011) wurde in folgende Prozesse gegliedert, welche im Anhang: Kapitel „Stoffflüsse ausgewählter kritischer Rohstoffe – Palladium“ detailliert beschrieben sind:

- Industrie und Gewerbe
- Private Haushalte
- Abfallwirtschaft

### 9.7.1 Ergebnisse

In Abbildung 68 ist der Palladium-Haushalt für Österreich im Jahr 2011 dargestellt. Der über alle quantifizierbaren Pd-Flüsse dominierende ist der Neuwagenimport mit  $680 \pm 170$  kg/a, gefolgt vom Alt-Auto-Export ( $180 \pm 45$  kg) und den (in Österreich) verwerteten bzw. Schredderbetrieben zugeführten Alt-Autos ( $130 \pm 34$  kg). Die in Österreich produzierten Autos werden in Abbildung 69 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.  $77 \pm 19$  kg Palladium importiert, die 2011 angefallenen Elektroaltgeräte enthielten ca.  $14 \pm 1,8$  kg Palladium. Sowohl die Pd-Flüsse in den KFZ als auch jene in den Elektrogeräten und die dazugehörigen Pd-Lager werden im Subsystem „Private Haushalte“ detailliert dargestellt und beschrieben (vgl. Abbildung 70).

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

Wie viel Palladium für industrielle Anwendungen einerseits an reinem Palladium in Form von Ingots oder Pulver, andererseits als Katalysatoren 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.

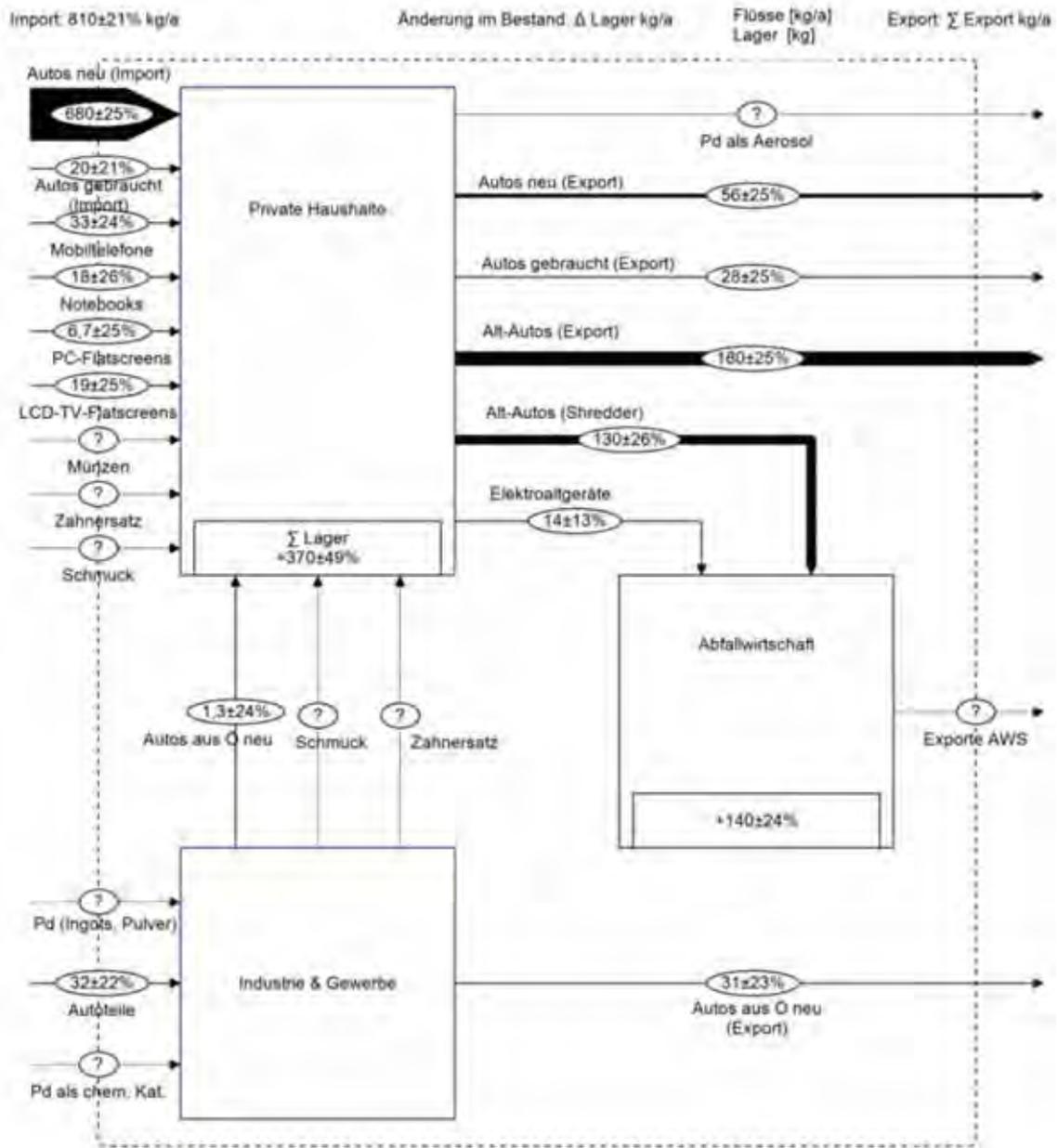


Abbildung 68: Stoffflussbild Palladium in Österreich (2011)

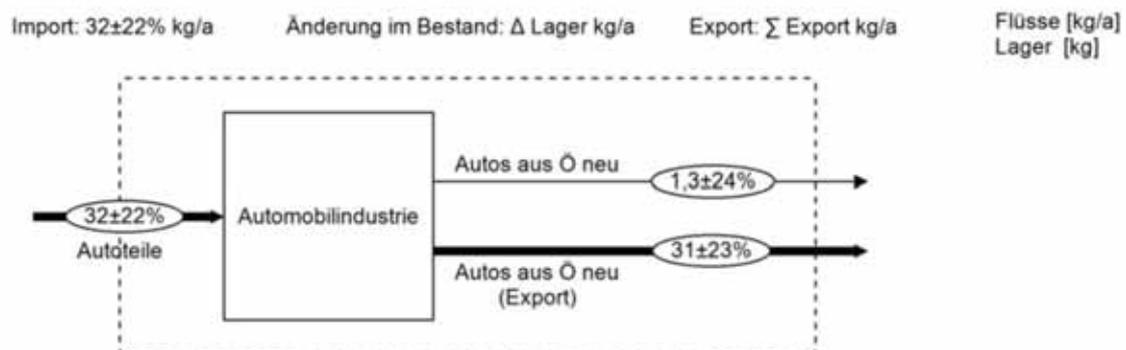


Abbildung 69: Subsystem Industrie und Gewerbe im System Palladium in Österreich (2011)

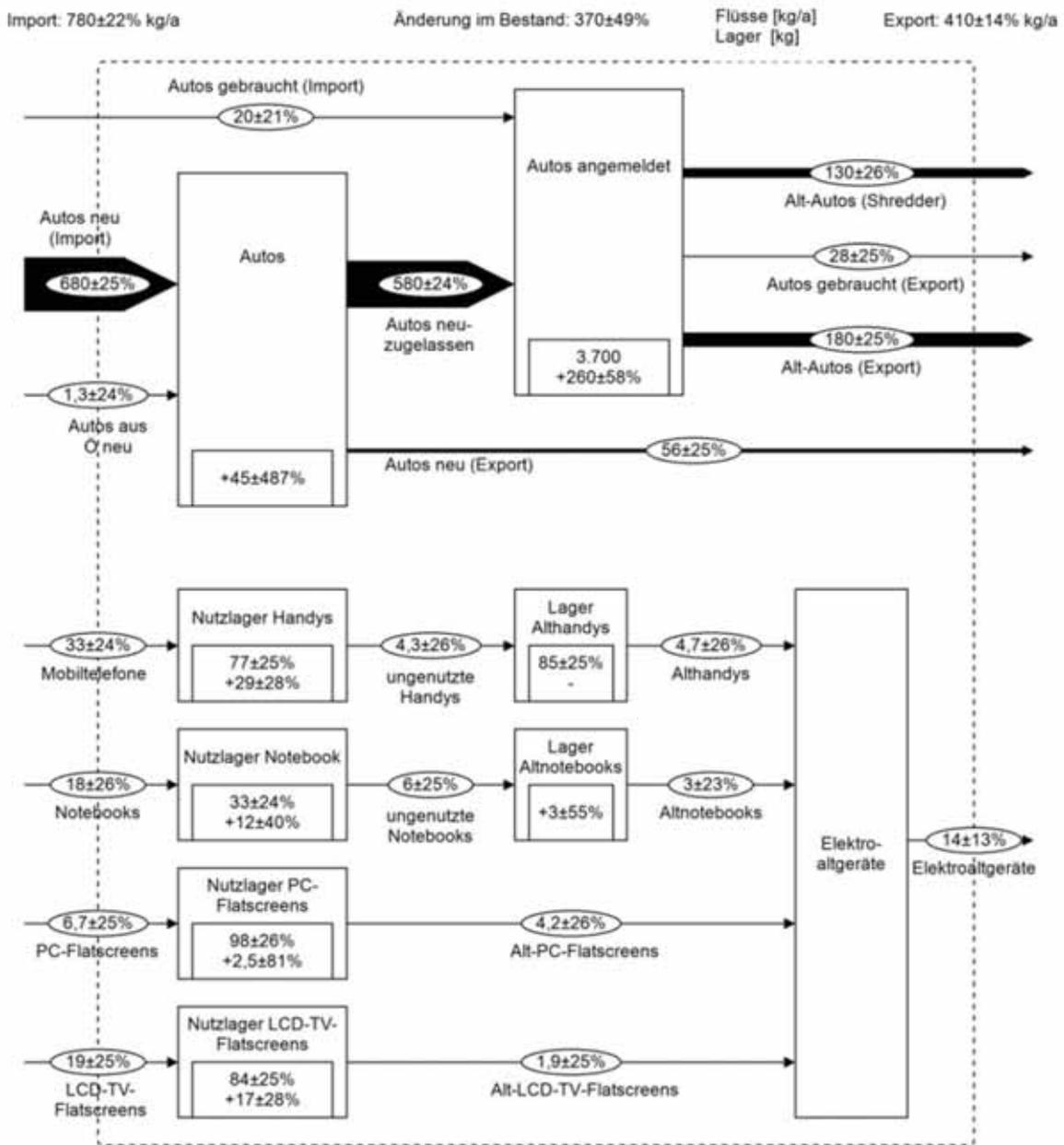


Abbildung 70: Subsystem Private Haushalte im System Palladium in Österreich (2011)

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.

Auch in Abbildung 70 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 ( $3,7 + 0,26 \pm 0,15$  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.  $77 \pm 19$  kg Palladium, die Nutzlager der Elektrogeräte gesamt rund 350 kg ( $(290 \pm 73) + (61 \pm 20)$  kg) und die Elektroaltgeräte,

welche über die Sammelstellen zur Abfallwirtschaft gehen ca.  $14 \pm 1,8$  kg Pd. 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 ( $\sim 350$  kg versus 4 t Pd). Entsprechend dominant sind folglich die Flüsse der Kfz: Neuwagenimport ( $680 \pm 170$  kg Pd/a), neuzugelassene Autos und Alt-Kfz, die exportiert ( $180 \pm 45$  kg Pd/a), und jene, die über (österreichische) Schredderbetriebe einer Verwertung zugeführt werden ( $130 \pm 34$  kg Pd/a). Wie im Anhang: Kapitel 2.3.1.1 ausgeführt ist unklar, wie der „Lagerzuwachs“ von  $\sim 19.000$  neuen Pkw, welche einer Palladium-Menge von 45 kg ( $\pm 220$  kg) entsprechen, zustande kommt. Die Datenlage bei Kraftfahrzeugen ist daher zum Teil als inkonsistent, jene 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 und Öhlinger 2012] z.B. nicht stückweise, sondern nur massenmäßig erfasst.

In Abbildung 69 ist die österreichische Autoproduktion abgebildet: Es werden Autoteile nach Österreich importiert, aus denen im Jahr 2011 vier Autotypen (KTM X-Bow, Peugeot 308 RC Z, Aston Martin, Mini R60) zusammengebaut wurden. Von diesen 130.411 in Österreich produzierten Kfz, die  $32 \pm 7,1$  kg Palladium entsprechen, wurden 99,4 % exportiert.

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 Neuwagen), während 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 näher eingegangen.

## **9.7.2 Diskussion und Palladium-Rohstoffpotenziale**

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

### **9.7.2.1 Recyclingpotenziale 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 68). Das Palladium-Lager in den Katalysatoren der ange-

meldeten Fahrzeuge betrug 2011 ca. 3,7 t, was in etwa dem 5-fachen Gesamtimport an Pd nach Österreich entspricht. Dementsprechend ist klar, dass vor allem das Palladium in Autokatalysatoren ein erhebliches Recyclingpotenzial darstellt. Derzeit erfolgt aber nur bei ca. 36 % der Autokatalysatoren ein Recycling, da 64 % der Autokatalysatoren in Alt-Kfz nicht zu Schredderbetrieben gelangen, sondern ins Ausland exportiert werden. Der Altfahrzeug-Schwund ist somit primär dafür verantwortlich, dass sich nur ein relativ geringer Teil des Palladiums in Autokatalysatoren verwerten lässt. Da die Alt-Kfz in Länder „verschwinden“, welche 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 [Kristof et al. 2010, Hagelüken 2008]. Aus den genannten Gründen ist es für eine optimale Nutzung des Palladium-Recyclingpotenzials 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 Potenzial 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 70). 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 % [Chancerel et al. 2009]) zurückgewonnen, 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 Recyclingpotenziale 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 potenzielle Palladium-Rückgewinnung haben. Ähnliches gilt in Bezug auf Dentalanwendungen, die zusätzlich in Bezug auf die Palladium-Menge von stark untergeordneter Bedeutung sein dürften.

### **9.7.2.2 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 bzw. 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 Gebrauchsgegenstände 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. Bei anderen erfolgt die Entsorgung mit dem Restmüll und keine getrennte Sammlung. Dementsprechend stellt die Abschätzung der Produkte, welche 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 68). 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 Potenziale für ein effektiveres Palladium-Recycling aus diesen Produkten erscheinen diese Datenlücken im Vergleich zu jenen im Bereich der Alt-Autokatalysatoren und der Elektroaltgeräte jedoch nachrangig.

## 9.8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Stoffflussanalysen (SFA) stellen ein geeignetes Werkzeug zur Untersuchung potenzieller 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, Platingruppenmetalle, 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 Ressourcenpotenziale innerhalb Österreichs (z.B. Recycling von Rohstoffen aus bisher ungenutzten Abfallströmen) die Abhängigkeit der österreichischen Wirtschaft von Rohstoffimporten verringern.

Ein 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 potenzielle 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 zu definieren: 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. Für diese drei ausgewählten kritischen Rohstoffe erfolgte jeweils die Ermittlung der Stoffbilanzen für Österreich im Jahr 2011. Die Systeme wurden zunächst qualitativ beschrieben, wesentliche Stoffflüsse identifiziert und schließlich (soweit wie möglich) quantifiziert.

### 9.8.1 Stoffflussanalysen für Neodym

Das System zur Analyse des Neodym-Haushaltes für Österreich beinhaltet die Prozesse „Private Haushalte (PHH)“, „Windkraftwerke“, „Verarbeitende Industrie“, „Medizin und Forschung“ sowie „Abfallwirtschaft“. Die größten Nd-Flüsse in Österreich im Jahr 2011 stellen die Permanentmagneten in verschiedenen Elektro- und Elektronikanwendungen dar. Festplatten und Lautsprecher bilden jeweils die größten Inputs in den und auch die größten Lager im PHH (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 haben 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 Neodym-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.

Beim Prozess „Medizin und Forschung“ war keine Bilanzierung möglich, 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-Recyclingpotenzial 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.

### 9.8.2 Stoffflussanalyse für Niob

Das System zur Analyse des Niob-Haushaltes für Österreich beinhaltet die Prozesse „Private Haushalte und Infrastruktur“, „Industrie und 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 zu ermitteln waren, 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 Recyclingpotenzial 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, welche eine getrennte Sammlung und Verwertung ausschließt. In Bezug auf das Recycling gelten diese Aussagen in gleicher Weise für Niob in Schmuck, allerdings konnten hierbei die Niob-Mengen aufgrund der Datenlage nicht bestimmt werden.

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 ebenfalls für die Wartung und Entsorgung zuständig ist und dieser bei entsprechenden Anreizen selbst 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 gegeben, 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.

### 9.8.3 Stoffflussanalyse für Palladium

Das System zur Analyse des Palladium-Haushaltes für Österreich beinhaltet die Prozesse „Private Haushalte“, „Industrie und 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, welches 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 Sekundärrohstoffpotenzial für Palladium in Österreich haben.

Insgesamt ist klar, dass vor allem das Palladium in Autokatalysatoren ein erhebliches Recyclingpotenzial darstellt. Im Jahr 2011 wurden in Österreich aber nur ca. 36 % der Autokatalysatoren einem Recycling zugeführt. Der Rest gelangte nicht zu Schredderbetrieben, 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).

#### **9.8.4 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 vorliegen. Außerdem musste ebenfalls 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), welche die Bestimmung eines repräsentativen Wertes erschweren bzw. unmöglich machen.

Wohingegen eine Abschätzungen 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 Flüsse in der verarbeitenden Industrie nicht wesentlich für die Beurteilung der Nd-Rohstoffpotenziale 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 eine 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 findet sich in der Gruppe der Platingruppenmetalle und sogar bei Niob erfolgt eine Erfassung gemeinsam mit Tantal in den betreffenden Statistiken. 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.

## 9.9 Literatur

Ad-hoc Working Group, 2010: Critical raw materials for the EU: Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. Internet: [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index\\_de.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index_de.htm).

Angerer, G. et al., 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 P. H. Brunner, 1991: Metabolism of the Antroposphere. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- bmvit, 2010: Strategie und Instrumente sowie prioritäre Anwender-und Einsatzbereiche für den Nationalen Einführungsplan Elektromobilität.
- Brown, T. J. et al., 2012a: European Mineral Statistics 2006–2010 (A product of the World Mineral Statistics Database), British Geological Survey. Keyworth, Nottingham. Internet: <http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/europeanStatistics.html>.
- Brown, T. J. et al., 2012b: World Mineral Production 2006–2010, British Geological Survey. Internet: <http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldStatistics.html>.
- Brunner, P. H. und H. Rechberger, 2004: Practical Handbook of Material Flow Analysis. CRC Press, Raton, Florida, USA: Lewis Publishers.
- Brunner, P. H. und H. Rechberger, 2012: VU Urbaner Stoffhaushalt – Methodik, Internet: <https://tiss.tuwien.ac.at/education/course/documents.xhtml?windowId=5ff&courseNr=225023&semester=2012S>.
- Buchert, M. et al., 2011: Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität.
- BGR, 2007: Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe für Metall- und Nichtmetallrohstoffe. Hannover: BGR.
- 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.
- Daxbeck, H. et al., 2003: Güterhaushalt Österreich – Abfallwirtschaft als Teil des Ressourcenmanagements – Welches sind die wichtigsten Güter- und Abfallflüsse. RMA Wien.
- Döberl, G. et al., 2004: Verknüpfung Rohstofflager – anthropogene Lager – letzte Senken. Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, TU Wien, Bericht für Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit.
- Du, X. und T. E. Graedel, 2011: Global In-Use Stocks of the Rare Earth Elements: A First Estimate. Environmental Science and Technology, 45, 4096–4101.
- Eggert, P., 2012: Niob – ein junges Legierungsmetall hat sich auf dem Weltmarkt etabliert, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung DIW Berlin. Internet: [http://www.diw.de/deutsch/99\\_45\\_2/30967.html](http://www.diw.de/deutsch/99_45_2/30967.html).
- Gattringer, C., 2012: Stoffflussanalyse von Neodym in Hochtechnologieanwendungen für Österreich, Diplomarbeit am Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, TU Wien.

- Gerst, M. D. und T. E. Graedel, 2008: In-Use Stocks of Metals: Status and Implications. *Environmental Science & Technology*, 42, 7038–7045.
- Gille, G. und A. Meier, 2012: Recycling von Refraktärmetallen, Vortrag auf der Recycling- und Rohstoffkonferenz 2012 in Berlin (Band 5 der Recycling- und Rohstoffkonferenz 2012).
- Graedel, T. E. et al., 2002: The contemporary European copper cycle: The characterization of technological copper cycles. *Ecological Economics*, 42, 9–26.
- Graedel, T. E., 2011: On the Future Availability of the Energy Metals. *Annual Review of Materials Research*, 41, 323–335.
- Hagelüken, C., 2005: Der Kreislauf der Platinmetalle – Recycling aus Katalysatoren. Sonderdruck aus: Hagelüken et al., *Autoabgaskatalysatoren*, Expert Verlag 2005. Internet: [http://www.preciousmetals.unicore.com/PMR/Media/spentAutocats/show\\_der\\_KreislaufDerPlatinmetalle.pdf](http://www.preciousmetals.unicore.com/PMR/Media/spentAutocats/show_der_KreislaufDerPlatinmetalle.pdf).
- Hagelüken, C., 2008: Recycling von Autoabgaskatalysatoren, *Metallurgisches Seminar Schriftenreihe der GDMB*, Heft 115, 69–85.
- Hedbrant, J. und L. Sörme, 2001: Data vagueness and uncertainties in urban heavy-metal data collection. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1, 43–53.
- Kristof, K. et al., 2010: Endbericht des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes). Internet: <http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/index.html>.
- Lutz, F., 2010: Die künftige Verfügbarkeit knapper, strategisch wichtiger Metalle, Risiken und Herausforderungen, *Denkwerk Zukunft – Stiftung kulturelle Erneuerung*, 2010 Major, R.H (Hg.) (1938): Santorio Santorio. Internet: [www.denkwerkzukunft.de/downloads/Verfuegbarkeit\\_von\\_Metallen.pdf](http://www.denkwerkzukunft.de/downloads/Verfuegbarkeit_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.
- Moss, R. L. et al., 2011: Critical Metals in Strategic Energy Technologies. *Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies*.
- Oguchi, M. et al., 2011: A preliminary categorization of end-of-life electrical and electronic equipment as secondary metal resources. *Waste Management*, 31, 2150–2160.
- ÖNORM, 2005a: ÖNORM S2096-1 Stoffflussanalyse Teil 1: Anwendung in der Abfallwirtschaft – Begriffe. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- ÖNORM, 2005b: ÖNORM S 2096-2 Stoffflussanalyse Teil 2: 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.
- Palisade Corporation, 2012: Software @ risk Version 5.7.
- Reck, B. K. et al., 2008: Anthropogenic Nickel Cycle: Insights into Use, Trade, and Recycling. *Environmental Science and Technology*, 42, 3394–3400.
- Runge, A., 2010: Modellierung der Lebensdauer von Systemen.
- Schöllner, G. et al., 2006: Verknüpfung Rohstofflager – anthropogene Lager – letzte Senken im Bundesland Steiermark. Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, TU Wien, Auftraggeber: Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung 19D.
- Schüler, D. et al., 2011: Study on Rare Earths and Their Recycling. Öko-Institut e.V., Darmstadt (Final Report for the Greens/EFA Group in the European Parliament).
- Tesar, M. und A. Öhlinger, 2012: Flachbildschirmaltgeräte – Anforderungen an die Behandlung und Status in Österreich, Umweltbundesamt.
- USGS, 2012: Mineral Commodity Summaries 2012. Internet: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2012/mcs2012.pdf>.
- Wang, T. et al., 2007: Forging the Anthropogenic Iron Cycle- *Environmental Science & Technology*, 41, 5120–5129.
- Weber, L. et al., 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.

## 10. Abfallwirtschaft

Ausgehend von der ÖNORM S 2100 und den Daten des Bundesabfallwirtschaftsplans (BAWP) 2011 konnten die wichtigsten Schlüsselnummern (SN) für die relevanten Abfälle, die kritische Rohstoffe enthalten, identifiziert werden. Diese sind in Tabelle 52 angeführt.

Tabelle 52: Auswahl an relevanten Schlüsselnummern

SN	Abfallbezeichnung	Menge [t]	Nähere Erklärung (Jahreszahl)
35107	Kfz-Katalysatoren und andere Edelmetall-Katalysatoren	k.A.	-
35201	Elektrische und elektronische Geräte und Geräteteile, mit umweltrelevanten Mengen an gefährlichen Abfällen oder Inhaltsstoffen	2.140	Aufkommen (2009) <sup>1</sup>
		22	Export (2009) <sup>2</sup>
		32,8	Export (2010) <sup>3</sup>
35202	Elektrische und elektronische Geräte und Geräteteile, ohne umweltrelevante Mengen an gefährlichen Abfällen oder Inhaltsstoffen	2,4	Abgelagert (2010) <sup>3</sup>
35207	Leiterplatten, bestückt	k.A.	-
35208	Leiterplatten, entstückt oder unbestückt	k.A.	-
35209	Elektrolytkondensatoren	k.A.	-
35210	Bildröhren (nach dem Prinzip der Kathodenstrahlröhre)	1.031	Export (2009) <sup>4</sup>
		2.690	Export (2010) <sup>3</sup>
35211	Flüssigkristallanzeigen (LCD)	k.A.	-
35212	Bildschirmgeräte, einschließlich Bildröhrengeräte	11.166	Behandelt (2009) <sup>5</sup>
		61	Export (2010) <sup>3</sup>
35220	Elektro- und Elektronik-Altgeräte: Großgeräte mit einer Kantenlänge größer oder gleich 50 cm, mit gefahrenrelevanten Eigenschaften	20.526	Gesamtaufkommen E-Großgeräte (2009) <sup>6</sup>
35221	Elektro- und Elektronik-Altgeräte: Großgeräte mit einer Kantenlänge größer oder gleich 50 cm		
35230	Elektro- und Elektronik-Altgeräte: Kleingeräte mit einer Kantenlänge kleiner 50 cm, mit gefahrenrelevanten Eigenschaften	13.000	Behandelt (2009) <sup>5</sup>
35231	Elektro- und Elektronik-Altgeräte: Kleingeräte mit einer Kantenlänge kleiner 50 cm	20.393	Gesamtaufkommen E-Kleingeräte (2009) <sup>6</sup>
35307	Berylliumspäne	k.A.	-
35318	Berylliumhaltige Stäube	k.A.	-

31217	Filterstäube, NE-metallhaltig	11.339	Behandelt (2009) <sup>5</sup>
		10.025	Export (2009) <sup>4</sup>
		1.103	Export von SN 31217 91 (2009) <sup>4</sup>
31223	Stäube, Aschen und Krätzen aus sonstigen Schmelzprozessen	82.823	Behandelt (2009) <sup>5</sup>
		58.577	Export (2009) <sup>4</sup>
35337	Lithiumbatterien	35	Export (2010) <sup>3</sup>
35338	Batterien, unsortiert	1.164	Export (2010) <sup>3</sup>
35339	Gasentladungslampen (z.B. Leuchtstofflampen, Leuchtstoffröhren)	139	Export (2010) <sup>3</sup>
51108	Cobalthaltiger Galvanikschlamm	k.A.	-
51112	Sonstige Galvanikschlämme	11.250	Behandelt (2009) <sup>5</sup>
		1.567	Export (2009) <sup>4</sup>

Aus BAWP 2011: <sup>1)</sup> Tabelle „Aufkommen von asbesthaltigen Abfällen in Österreich“ auf S. 82; <sup>2)</sup> Text auf S. 83; <sup>3)</sup> Anhang des Emails von Scholz, C. an Sarc, R. am 16.10.2012; Auflistung der exportierten und abgelagerten (laut Abfallbilanzmeldung) Abfälle 2010 [Scholz 2012]; <sup>4)</sup> Tabelle „Ins Ausland verbrachte gefährliche Abfälle im Jahr 2009 – Größte Massen“ auf S. 88; <sup>5)</sup> Tabelle „Abfallarten, die im Jahr 2009 Behandlungsanlagen für gefährliche Abfälle zugeführt wurden“ auf S. 85; <sup>6)</sup> Tabelle „Sammelmassen von Elektro- und Elektronikaltgeräten nach Kategorien für die Jahre 2006 bis 2009“ auf S. 71; [BAWP 2011]

Nachdem hinsichtlich des Potenzials an kritischen Rohstoffen im Bereich der Abfallwirtschaft vor allem die Altfahrzeuge, die Elektroaltgeräte und die Windkraftanlagen wesentliche Bedeutung aufweisen oder in Zukunft voraussichtlich erlangen werden, erfolgt nachfolgend deren detaillierte Beschreibung.

## 10.1 Altfahrzeuge

Die EU-Richtlinie 2000/53/EG („ELV directive“, zuletzt geändert durch die RL 2008/33/EG) wurde in Österreich durch die Altfahrzeugeverordnung, BGBl. II/407, novelliert 2005, 2006, 2010 und 2012, in nationales Recht umgesetzt. Die Anforderungen entsprechen denen der Richtlinie, wobei vor allem folgende Punkte hinsichtlich der Rückgewinnung kritischer Rohstoffe relevant sind:

- Hersteller und Importeure müssen Alt-Fahrzeuge eigener Marken zurücknehmen, sowie (ein seltener Fall) Marken, die in Österreich nicht verkauft werden. Die Entfernung zu Rücknahmestellen darf nicht größer sein als die Entfernung zu Verkaufsstellen.
- Schadstoffentfrachtung: Flüssigkeiten, Batterien, Airbags, gefährliche Stoffe und Bauteile sind selektiv zu entfernen. Insbesondere sind Hg-hältige Bauteile, Schwingungsdämpfer, Pb-hältige Leiterplatten sowie Pb-Lote auszubauen.

- Behandlung zur Verbesserung der stofflichen Verwertung: Abzutrennen sind Katalysatoren, Cu, Al, Mg, Reifen, große Kunststoffbauteile und Glas.
- Schredderleichtfraktion: weitere Rückgewinnung von Metallfraktionen ist erforderlich.

Die Novelle der AltfahrzeugeVO 2010 ermöglicht es, bestimmte gesetzliche Verpflichtungen einem Sammel- und Verwertungssystem zu überlassen. Mit Stand vom August 2012 wurden bisher zwei Genehmigungen für ein derartiges System erteilt (siehe Tabelle 53).

Tabelle 53: Sammel- und Verwertungssysteme für Altfahrzeuge in Österreich (Stand: August 2012).

Systembetreiber	Adresse, Internet	Fahrzeugmarken
ÖCAR Automobil- recycling GmbH	Lindengasse 43/19, 1071 Wien <a href="http://www.oecar.at">www.oecar.at</a>	Daihatsu, Ferrari, Honda, Hyundai, Lotus, Maserati, MG, Mitsubishi, Rover, KIA, Chrysler, Jeep, Dodge, Nissan und Ssang Yong.
Österreichische Schredder Altauto- Entsorgungs- und Entwicklungs- GmbH & Co KG	Linzer Str. 21, 4650 Edt bei Lambach <a href="http://www.arge-shredder.at">www.arge-shredder.at</a>  (Internetseite war im Jänner 2013 noch im Aufbau)	VW, Audi, Porsche, Bentley, Bugatti, Lamborghini, Bedford, Buick, Cadillac, Isuzu, Oldsmobile, Opel, Pontiac, Saab, Vauxhall, Ford, Alfa Romeo, Fiat, Fiat Transporter (Hymer), Lancia, Peugeot, Renault, Mazda, Citroen, Alpina, BMW, Mini, Rolls-Royce, Seat, Toyota, Lexus, Suzuki, Skoda, Subaru, Volvo, Chevrolet (Daewoo), Jaguar, Land Rover.

### 10.1.1 KFZ-Bestand, Verwertung und weitere Nutzung von Altfahrzeugen – Überblick

In Österreich waren mit Stichtag vom 31.12.2011 insgesamt 6,195 Mio. Kraftfahrzeuge zugelassen [Statistik Austria 2012], darunter:

- 4,51 Mio. PKWs, davon 2,51 Mio. mit Dieselantrieb und ca. 2 Mio. mit Otto-Motoren
- 0,44 Mio. landwirtschaftliche Zugmaschinen
- 0,37 Mio. leichte Nutzfahrzeuge < 3,5 t
- 0,71 Mio. Motorräder und Motorfahrräder

Rund ein Drittel des PKW-Bestandes (Dez. 2010: 31,3 %) ist älter als 10 Jahre. Obwohl der Bestand an Hybridfahrzeugen in Österreich zwischen Dez. 2010 und Dez. 2011 um 26,4 % von 4.792 Stück auf 6.056 Stück anstieg, beträgt der Anteil derzeit nur ca. 0,1 %. Das in den Hybridfahrzeugen eingebaute Potenzial an kritischen Rohstoffen könnte jedoch aufgrund der größeren Masse pro Fahrzeug schon in ca. 5 bis 10 Jahren für ein Recycling relevant sein. Der Absatz von Elektrofahrzeugen in Deutschland ist 2011 und im ersten Halbjahr 2012 weit

unter den Erwartungen geblieben. In Deutschland wurden nach Angaben des CAR (Center Automotive Research) der Universität Duisburg-Essen im Jahr 2011 nur 2044 E-Autos zugelassen [Dudenhöffer 2012].

Die durchschnittliche Nutzungsdauer von Fahrzeugen in Deutschland ist nach Kuchta (2012) in den letzten 10 Jahren von 16 auf 12 Jahre zurückgegangen. Das durchschnittliche Alter der im Schredderprozess verwerteten Altfahrzeuge ist höher und beträgt nach Kletzmayer und Gratz (2012) in Österreich 17,4 Jahre (Stand: 2011).

Die vom Fahrzeughandel zurückgenommenen Fahrzeuge weisen unterschiedliche technische Zustände und Werte auf. Für den Fahrzeughandel ergeben sich damit folgende Möglichkeiten bzw. Wege:

1. Sorgfältige Überprüfung, allfällige Reparatur und Verkauf im Inland (inklusive Oldtimer).
2. Überprüfung, allfällige Reparatur und Verkauf in Länder mit höherem Bedarf an gebrauchten Modellen, vor allem nach Osteuropa, Nord- und Westafrika.
3. Ausbau von funktionsfähigen Bauteilen für den Verkauf dieser Bauteile bzw. Nutzung als Ersatzteillager, anschließend „Trockenlegung“ und Verschrottung des übrigen Altfahrzeuges.
4. Trockenlegung und Verschrottung.

Wenn die Wege 1 oder 2 beschriftet werden (= Gebrauchtwagenhandel), ist das Fahrzeug gewöhnlich kein Abfall im Sinne des AWG und damit auch kein „Altfahrzeug“ im Sinne der Altfahrzeugeverordnung. Somit unterliegt das KFZ damit in den meisten Fällen nicht den Dokumentationspflichten des Abfallrechtes. Dies hat zur Folge, dass die Datenlage zum Gebrauchtwagenhandel deutlich schlechter ist als bei verschrotteten Altfahrzeugen (siehe folgende Tabelle).

Tabelle 54: Verschrottete Altfahrzeuge und Export von Gebrauchtwagen in Österreich und Deutschland

Land	Österreich (2009) [BAWP 2011]	Deutschland (2010) [Friedl 2012]
Schredder	91.000	550.000
Export nachgewiesen	?	knapp 1.000.000
Rest: Verbleib unklar	160.000 bis 190.000 a) b)	1.260.000

a): Im Jahr 2010: 190.000 Fahrzeuge [Kletzmayer und Neubacher 2010]; b) Im Jahr 2011: ca. 200.000 Fahrzeuge [Kletzmayer 2012]. In beiden Literaturquellen wird nicht zwischen „Export nachgewiesen“ und „Verbleib unklar“ unterschieden.

Auch bei LKWs ist der Verkauf in Länder mit höherem Bedarf an gebrauchten Fahrzeugen (Osteuropa, Afrika) beliebt. Ein systematisches LKW-Recycling ist in Europa noch nicht etabliert. Über einen Verwertungsversuch für Alt-LKWs berichtet das Recycling Magazin (12/2012, 18–19). Auch daraus geht hervor, dass fast immer ein Verkauf (und sehr selten eine Verschrottung) der Altfahrzeuge bei LKWs durchgeführt wird.

Global ist vor allem in Schwellenländern (BRICS in der Abbildung 71) und in Osteuropa sowohl bei der Produktion als auch bei der Nachfrage ein starkes Wachstum zu erwarten. Die Situation am Markt in Europa ist im Speziellen durch stärkere Diversifikation der Fahrzeugtypen (Stadtauto versus SUV, Minimalvarianten versus Vollausrüstung, Nutzfahrzeug versus „sportliche Ausführung“, Elektroantrieb, Hybridantrieb, Gasfahrzeug etc.) sowie durch einen Rückgang der Verkaufsziffern im Jahr 2012 charakterisiert.

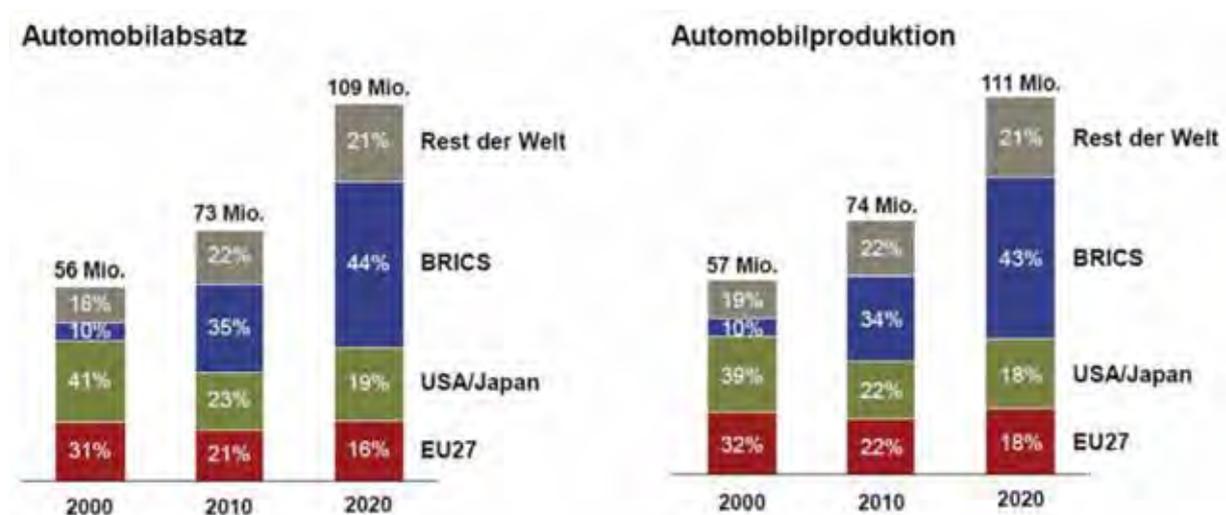


Abbildung 71: Produktion und Absatz global (Grafik: [Kremlicka 2012])

Die Zahl der PKW-Neuzulassungen verringerte sich in Österreich im Jahr 2012 von 356.145 (Jahr 2011) auf 336.010, das heißt um 4,7 % (Statistik Austria – Vorläufige Ergebnisse 2012). In der EU wurden im Jänner 2012 um 7,1 % weniger Fahrzeuge zugelassen als im Jänner 2011, in Deutschland im Vergleich der Dezember-Monate (2011/2012) sogar 16,4 % weniger [ACEA 2013, Kraftfahrtbundesamt 2013].

In Deutschland hatte die Abwrackprämie starke Auswirkungen auf die Altfahrzeugverwerter. Die Zahl der Altfahrzeuge stieg von 420.000 im Jahr 2008 auf 1,78 Millionen im Jahr 2009. Die teilweise Zwischenlagerung und eine geringere Ersatzteilgewinnung führten außerdem zu verminderten Verwertungsquoten. Gegenläufig zum Anstieg der Altfahrzeugmenge sank der Export von Gebrauchtwagen (Umweltbundesamt Dessau, Newsletter, 22. Dez. 2011). Nach Auslaufen der Abwrackprämie hat sich die Anzahl der Altfahrzeuge wieder verringert.

## 10.1.2 Nichteisenmetalle und kritische Rohstoffe in Altfahrzeugen – Allgemeines

Neben Stahlsorten, die im Automobilbau nach wie vor eine wesentliche Rolle spielen, dominieren Al-Legierungen, Kupfer, Zink, Gummi, Glas und Kunststoffe. Nach Scherhauser (2007) und Giannouli et al. (2006) beträgt der Anteil an Al-Legierungen im Nichteisenmetall ca. 81 %, jener von Kupfer ca. 12 % und von Zink ca. 6 %.

Nicht nur die Konstruktion von Stahlkarosserien, sondern auch die Materialzusammensetzung von Kraftfahrzeugen hat sich in vergangenen Jahrzehnten verändert. Prototypen für mögliche zukünftige, treibstoffsparende Fahrzeuge nutzen das Potenzial neuerer, leichter Werkstoffe („Lightweight design“, z.B. Al-, Mg-Legierungen, kohlefaserverstärkter Kunststoff, andere Faserverbundstoffe) voll aus, werden jedoch noch nicht oder nicht mehr in Serie produziert. Ein Beispiel ist die Marke VW LUPO 6E, eine Leichtbau-Variante des VW Lupo, der in den Jahren 1998 bis 2001 zwar in Serie, jedoch in geringen Stückzahlen erzeugt wurde.

Die Vielfalt der eingesetzten Materialien ist bereits bei Stahl- und Eisenteilen außerordentlich groß. Für ein einziges Modell (im vorliegenden Beispiel: VW Golf, Abbildung 72) wurden in den 90er-Jahren beispielsweise ca. 250 verschiedene Stahl- und Eisenlegierungen benötigt [Schweimer und Schuckert 1996]. Die betreffenden Jahrgänge dieses Modells haben derzeit annähernd ihr Verschrottungsalter erreicht.

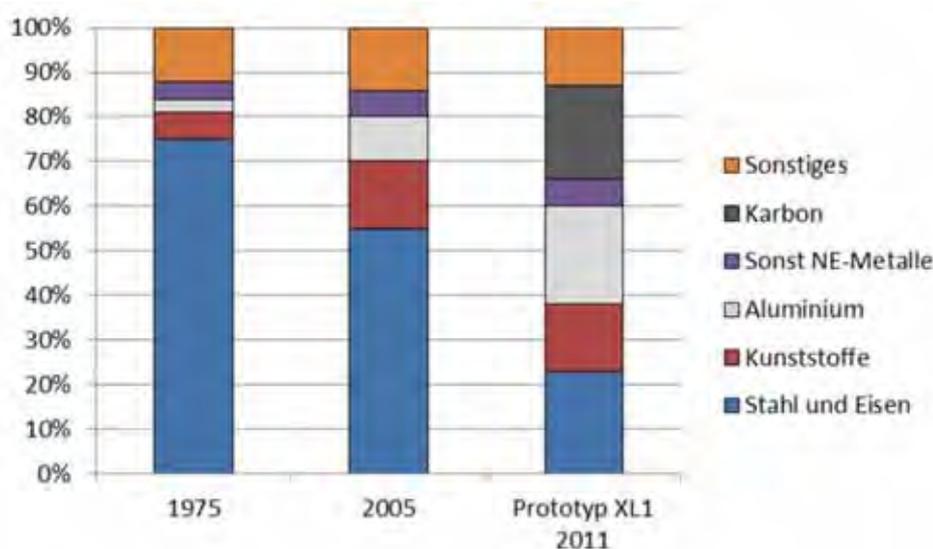


Abbildung 72: Materialzusammensetzung beim PKW (Daten aus: [VW Group 2011])

Der Gesamt-Metallgehalt von Altfahrzeugen bewegt sich nach Sander (2012) zwischen etwa 73 % und 78 % und weist damit eine deutlich geringere Bandbreite auf als die Fahrzeugmasse (ca. 900 bis 2.500 kg). Die Untersuchung von 400 Fahrzeugen im Jahr 2005 in

Großbritannien ergab einen mittleren Gesamt-Metallgehalt von 74,5 % und einen Eisen-gehalt von 68,0 % [Weatherhead und Hulse 2005].

Daten über den Anteil an kritischen Rohstoffen im konventionellen PKW sind nicht in kompakter Form verfügbar, es werden jedoch in der vorliegenden Studie an späterer Stelle die Gehalte für einzelne Bestandteile angegeben bzw. abgeschätzt. Entscheidend ist dabei deren Konzentration in demontagefähigen Bestandteilen.

### 10.1.3 Verschrottung von Altfahrzeugen

Wie bereits erwähnt, besteht in Europa eine Verpflichtung zur „Trockenlegung“ und Schadstoffentfrachtung von Altfahrzeugen vor der Verschrottung (Abbildung 73). Es gelingt damit, bei der Zerkleinerung der Altfahrzeuge eine metallhaltige „Schwerfraktion“ herzustellen, welche nach weiterer Aufbereitung im Metallhandel marktfähig ist.



Abbildung 73: Die vier Ebenen der Verwertung von Altfahrzeugen

Die Massenbilanz der Schredderanlagen ist abhängig von der eingesetzten Technologie, sowie vom Input der Anlagen. Der Schredderschrott überwiegt jedoch stets. Beispielsweise gibt Schröter (2010) für einen Schredder in Salzgitter (D) folgende Massenbilanz an:

- 70 % Fe-Schrott (Schredderschrott)
- 8 % nicht magnetische Schwerfraktion
- 22 % Schredderleichtfraktion (SLF)

Die ARGE Shredder GmbH nennt für Österreich für das Kalenderjahr 2011 folgende Durchschnittswerte [Kletzmayer und Gratz 2012]:

Tabelle 55: Bilanz der KFZ-Schredder in Österreich nach Kletzmayr und Gratz (2012)

Input bzw. abgetrennte Fraktion	Masse [kg]	Anteil bezogen auf das Fahrzeug nach der Trockenlegung [%]	Anteil bezogen auf den Input in den Schredderprozess [%]
Fahrzeug nach Trockenlegung	843	100,0	-
Demontage (Entnahmen)	151	17,9	-
Input in den Schredderprozess	692	82,1	100,0
Output Schredderschrott	490	58,1	70,8
Output NE-Fraktion	33	3,9	4,8
Output Schredderschwerfraktion SSF	48	5,7	6,9
Output Schredderleichtfraktion SLF	121	14,4	17,5

In den durchschnittlich 151 kg Demontaget Teilen überwiegen Motoren (32,5 kg), Reifen und Felgen (60,8 kg), Batterien (11,1 kg), Getriebe (8,1 kg) sowie Sicherheitsglas (9,9 kg = Summe aus Front- und Heckscheibe) [Kletzmayr und Gratz 2012]. Daten zur Masse der im Sinne der vorliegenden Studie relevanten Bestandteile (relevant für die Rückgewinnung von kritischen Rohstoffen), die von Schredderbetrieben veröffentlicht wurden, sind dagegen wenig belastbar, da deren Masse stets von der Demontagetiefe abhängt. Die beispielsweise von Kletzmayr und Gratz (2012) angegebenen Daten aus der Demontage bestückter Leiterplatten (ca. 57 g pro Fahrzeug), LCD-Anzeigen (10 g pro Fahrzeug) und Gasentladungslampen (3 g pro Fahrzeug) liefern damit eine Unterschätzung des Potenzials und haben nur exemplarischen Charakter.

Der überwiegende Masseanteil der SLF wird in Österreich von zwei Post-Schredder-Anlagen aufbereitet (TBS in Enns, RPE am Erzberg, Abbildung 74). Die technische Ausstattung dieser Anlagen besteht im Wesentlichen aus [Kletzmayr 2012]: Sieben, Aufschlussmühlen, Magnetscheider, Wirbelstromscheider, Sensortrennung, Windsichter, Setzherde und Schwimm-Sink-Anlagen. Diese Ausstattung ermöglicht die Gewinnung marktfähiger Fe-Fractionen und NE-Fractionen, nicht jedoch die spezifische Abtrennung bzw. Anreicherung von kritischen Rohstoffen. Die Mittelwertbildung erfolgte z.B. auch bei Kohlmeyer (2011) über unterschiedliche Intensität der Demontage von elektronischen Bauteilen hinweg und die Daten beschränken sich auf wenige chemische Elemente (siehe Tabelle 56).

Tabelle 56: Zusammensetzung der Schredderleichtfraktion in Nordrhein-Westfalen [Kohlmeyer 2011]

Datengrundlage	Fe und NE-Metalle	Rest-NE-Metalle
ABANDA-Datenbank des Landes Nordrhein-Westfalen, Probenanzahl n = 3–221	13,0 % Fe	1.200 ppm Cr
	2,9 % Al	1.200 ppm Mn
	2,6 % Cu	900 ppm Ni
	1,4 % Zn	400 ppm Sn
	0,7 % Pb	100 ppm Co
	Rest-NE-Metalle	40 ppm Ag

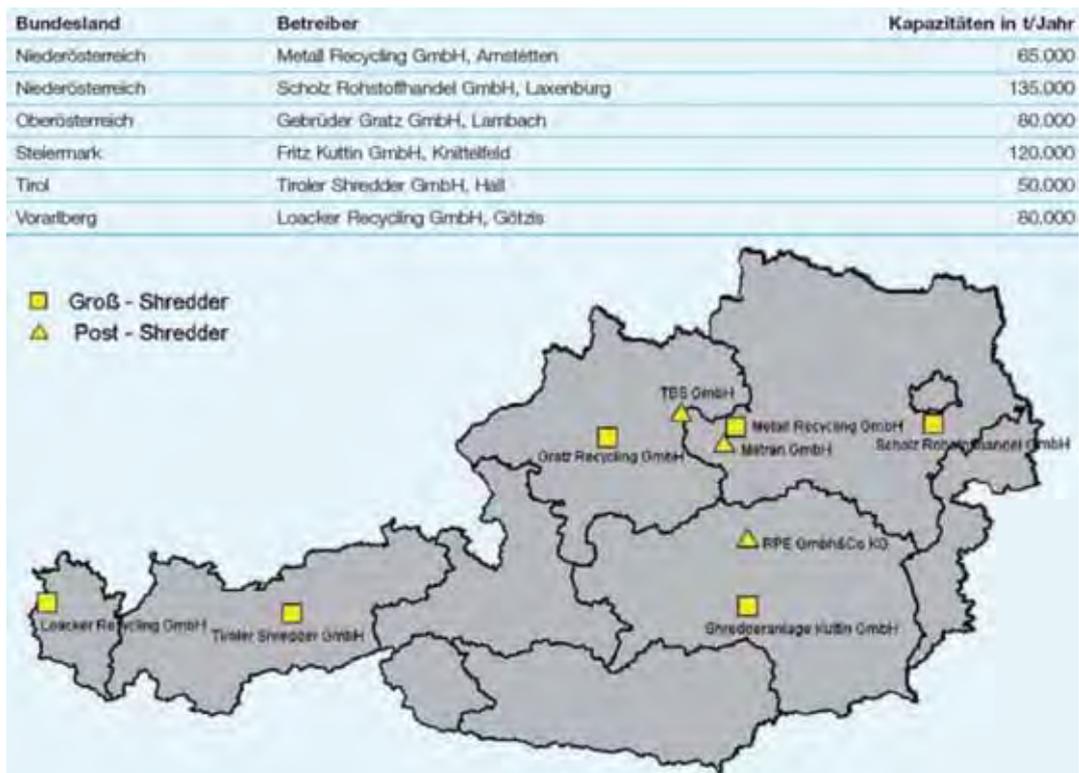


Abbildung 74: Schredder- und Post-Schredder-Betriebe in Österreich [BAWP 2011]

Das internationale Demontageinformationssystem (IDIS, [www.idis2.com](http://www.idis2.com)) wurde von mehr als 50 Produzenten und Zulieferern der Automobilindustrie erstellt, um den KFZ-Werkstätten und den Verwertungsunternehmen für die Demontage modellspezifische Informationen über einige Komponenten zur Verfügung zu stellen. Zu diesen zählen beispielsweise Batterien, Katalysatoren, Airbags, verwertbare Kunststoffteile und jene Bestandteile, die gemäß EU-Richtlinie über Altfahrzeuge zu demontieren sind. IDIS ist derzeit in 30 Sprachen und 37 Ländern verfügbar und umfasst 1716 Modelle (Stand: 2012).

Die Informationen von IDIS sind nicht allgemein zugänglich. Die am Internet dargestellten exemplarischen Datenblätter lassen jedoch erkennen, dass die chemische Zusammensetzung der Komponenten nur qualitativ und unvollständig dargestellt wird. Es ist fraglich, ob auf Basis der IDIS-Informationen Potenziale für ein Recycling von kritischen Rohstoffen geortet werden können (dies ist eventuell nur für Katalysatoren möglich). Dazu kommt noch, dass bei vielen der Modelle am Ende des Lebenszyklus die Starterbatterie bereits ein- bzw. mehrmals ersetzt wurde.

### 10.1.4 Kritische Rohstoffe in Elektro- und Hybridfahrzeugen – Überblick

Von Buchert et al. (2011) (Abbildung 75) erfolgte die Ermittlung des Bedarfs an „prioritären Rohstoffen“ für die Herstellung eines Elektro-PKW (ohne Batterie) im Jahr 2010. Als „prioritär“ wurden jene Elemente eingestuft, bei den „neben einem hohen Materialbedarf im

Elektrofahrzeug auch mögliche stark wachsende konkurrierende Anwendungen der Metalle“ vorliegen. Es fand eine Unterscheidung statt, ob der prioritäre Rohstoff in kg-, g- oder mg-Mengen pro PKW eingesetzt wird. Dabei wurden auch Informationen eines Workshops verarbeitet, in denen Experten aus der Automobil- und Zulieferindustrie in Deutschland vertreten waren.

Element	Au	Ag	Cu	Ga	In	Ge	Pt	Pd	Nd	Pr	Dy	Tb
Elektromotor			kg	mg					g	g	g	g
Leistungs-Elektronik	mg	g	kg	mg	mg	mg		mg				
Batterie / Kabel			kg									
Brennstoffzellen-Komponenten			kg	mg			g		g	g	g	g
Standardverkabelung		g	kg									
Ladestation und –kabel		mg	kg	mg	mg	mg						
Elektronik für Lenkung, Bremsen, sonstige Elektronik			kg									
Katalysator, V-Motor, Lichtmaschine			kg				g	g				

Abbildung 75: Prioritäre Rohstoffe im Elektrofahrzeug (grafisch modifiziert, nach Buchert et al. (2011))

Zusätzlich entsteht durch die Verwendung massereicher Akkumulatoren (Batterien) im Elektro-, Plug-in-Hybrid- und Hybridfahrzeug ein deutlich erhöhter Bedarf für Li, Co, Ni, Mn und Lanthanoiden (siehe Abschnitt „Akkumulatoren für Elektromobilität, Elektroantrieb, Hybridsysteme“).

### 10.1.5 KFZ-Katalysatoren

Bei der Demontage eines Samples von 400 Fahrzeugen wurde im Jahr 2005 eine mittlere Katalysator-Masse von 4,0 kg festgestellt [Weatherhead und Hulse 2005]. In Österreich liegt die durchschnittliche Katalysator-Masse pro Alt-KFZ im Jahr 2011 bei ca. 5,9 kg [Kletzmayr und Gratz 2012]. Der entsprechende Masseanteil an der Gesamtmasse der Altfahrzeuge beträgt 0,4 % bis 0,7 %.

Autokatalysatoren bzw. PKW-Katalysatoren bestehen aus einer Metallhülle und einem Trägermaterial auf dem die eigentliche Katalysatorschicht aufgebracht ist. Die folgenden Daten zum Aufbau und Zusammensetzung stammen von Boll (2008), Gieshoff und Southward (2012) sowie Mairec (2012). Als Träger der Katalysatorschicht(en) dient ein temperaturresistenter Wabencorpus aus Keramik ( $\text{Cordierit}$ ,  $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ , „Monolith“

genannt) oder einem Geflecht von Metallfolien einer Fe-Cr-Al-Legierung („Metalit“), welcher/welches eine hohe Anzahl dünnwandiger Kanäle aufweist. Cordierit ist temperaturbeständig und besitzt einen geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten sowie große chemische Beständigkeit. Der Marktanteil von Monolith-Trägern am Gesamtmarkt der KFZ-Katalysatoren beträgt ca. daher 93 % [Boll 2008].

Auf dem Träger befindet sich der so genannte Washcoat. Dieser besteht aus sehr porösem Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und dient zur Vergrößerung der Oberfläche sowie als mikroskopisch kleiner bzw. Nano-Träger für die katalytisch aktiven Elemente und Verbindungen. Im Washcoat befinden sich die katalytisch aktiven Edelmetalle Platin, Rhodium und Palladium und das für die Oxidation und Reduktion von Sauerstoff zuständige Ceroxid (sowie teilweise auch Barium-, und Spuren von Zirkoniumoxid, Lanthanoxid und Yttriumoxid). Die keramische Basis ist durch spezielle Matten (meist Fasermatten, seltener Drahtgeflechte) in einem metallischen Corpus, dem so genannten Canning, verankert. Der Katalysator ist fest im Abgasstrang des Fahrzeuges verbaut und besitzt zum Teil weitere Anschlussmöglichkeiten für Lambdasonden oder Thermoelemente.

Für den Edelmetallgehalt werden unterschiedliche Werte angegeben, wobei auch verschiedene Dimensionen Einsatz finden, welche die Vergleichbarkeit der Daten erschweren:

- 0,5 bis 5 g pro l Keramik [Gieshoff und Southward 2012]
- 1,8 bis 5,3 g pro l Katalysator-Volumen [Eurokat 2012]
- ca. 1 g pro 3 kg Keramik („Monolith“) [Kuchta 2004]

Während der Lebensdauer der Kraftfahrzeuge treten Pt-Verluste auf, welche die Platin-Masse des Katalysators bis zur Verwertung geringfügig (um wenige %) verringern. Die Platinemissionen betragen rund 0,5 bis 0,65 mg je 1.000 gefahrene km [Kümmerer 1999, Rüdell et al. 2004]. Bezogen auf 200.000 km sind diese Verluste rund 0,1 bis 0,13 g Pt pro Fahrzeug.

Die Edelmetall-Masse pro PKW liegt im Bereich von 1 bis 3 g [Hagelücken, 2007]. Es ist davon auszugehen, dass bei fast allen der 91.000 (im Jahr 2009) in Österreich verschrotteten Fahrzeuge ein Recycling der Edelmetalle aus dem Katalysator erfolgte. Die entsprechende Edelmetall-Masse beträgt demnach ca. 93 bis 273 kg. Aus der globalen Nachfrage von Pt, Pd und Rh im KFZ-Sektor lässt sich ein Masseverhältnis von ca. Pt : Pd : Rh von ca. 5 : 5 : 1 im Edelmetallanteil ablesen. Dies ergibt folgende grobe Schätzung der Pt-, Pd- und Rh-Massen aus der Demontage von KFZ-Katalysatoren in Österreich:

- Platin und Palladium: jeweils ca. 40 bis 130 kg/a
- Rhodium: ca. 8 bis 25 kg/a

Die Verluste aus der Zerlegung und Aufbereitung (Tabelle 57) wurden dabei nicht berücksichtigt. Bei der mechanischen Aufbereitung können Verluste weitestgehend vermieden werden. Der Wirkungsgrad der externen pyrometallurgischen Rückgewinnung beträgt bis zu 95 % bei Platin und 80 % bei Rhodium [Kuchta 2004]. Aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften verbleiben Cer- und Zirkoniumoxid in der Schlacke, sodass diese Elemente derzeit nicht rückgewonnen werden.

Tabelle 57: Zerlegung und Aufbereitung von KFZ-Katalysatoren (www.duerec.at)

KAT-Typ	Zerlegung und Aufbereitung	Edelmetall-rückgewinnung
Keramikträger (Monolith)	Öffnen des KAT mittels Säge → Keramikträger zum Vorbrecher → vorgebrochener Monolith zur Mühle → edelmetallhaltiges Pulver	Externe Pyrometallurgische Rückgewinnung von Pt, Pd und Rh
Metallträger (Metalith)	Querstromzerspaner → Trennung der zerkleinerten KAT in Canning, Folie und edelmetallhaltiges Washcoat-Pulver	

### 10.1.6 Fensterglas inklusive Indium-Zinnoxid-beschichtetes Glas

Die Verwertung von Altglas (Scheibenglas) aus KFZ ist bereits etabliert. Flachglasverwertungsanlagen übernehmen und verarbeiten sowohl Einscheiben-Sicherheitsglas (vorgespanntes Glas) als auch Zweischeiben-Verbundsicherheitsglas aus der Demontage von Altfahrzeugen. In Österreich wird Flachglas aus der Demontage von Alt-KFZ von der Fa. SCHIRMBECK Recycling GmbH. in Kraubath sowie in Schierling (Bayern) aufbereitet. Das Sicherheitsglas weist durch thermische Nachbehandlung folgende Eigenschaften auf:

- Größere mechanische Widerstandskraft
- Größere Elastizität
- Sicherheitsglas (vorgespanntes Glas) zerfällt beim Aufprall in kleine „Krümel“, welche die Verletzungsgefahr verringern

Die ursprüngliche Form des Einscheiben-Sicherheitsglases wurde Anfang der 70-er Jahre auch noch für Front- und Heckscheiben verwendet. Zur Erhöhung der Sicherheit wird seitdem zumindest für Frontscheiben Verbundsicherheitsglas verwendet [OSTFALIA 2012]. Zweischeiben-Verbundsicherheitsglas bestehen aus zwei Sicherheitsglasscheiben (Schichtdicke z.B. 2 mm), die in der Mitte mit Polyvinylbutyral (PVB) verbunden sind (Schichtdicke von PVB z.B. 0,8 mm). Beim Aufprall haften fast alle Glaspartikel an der PVB-Schicht, sodass die Verletzungsgefahr erneut verringert wird.

Das Recycling von Zweischeiben-Verbundsicherheitsglas erfordert zusätzliche Behandlungsschritte. Nach dem Brechen der Glasscheibe und der mechanischen Trennung des Glases ist die PVB-Schicht stets noch mit Glaspartikeln verunreinigt. Erst durch weitere Zerkleinerung und einer zusätzlichen Trennstufe zur Separierung des restlichen Glasanteiles ist das PVB für ein Kunststoffrecycling geeignet [MBR 2012]. Das Masseverhältnis von Glas zu PVB von Zweischeiben-Verbundsicherheitsglas beträgt ca. 9.

Durch Indium-Zinnoxid-Beschichtung (ITO-Beschichtung) kann eine elektrisch leitende Schicht, die gleichzeitig transparent ist, auf das Glas aufgebracht werden. Dies eröffnet die Möglichkeit der elektrischen Enteisung der Frontscheibe und erhöht damit die Fahrsicherheit im Winter. Der Nachteil dieser neuen Technologie ist jedoch, dass das Recycling von Flachglas erschwert wird. Die ITO-Beschichtungen auf Gläsern werden in Schichtdicke zwischen 15 und 310 nm (= 0,000015 bis 0,00031 mm) angeboten ([www.pgo-online.com/de](http://www.pgo-online.com/de), Juni 2012). Auf KFZ-Frontscheiben werden Schichtdicken von ca. 140 nm eingesetzt. Die ITO-Beschichtungen weisen eine Dichte von  $7 \text{ g/cm}^3$  auf, wobei der Massenanteil von Indium in handelsüblichem ITO 78 % beträgt. Allgemein lässt sich die Zusammensetzung als  $\text{In}_2\text{-}_x\text{Sn}_x\text{O}_3$  angeben (bis 20 % Sn).

Die Fensterfläche einer PKW-Frontscheibe beträgt ca.  $1 \text{ m}^2$ , die Zahl der derzeit in Österreich jährlich verschrotteten Fahrzeuge ca. 90.000 bis 100.000. Wären alle Altfahrzeuge mit indium-beschichteten Frontscheiben ausgestattet, dann würden diese in Summe ca. 7-8 kg Indium enthalten. Berücksichtigt man den Indiumkurs (500 bis 600 \$ für Reinheit 99,9 bzw. 99,99 im ersten Halbjahr 2012), dann erscheint ein Recycling von auch bei gestiegenem Marktanteil dieser Technologie nicht wirtschaftlich zu sein. Diese Aussage gilt nur für ITO-Schichten, jedoch nicht für die dickeren, indiumhaltigen CIS-Schichten für die Photovoltaik und für LCD-Anwendungen. Daraus lässt sich ableiten, dass aufgrund des derzeit noch geringen Marktanteils, der gewöhnlich langen Nutzungsdauer der Fahrzeuge und unter Berücksichtigung der sehr geringen Schichtdicke In-beschichtete Scheiben aus Altfahrzeugen innerhalb der Recyclingketten für die Indium-Versorgung unbedeutend sind.

### **10.1.7 Akkumulatoren für die Elektromobilität**

Unter dem Begriff Elektromobilität werden im Allgemeinen alle Fahrzeuge mit elektrischen Antrieben, das sind „reine Elektroautos“ mit Elektroantrieb wie auch Fahrzeuge mit Hybridantrieb, subsummiert. „Reine Elektroautos“ haben als Antrieb einen Elektromotor, der z.B. von einer Batterie, von Solarzellen oder Brennstoffzellen gespeist wird. Für „reine Elektroautos“ werden derzeit Li-Akkumulatoren favorisiert [Buchert et al. 2011].

Hybrid-Motoren besitzen neben dem Elektromotor noch eine Verbrennungskraftmaschine, sodass der Elektromotor/Generator und die Batterie kleiner dimensioniert werden können. Sogenannte Plug-In-Hybridfahrzeuge und Range-Extender-Fahrzeuge sind auf größere mit

Elektroantrieb gefahrene Strecken ausgerichtet und besitzen kleinere Batteriesätze als reine Elektroautos, jedoch größere als Hybridfahrzeuge. Range-Extender-Fahrzeuge sind seit Herbst 2011 auf dem Markt, Plug-In-Hybridfahrzeuge werden erst seit 2012 in Serie hergestellt.

Für diese neueren Antriebssysteme sind im zunehmenden Ausmaß kritische Rohstoffe (Abbildung 76) notwendig, wobei vor allem auch der Bedarf an Seltenen Erden für die Herstellung von Batterien (Tabelle 58) wesentliche Anteile des globalen Rohstoffbedarfs umfasst [Goonan 2011]:

- Lanthanoxid,  $\text{La}_2\text{O}_3$ : ca. 16 %
- Ceroxid,  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ : ca. 10 %
- Neodymoxid,  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ : ca. 5 %

	<b>Elektroantrieb</b>	<b>Hybridantrieb, und Plug-in-Hybridantrieb</b>	<b>Gasmotor</b>
<b>Neue ressourcenintensive Bauteile</b>	Elektromotor, Hochleistungs-Batterien, Elektronik	Elektromotor, Hochleistungs-Batterien, Elektronik	Gastank, Elektronik
<b>Hauptelemente und kritische Ressourcen</b>	Fe, Mn, Cu, Nd, Sm, Dy, Tb, In, Ga, Ge, Au, Li, Co, Ni, Ce, La	Fe, Mn, Cu, Nd, Sm, Dy, Tb, In, Ga, Ge, Au, Li, Co, Ni, Ce, La, Pt, Pd, Rh	Fe, Mn, Cu, Tb, In, Ga, Ge, Au, Pt, Pd, Rh

Abbildung 76: Neuere Antriebssysteme und verstärkter Einsatz kritischer Rohstoffe

Tabelle 58: NiMH- und weitere Metallhydrid-Batterien [Kopera 2004]

<b>Klasse (chemische Basis)</b>	<b>Bestandteile</b>	<b>Kapazität (mA/g)</b>	<b>Anmerkungen</b>
$\text{AB}_5$ ( $\text{LaNi}_5$ )	A: Mischmetall, La, Ce, Ti B: Ni, Co, Mn, Al	300	Häufigster NiMH-Typ Mischmetall: Nd, La, Ce und andere Seltene Erden
$\text{AB}_2$ ( $\text{TiNi}_2$ )	A: V, Ti B: Zr, Ni (+Cr, Co, Fe, Mn)	400	Seltenere NiMH-Typen
$\text{AB}$ ( $\text{ZrNi}$ )	A: Zr, Ti B: Ni, Fe, Cr, V		Frühere Stadien der Entwicklung
$\text{A}_2\text{B}$ ( $\text{Ti}_2\text{Ni}$ )	A: Mg, Ti B: Ni		

Beim zweiten Batterietyp (Abbildung 77) für Elektrofahrzeuge – der Lithiumbatterie – existieren im Wesentlichen 2 Typen (Tabelle 59):

- Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Kathoden: “NMC”
- Lithium-Eisen-Phosphat-Kathoden: “LFP”

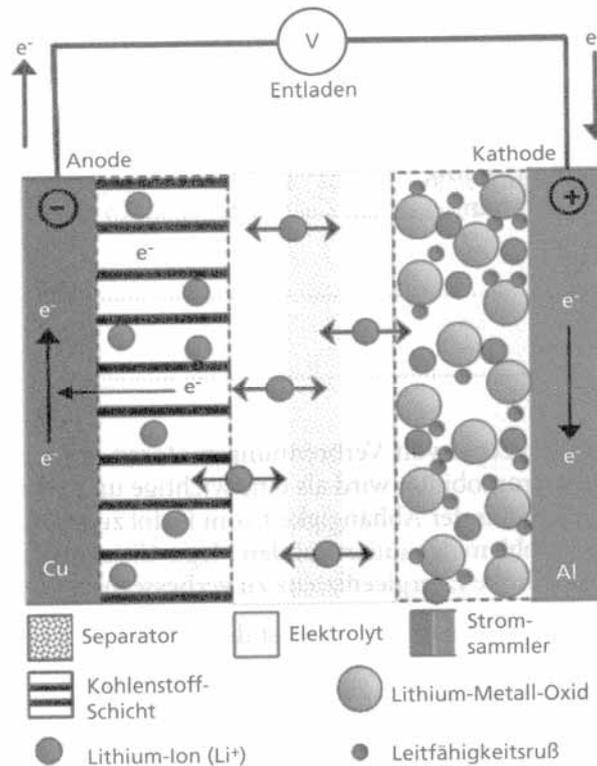


Abbildung 77: Aufbau von Li-Ionen-Batterien [Hanisch et al. 2012]

Tabelle 59: Lithiumgehalt, durchschnittliche Kapazität, Marktanteil und Nutzungsdauer von Li-Batterien für PKWs (Datenquelle: [Konietzko et al. 2011])

		NMC	LFP
Lithiumgehalt		157 g/kWh	101 g/kWh
Durchschnittliche Kapazität / Marktanteil	Elektro-PKW und Plug-in-hybrid	20 kWh/ 65%	20 kWh/ 35%
Durchschnittliche Kapazität / Marktanteil	Hybrid-PKW	1,4 kWh/ 20%	1,4 kWh/ 80%
Nutzungsdauer		ca. 10 a (Zukunft: 15 a?)	

Li-Ionen-Batterien bestehen aus vielen Schichten von Kathoden und Anoden, die durch einen permeablen Separator elektrisch voneinander isoliert sind. Zwischen den Elektroden befindet sich ein organischer Elektrolyt, der Li enthält. Das Gehäuse, in dem diese Schichten untergebracht sind, besteht aus Al, Kunststoff oder aus Al und Kunststoff. Die für KFZ verwendeten Li-Ionen-Batterien beinhalten folgende Bestandteile (exemplarisch, nach [Hanisch et al. 2012]):

- Zellhüll- und Gehäusematerial (10 bis 15 %)
- Elektrolyt (10 bis 20 %)
- Weitere Bestandteile (2 bis 5 %)
- Separator/Folien (etwa 3 %)
- Elektroden (etwa 65 %)

Die Elektrodenfraktion besteht aus:

- Anoden: Kupferfolie, Graphit und eingebettete Li-Ionen
- Kathoden: 8 % Aluminiumfolie und 46 % Aktivmaterial

Das Aktivmaterial ist beim NMC-Typ ein Li-Ni-Mn-Co-Oxid (Mischoxid). Die genannten Typen der Li-Batterie erreichen bereits hohe gravimetrische bzw. volumetrische Energiedichten von ca. 210 Wh/kg und 650 Wh/l (zum Vergleich: fossiler Kraftstoff ca. 3.000 Wh/l). Noch höhere Werte sollen in Zukunft Li-Schwefel- und Li-Luft-Batterien erreichen. Mittelfristig werden auch Li-(Ni-, Co-, Mn-)-Phosphat-Kathoden oder Spinelle auf Li-(Ni-, Co-, Mn-) als attraktive Lösungen gesehen [Möckel 2012].

Einige Marken bieten Elektrofahrzeuge und Plug-in-Hybridfahrzeuge zum Verkauf an, die Akkumulatoren jedoch über einen Leasing-Vertrag. Die Batterie verbleibt also eigentumsrechtlich beim Fahrzeughändler und es besteht die Möglichkeit, gebrauchte Batterien, welche für den Einsatz im Kraftfahrzeug nicht mehr geeignet sind, in anderen Anwendungsbereichen – z.B. bei Photovoltaikanlagen – wieder zu verwenden. Der Fahrzeughändler prüft in diesem Fall in regelmäßigen Abständen die Qualität der Batterie und kann die gebrauchten und geprüften bei entsprechender Nachfrage einer Nachnutzung (z.B. als stationäre Energiespeicher) zuführen. Falls die Nachfrage in anderen Anwendungsbereichen gering sein sollte, ist eine stoffliche Verwertung und Rückgewinnung der wertgebenden Bestandteile (Co, Li, Seltene Erden) naheliegend.

### **10.1.8 Leiterplatten im Altfahrzeug**

Bisher sind nur spärlich Daten über die Menge und Zusammensetzung der KFZ-Leiterplatten in Altfahrzeugen vorhanden. Christen (2012) schätzt den Anteil der Leiterplatten an der Gesamtmasse auf 0,1 %. Die Datengrundlage ist jedoch nicht sehr transparent – es dürfte sich um eine Mitteilung eines Herstellers (Mercedes) aus dem Jahr 2007 handeln. Kletzmayer und Gratz (2012) geben eine durchschnittliche Masse von 57 g pro Alt-KFZ für demontierte Leiterplatten an. Auf die durchschnittliche Fahrzeugmasse (843 kg nach der Trockenlegung) bezogen sind dies nur ca. 0,007 %. Angaben zur Intensität der Demontage bzw. Demontagetiefe fehlen. Die von Kletzmayer und Gratz (2012) angegebene Leiterplatten-

Menge ist sehr gering und kann nicht für Potenzial-Schätzungen im Sinne der vorliegenden Studie verwendet werden (vgl. z.B. Schätzung von Christen (2012)).

Eine telefonische Umfrage bei allen Schredderbetrieben in Österreich ergab, dass Daten zum Massenanteil und zur Zusammensetzung von Leiterplatten im Altfahrzeug nicht verfügbar sind. Es ist jedoch bei den Schredderbetrieben die Meinung vorherrschend, dass diese Wissenslücke in Zukunft geschlossen werden sollte.

### **10.1.9 Sonstige elektrische und elektronische Bestandteile im Kraftfahrzeug**

Einzelne weitere Bauteile und Autopflegeartikel enthalten ebenso geringe Mengen an kritischen Rohstoffen (eine Quantifizierung war innerhalb des vorgegebenen Zeitrahmens nicht möglich):

- Die Lambdasonde ist ein chemischer Sensor, der die Sauerstoffkonzentration im Abgas misst. Durch ihr elektrisches Signal ist es der angeschlossenen Regелеlektronik möglich, das Kraftstoff/Luft-Gemisch so einzustellen, dass eine ideale Verbrennung stattfinden kann, bei der sich dann kein oder nur noch sehr wenig Sauerstoff im Abgasstrom findet. Sie besteht aus einem Zirkonoxid ( $ZrO_2$ )-Keramikkörper, der mit Yttriumoxid dotiert ist [Pape 1999].
- KFZ-Marken werben derzeit für die Verwendung von LED in Autoscheinwerfern. Die Oxide von Cer, Yttrium und Terbium sorgen für einen warmen, gelblichen Farbton. Nach der Demontage bzw. am Ende ihres Lebenszyklus können LED-Lampen aus dem Kraftfahrzeugsektor gemeinsam mit Energiesparlampen aus Haushalten verwertet werden.
- Die Größenordnung der Materialzusammensetzung von Zündkerzen kann aus folgenden Angaben [Bosch 2001] abgeschätzt werden: „Materialmengen für Tagesproduktion von über einer Million Stück: 29 t Stahl, 1,8 t Nickel, 0,7 t Kupfer, 15 km Nickeldraht und 2,5 kg Platin für Kerzengehäuse und Elektroden sowie 20 t Tonerde für Isolatorkörper“. Demnach ist der Pt-Gehalt geringer als 2,5 mg. Die Elektroden können Platin, Silber oder Yttrium enthalten, z.B. eine Ni-Y-Legierung [Bosch 2011/2007].
- Polituren können Ceroxid-Nanopartikel enthalten [VW Group 2012] bzw. die Elemente Ce, La und Nd [Westphal 2012].
- Titan in Ventilen, Turbolader, Stoßstangenhalterungen, Nockenwellen und Pleuelstangen [Go et al. 2011] sowie [www.kfz-tech.de](http://www.kfz-tech.de)): Grundsätzlich können diese Bestandteile auch aus Titan bestehen, wenn eine hohe Beschleunigungsleistung gefragt ist. Bisher erfolgt der Einsatz primär bei Rennfahrzeugen und getunten

Fahrzeugen. Für die Langzeitbelastung war Titan jedoch bisher nicht ausreichend abriebfest. Neuere Titanlegierungen (z.B. TiC, TiB-Legierungen) sind abriebfester, sodass sich weitere Anwendungsmöglichkeiten bei Motorrädern und leistungsstarken Fahrzeugen ergeben. Ti-Ventile und Ti-Pleuelstangen für Motorräder werden z.B. schon derzeit von der Fa. Kainzinger angeboten.

- Bremsbeläge können Antimon (Sb) und Cer (Ce) enthalten [Kuchta 2012]. Nach Stahl et al. (2011) ist die Basis der am Markt erhältlichen Bremsbeläge meistens Cu, Zn und/oder Sn. 50 % der in den Jahren 2008 und 2009 untersuchten Bremsbeläge enthalten weniger als 135 mg/kg Sb und sind damit landläufig als „antimonfrei“ anzusprechen. Jedoch weisen der 75-Perzentilwert (2.725 mg/kg Sb) und der 90-Perzentilwert (23.100 mg/kg Sb) für Antimon in der Untersuchung von Stahl et al., 2011 (insgesamt 76 untersuchte Proben) darauf hin, dass der Anteil der stärker Sb-haltigen Bremsbeläge immer noch groß ist.

Insgesamt sind eine Reihe unterschiedlicher Metalle in zahlreichen verschiedenen Bauteilen in Kraftfahrzeugen enthalten, welche in Tabelle 60 zusammengefasst dargestellt wurden [Rodrigo et al. 2004, Scherhauser 2007, Angerer et al. 2009, Buchert et al. 2011, Stahl et al. 2011].

Tabelle 60: Überblick zu den NE-Metallen und kritischen Rohstoffen in Kraftfahrzeugen

<b>Element, Metall</b>	<b>Bestandteile im konventionellen KFZ (Normalschrift) sowie im Elektro- und Hybridfahrzeug (kursive Schrift)</b>
Cu und Messing	Kabel, Steckkontakte, Bremsleitungen, Starter, PCB (Leiterplatte), Lichtmaschine, Kühler und Erhitzer, Gleitlager, Stellmotoren, Lampensockel, Bremsbeläge, <i>Elektromotor</i>
Al	Zahlreiche Bauteile, auch Teile der Karosserie
Pb <sup>a)</sup>	Pb-Batterie, PCB, Lötmittel sonst, Lichtmaschine, Verteilerdosen, PVC, Elastomere (z.B. Kraftstoffschläuche), Einpressteckverbinder, Stahl mit bis zu 0,35 % Pb, Pb in Cu-Legierungen (bis 4 % Pb) und Al-Legierungen, piezoelektrische Sensoren, Zündkerzenglasuren, Auswuchtgewichte
Cd	Dickfilmpasten
Sn	Bremsbeläge, PCB, Lötmittel, Verteilerdosen, ITO-Beschichtungen von Scheiben
Ti	Ventile, Pleuelstangen, Keramik in $\lambda$ -Sonde, <i>Metallhydridbatterien vom Typ TiNi<sub>2</sub></i>
Ni	Stahl, PCB, Zündkerzen, Metallbeschichtungen, <i>NiMH-Batterie</i>
V	Stahl, Nachtsichtgeräte
Cr	Stahl, Metallbeschichtungen (Korrosionsschutzschichten)
Li	<i>Li-Batterien</i>
Co	<i>NiMH-Batterie, Li-Batterie vom Typ NMC</i>
Mn	Stahl, <i>Li-Batterie vom Typ NMC, NiMH-Batterie</i>
Zn	Bremsbeläge, PCB, Metallbeschichtungen, Druckgussbauteile
Mg	Al-Legierungen

Hg <sup>a)</sup>	Lampen (Hochdrucklampen, Instrumentaltafelanzeigen) in manchen Modellen
Ag	PCB, Batterien, Heizdrähte für Heckscheiben
Au	PCB
Pd	Katalysator, PCB
Pt	Katalysator, PCB, Zündkerzen
Rh	Katalysator
W	Lampen (unbedeutende Mengen)
In	PCB, LCD Bildschirme, ITO-Beschichtungen von Scheiben
Be	Selten verwendet als Legierungsbestandteil von Cu in Kontakten und in Ventilsitzen
Ga	PCB
Ge	PCB
Bi	PCB
Sb	PCB, Bremsbeläge, Kunststoffe
Ta	PCB, Kondensatoren
Zr	Katalysator, $\lambda$ -Sonde
Ba	Katalysator, Kunststoffe
Seltene Erden	Katalysator (Ce), PCB, Lautsprecher (Nd), CD-Player (Nd), LED-Lampen, LCD-Displays, LED-Displays, Bremsbeläge (Ce), Polituren, <i>NiMH-Batterien (überwiegend La, Nd, Dy), Elektromotor (Nd, Dy, Pr, Tb)</i>

<sup>a)</sup> Grundsätzlich verboten – die Ausnahmen und Übergangsbestimmungen der Österreichischen Altfahrzeugrichtlinie sind jedoch zu beachten. Der aktuelle Stand der Ausnahmen und Fristen wird im BGBl. II/53 vom 6. März 2012 dargestellt.

## 10.2 Elektroaltgeräte als Rohstoff

Der Schwerpunkt der Studie liegt auf der Verfügbarkeit der Ressourcen an Seltenen Erden, Tantal, Niob und Wolfram wobei auch die Platin-Gruppen-Metalle, Antimon, Cobalt und Grafit in etwas geringerem Umfang Beachtung fanden. In folgendem Abschnitt wird dargestellt, welche dieser Ressourcen in Elektroaltgeräten (EAG) zu finden sind und wie die Rückgewinnbarkeit einzuschätzen ist. Dazu wird der in Tabelle 61 dargestellte Aufbau gewählt.

In Kapitel 10.2.1 werden Elektroaltgeräte in Bezug auf ihre Zusammensetzung klassifiziert und beschrieben. Als Bauteile mit relevanten Inhaltsstoffen werden die Gehalte an Edelmetallen in Leiterplatten, Seltenen Erden in Bildschirmbeschichtungen und Leuchtstaub von Leuchtstoffröhren sowie in Festplatten, CD-Laufwerken und anderen Bauteilen genauer quantifiziert. In Kapitel 10.2.2 werden die derzeitige Sammlung von Elektroaltgeräten in Österreich analysiert und Vorschläge zur Optimierung der getrennten Sammlung und Verwertung erstellt.

Tabelle 61: Verwendung einzelner Rohstoffe in EAGs

Leichte Seltene Erden	Scandium	Leuchtstarke Halogenlampen, Leuchtstoff
	Yttrium	Leuchtstoff (Yttriumoxid)
	Lanthan	Leuchtstoff
	Cer	Flachbildschirme, Energiesparlampen und CDs
	Praseodym	Legierungen für Permanentmagnete, Leuchtstoff
	Neodym	Magnete für Datenspeicher und Lautsprecher, Leuchtstoff
	Promethium	Keine Anwendung in EAGs bekannt
	Samarium	Elektroden von Lichtbogenlampen (sehr geringe Bedeutung)
	Europium	Leuchtstoff, LED
Schwere Seltene Erden	Gadolinium	LED
	Terbium	Leuchtstoff
	Dysprosium	Legierungselement in FeNdB-Magnetwerkstoffen (ca. 3 %)
	Holmium	Keine Anwendung in EAGs bekannt
	Erbium	Keine Anwendung in EAGs bekannt
	Thulium	Keine Anwendung in EAGs bekannt
	Ytterbium	Leuchtstoff (sehr geringe Bedeutung)
	Lutetium	Keine Anwendung in EAGs bekannt
Metalle mit hoher Bedeutung	Tantal	Ca. 50–60 % der Weltproduktion in EAG bzw. Kondensatoren [MaRESS 2011]
	Niob	Hauptsächlich Legierungsbestandteil, ev. in Kondensatoren
	Wolfram	In geringem Umfang in Glühdrähten und Elektroden
Metalle mit nachgeordneter Bedeutung	PGM	Pt: Elektroden und Thermoelemente (PCs, Laptops, Spielkonsolen, Navigationsgeräte); Os, Ir und Ru: spezielle Anwendungen überwiegend im EuE-Sektor
	Antimon	In Europa 75 % Flammenschutzmittel [Angerer et al. 2009], Einsatz in Gehäusekunststoffen (HIPS), der Anteil von Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> wird mit 4,5 [Brebua et al. 2007] bis 5 Gew.-% [Mitan et al. 2008] angegeben.
	Cobalt	Akkus
	Grafit	Anodenmaterial in Lithium-Ionen-Akkus

## 10.2.1 Elektroaltgeräte, Klassifizierung und Zusammensetzung

Elektro- und Elektronikgeräte sind in der EAG-VO<sup>1</sup> als Geräte definiert, „die zu ihrem ordnungsgemäßen Betrieb elektrischen Strom oder elektromagnetische Felder benötigen“. In Sinne der österreichischen EAG-VO werden 5 Sammel- und Verwertungskategorien unterschieden:

<sup>1</sup> Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Abfallvermeidung, Sammlung und Behandlung von elektrischen und elektronischen Altgeräten (Elektroaltgeräteverordnung – EAG-VO) BGBl. II Nr. 121/2005, geändert durch BGBl. II Nr. 183/2006, BGBl. II Nr. 48/2007, BGBl. II Nr. 496/2008 und Nr. 166/2011

- Großgeräte (GG): Waschmaschinen, Wäschetrockner, E-Herde etc., Geräte mit einer Kantenlänge > 50 cm
- Kühl- und Gefriergeräte (KG): Kühlschränke, Gefrierschränke und -truhen sowie Klimageräte
- Bildschirmgeräte einschließlich Bildröhrengeräte: TV-Geräte, Computerbildschirme, Laptops sowie Monitore; beinhalten Geräte mit Kathodenstrahlröhren (CRT) sowie Flachbildschirme (LCD und andere)
- Elektrokleingeräte (EKG): Küchengeräte, Geräte der Informations- und Kommunikationstechnik, Unterhaltungselektronik, Werkzeuge, elektrisches Spielzeug, medizinische Geräte, Überwachungs- und Kontrollinstrumente; Geräte mit einer Kantenlänge < 50 cm
- Gasentladungslampen: Leuchtstoffröhren und Energiesparlampen

Bezüglich der Zusammensetzung nach Bauteilen und Materialien gibt es aufgrund der unterschiedlichen Bauformen und Größen eine Bandbreite, die nachfolgenden Daten können jedoch als Richtwerte herangezogen werden.

Die Großgeräte (vgl. Tabelle 62) weisen einen hohen Anteil metallischer Werkstoffe auf, die Fraktion „andere Materialien“ besteht zu einem größeren Anteil aus Stabilisierungselementen von Waschmaschinen (Beton). Als Bauteile mit den hier betrachteten Ressourcen sind nur die Leiterplatten zu nennen, die in dieser Kategorie einen sehr geringen Anteil (0,1 %) aufweisen. In Zukunft ist mit einem zunehmenden Anteil elektronischer Komponenten zu rechnen, da neuere Generationen von Waschmaschinen, Geschirrspülern etc. zunehmend mit elektronischen Steuerungen ausgerüstet sind.

Tabelle 62: Zusammensetzung von Großgeräten, Kühlgeräten und Bildschirmgeräten mit CRT (Kathodenstrahlröhre). Daten nach Huisman et al. (2007)

	GG		KG		CRT	
	[t]	[%]	[t]	[%]	[t]	[%]
Schadstoffhaltige Bauteile	63	0,1	205	0,5	27	0,2
Eisen und Stahl	30.318	56	25.263	66	770	5
Aluminium	906	2	1.255	3	238	2
Kupfer	1.204	2	892	2	-	-
Kabel	955	2	120	0	261	2
Kunststoffe	6.901	13	9.640	25	1.913	13
Leiterplatten	50	0,1	-	-	1.385	9,5
Metallverbunde u.a. Metalle	-	-	-	-	944	6
Andere Materialien	13.842	26	705	2	9.114	62
<b>Summe</b>	<b>54.239</b>	<b>100</b>	<b>38.080</b>	<b>100</b>	<b>14.652</b>	<b>100</b>

Die Kühl- und Gefriergeräte (vgl. Tabelle 62) bestehen ebenfalls zu einem höheren Anteil aus metallischen Werkstoffen und Kunststoffen; Bauteile mit relevanten kritischen Rohstoffen sind in dieser Gerätekategorie nicht zu finden. Die CRT-Geräte (Bildschirmgeräte und TV-Geräte mit Kathodenstrahlröhre) weisen einen Glasanteil von 58 % auf, der aus Schirm- und Konusglas besteht (vgl. Tabelle 62). Als schadstoffhaltige Bauteile sind der Leuchtstaub, das Getterplättchen und Leiterplatten zu nennen. Die Elektronenstrahlleinheit besteht aus einer hochwertigen Chrom-Nickel-Wolfram-Legierung und kann in Edelhütten eingesetzt werden. Das Getterplättchen besteht aus BaO und wird nach Abtrennung als gefährlicher Abfall entsorgt [Tesar und Öhlinger 2009]. Der Anteil an Leiterplatten ist mit 9,5 % hoch, in der Regel handelt es sich um LP der Klasse 2.

In der Tabelle 63 sind die Zusammensetzungen von Geräten mit Flachbildschirmen mit LCD-Anzeigen (Bildschirm-LCD und TV-LCD) sowie von Leuchtstoffröhren (LSR) zusammengefasst. Bei den LCD-Monitoren bzw. TV-Geräten fällt ein vergleichsweise hoher Anteil an Kunststoffen auf, beide Kategorien weisen auch höhere Anteile an Leiterplatten auf. Das LCD-Panel selbst ist unter „andere Materialien“ angeführt, und ist wegen des Gehalts an Indium relevant. Bei den Leuchtstoffröhren (LSR, vgl. Tabelle 63) ist Glas (hier in der Fraktion „andere Materialien“ enthalten) mit 86 % der massenmäßig dominierende Werkstoff. Der Leuchtstaub ist als schadstoffhaltiger Bauteil angeführt.

Tabelle 63: Zusammensetzung von Bildschirmgeräten und TV-Geräten mit LCD-Bildschirmen sowie Leuchtstoffröhren. Daten für Bildschirm-LCDs und TV-LCDs nach Salhofer et al. (2012), für Leuchtstoffröhren nach Huisman et al. (2007)

	BS-LCD		TV-LCD		LSR	
	[t]	[%]	[t]	[%]	[t]	[%]
Schadstoffhaltige Bauteile	16	0,3	164	1,1	3	1,7
Eisen und Stahl	2.331	41	8.082	54	3	2
Aluminium	296	5	84	1	8	6
Kupfer	-	-	-	-	3	2
Kabel	64	1	143	1	-	-
Kunststoffe	2.062	36	4.540	30	2	2
Leiterplatten	463	8,1	922	6,1	1	0,9
Metallverbunde u.a. Metalle	-	-	-	-	-	-
Andere Materialien	461	8	1.170	8	124	86
<b>Summe</b>	<b>5.694</b>	<b>100</b>	<b>15.104</b>	<b>100</b>	<b>144</b>	<b>100</b>

In Tabelle 64 ist die Zusammensetzung der Gerätekategorie „Elektrokleingeräte“ (EKG) dargestellt. In dieser Kategorie werden sehr unterschiedliche Gerätearten zusammengefasst, das Hauptkriterium ist, soweit es sich um keine Leuchtstofflampe, Kühlgerät oder Bildschirm handelt eine Kantenlänge unter 50 cm. Als schadstoffhaltige Bauteile sind bei Elektroklein-

geräten Kondensatoren, LCD-Paneele, Batterien, Leuchtstoffröhren und Cartridges zu erwarten. Unterschieden wurden folgende Sub-Kategorien:

- Sub-Kategorie 1C Haushaltsgroßgeräte klein: Geräte, die eigentlich Großgeräten entsprechen, jedoch eine Kantenlänge < 50 cm aufweisen, z.B. Mikrowellengeräte, Heizgeräte u.a.
- Sub-Kategorie 2 Haushaltskleingeräte: kleine Küchen- und Haushaltgeräte, wie Staubsauger, Bügeleisen, Toaster etc.
- Sub-Kategorie 3A: Geräte der Informations- und Kommunikationstechnologie, ausgenommen Bildschirmgeräte, wie PCs, Drucker, Tastaturen, Mobiltelefone
- Sub-Kategorie 4A: Geräte der Unterhaltungselektronik wie HiFi-Anlagen, Lautsprecherboxen, Videorecorder, Sat-Receiver u.a.
- Sub-Kategorie 5-9: Lampen, elektrische Werkzeuge, elektrisches Spielzeug, Medizingeräte, Überwachungs- und Kontrollgeräte.

Tabelle 64: Zusammensetzung von Elektrokleingeräten nach Unterkategorien. Datenquelle: [Spitzbart et al. 2009]

	<b>1C</b>	<b>2</b>	<b>3A</b>	<b>4A</b>	<b>5-9</b>	<b>EKG</b>
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Schadstoffhältige Bauteile	0,6	0,4	1,3	0,9	0,9	0,9
Eisen und Stahl	71	16	50	37	32	38
Aluminium	1	2	2	2	-	2
Kupfer	4	0	1	3	-	1
Kabel	1	6	3	1	9	4
Kunststoffe	13	46	31	21	10	30
Leiterplatten	0,2	0,1	9,6	10,1	0,4	5
Metallverbunde u.a. Metalle	6	26	2	6	19	12
Andere Materialien	4	3	1	18	28	8
<b>Summe</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Die Geräte der Sub-Kategorie 1C (Haushaltsgroßgeräte klein) weisen einen hohen Metallanteil und einen sehr geringen Anteil an Leiterplatten auf, relevante Mengen an kritischen Rohstoffen sind hier nicht zu erwarten. In der Sub-Kategorie 2 (Haushaltskleingeräte) finden sich Geräte mit hohem Kunststoffanteil, der Anteil an Leiterplatten ist ebenfalls sehr gering. Die Geräte der Sub-Kategorie 3A (Geräte der Informations- und Kommunikationstechnik) beinhalten hohe Anteile an Leiterplatten (Kategorie 1) und hohe Metallanteile. Neben Edelmetallen auf Leiterplatten (Hauptplatine, Festplatten, Laufwerke, Netzteile) sind in Laufwerken Magnete mit SEE zu erwarten. Bei den Geräten der Sub-Kategorie 4A (Unterhaltungselektronik) treten neben metallischen Werkstoffe und Kunststoffen hohe Anteile an

Leiterplatten (Kategorie 2) auf. Weiters sind in CD-Playern und Lautsprechern Magnete mit SEE enthalten. Die Geräte der Sub-Kategorie 5-9 weisen geringe Anteile an Leiterplatten oder anderen Bauteilen mit kritischen Rohstoffen auf.

### 10.2.1.1 Gehalte an Edelmetallen in Leiterplatten

Die Gehalte an Edelmetallen in Leiterplatten variieren stark nach Anwendungsbereichen. Infolge dichter Bestückung sind vor allem in Geräten der Informations- und Kommunikationstechnik, aber auch Unterhaltungselektronik höhere Gehalte zu finden. Die Tabelle 65 fasst Literaturdaten zu Leiterplatten aus unterschiedlichen Gerätekategorien zusammen. Es ist allerdings zu beachten, dass die Daten teils bereits älteren Ursprungs sind und in Zukunft infolge optimierter Fertigungstechnologien mit abnehmenden Edelmetallgehalten zu rechnen ist. Die Tabelle 66 zeigt Ergebnisse aus einer Studie zur Rückgewinnung von Edelmetallen aus Leiterplatten von PCs, wo zu sehen ist, dass neben der Hauptplatine auch in Leiterplatten aus Netzteilen und Laufwerken relevante Gehalte zu finden sind.

Tabelle 65: Gehalte an Edelmetallen und Kupfer in Leiterplatten nach Gerätekategorien

Sub-Kategorie		Cu	Ag	Au	Pd	Quelle
		[g/t]	[g/t]	[g/t]	[g/t]	
IA	Großgeräte	130.000	160	38	20	[Huisman et al. 2007]
IC	Haushaltsgroßgeräte klein	130.000	48	14	29	[Huisman et al. 2007]
2	Haushaltskleingeräte	110.000	220	20	12	[Huisman et al. 2007]
3A	PCs	180.000	1.000	230	90	[Huisman et al. 2007]
3A	PCs	-	775	156	99	[Keller 2006]
3A	Drucker	140.000	350	47	9	[Huisman et al. 2007]
3A	IKT, kleine Geräte	100.000	5.700	1.300	470	[Huisman et al. 2007]
3A	Mobiltelefone	-	5.540	980	285	[Hagelüken und Buchert 2008]
3B	CRT-Bildschirme	180.000	150	9	3	[Huisman et al. 2007]
3C	Flachbildschirme	400.000	1.300	490	99	[Huisman et al. 2007]
4A	Unterhaltungselektronik, groß	190.000	520	68	8	[Huisman et al. 2007]
4A	Unterhaltungselektronik, klein	160.000	700	100	21	[Huisman et al. 2007]
4B	CRT-Fernseher	120.000	1.600	110	41	[Huisman et al. 2007]
4C	Flachbildschirmfernseher	220.000	250	60	19	[Huisman et al. 2007]
5B	Lampen	110.000	220	20	12	[Huisman et al. 2007]
6	Elektrisches Werkzeug	160.000	1.100	18	48	[Huisman et al. 2007]
7	Spiele	200.000	430	160	18	[Huisman et al. 2007]

Tabelle 66: Gehalte an Edelmetallen und Kupfer in Leiterplatten aus PCs

Material	Cu	Ag	Au	Pd	Quelle
	[g/t]	[g/t]	[g/t]	[g/t]	
PC-Hauptplatinen	203.200	615	247	81	Salhofer et al, 2009
PC-Netzteile	192.600	314	30	35	Salhofer et al, 2009
PC-Laufwerke	185.700	2.258	235	69	Salhofer et al, 2009

### 10.2.1.2 Gehalte an SEE in Kathodenstrahl- (CTR) und Leuchtstoffröhren

Der auf dem Schirmglas von CRT-Geräten aufgebrauchte Leuchtstaub besteht im Wesentlichen aus Halophosphat, Zinksulfid und Seltenen Erden (z.B. Yttrium, Europium). Die Mengen werden mit 7 bis 15 g pro Bildröhre angegeben [BIPRO 2006]. Die Menge an Leuchtstaub in Leuchtstoffröhren (LDR) wird von Huisman et al. (2007) mit 2,4 g pro Stk bei einem Durchschnittsgewicht von 144 g angegeben, der Leuchtstaub hat demnach einen Gewichtsanteil von 1,7 %. Eingesetzt werden neben Phosphatleuchtstoffen auch SE-Leuchtstoffe, die wertvollste Komponente dieser sogenannten Dreibandleuchtstoffe ist dabei der Rotleuchtstoff, der aus Yttrium/Europiumoxid besteht. Ein Bericht des Recyclingmagazins (5/2012, 20–22) über eine neue Aufbereitungsanlage für Leuchtstaub in Frankreich zitiert den Leiter der Forschungs- und Entwicklungsabteilung des Betreibers mit der Aussage, dass der Leuchtstoff 3 Gew.-% der Lampen ausmache und seinerseits 10 bis 20 % Seltene Erden enthalte [Anonymus 2012].

Die von Rabah (2004) untersuchten Leuchtstoffröhren wiesen folgende Zusammensetzung auf: Glas (97,6 %), Nickel-Kupfer-Draht (1,05 %), Aluminiumkappen (0,94 %), Wolfram (0,08 %) und Zinn (0,05 %). Der Gewichtsanteil des Leuchtstaubs wurde mit 0,28 % angegeben. Der Leuchtstaub bestand aus Calciumsulfat und -phosphat (98,5 %) sowie Yttrium (1 %) und Europium (1,5 %). Eine ähnliche Zusammensetzung des Leuchtstaubs stellte Rabah (2008) fest. Die aus 5000 Leuchtstoffröhren gewonnenen Proben wiesen 96 % Calciumsulphat und -orthophosphat auf, Europiumoxid hatte einen Anteil von 1,62 %, Yttriumoxid 1,65 % und 0,65 % waren Verunreinigungen. De Michelis et al. (2011) geben mit 7,55 % einen deutlich höheren Anteil an Yttrium im Leuchtstaub aus Leuchtstoffröhren an.

### 10.2.1.3 Gehalte an SEE in PCs, Laptops und Mobiltelefonen

Seltene Erdmetalle sind in PCs bzw. Laptops als Magnetmaterial in Motoren enthalten, die eine kleine Baugröße aufweisen sollen. Die Tabelle 67 zeigt die Gehalte an Neodym in diesen Bauteilen in PCs. In Tabelle 68 sind Neodymgehalte für Laptops angegeben. Demnach sind in einem PC ca. 5 g Nd und in einem Notebook ca. 3,5 g Nd zu erwarten. Buchert et al. (2012) geben den Gehalt an Nd in Notebooks ähnlich mit 2,1 g/Stk an.

Tabelle 67: Gehalte an Neodym in PCs. Quelle: [Westphal und Kuchta 2012]

Bauteil	Gewicht	Nd-Inhalt
	[g]	[mg]
Festplatte	593	3.621
Lautsprecher	30	310
CD-Laufwerk	905	977
Lüfter (Hauptplatine)	500	4,5
Lüfter (Netzteil)	500	3,8
Diskettenlaufwerk	373	116

Tabelle 68: Gehalte an Neodym in Laptops. Quelle: [Westphal und Kuchta 2012]

Bauteil	Gewicht	Nd-Inhalt
	[g]	[mg]
Festplatte	105	1.121
Lautsprecher	8	626
CD-Laufwerk	230	927
Lüfter	11	2,4
Diskettenlaufwerk	149	1.144

In ähnlichen Anwendungen für kleine Motoren findet sich Neodym auch in Mobiltelefonen, allerdings in deutlich geringeren Mengen (Tabelle 69).

Tabelle 69: Gehalte an Neodym in Mobiltelefonen. Quelle: [Westphal und Kuchta 2012]

Bauteil	Nd-Inhalt (mit Motor)	Nd-Inhalt (ohne Motor)
	[mg]	[mg]
Vibrationsmotor	32,5	-
Lautsprecher	29,9	49,6

#### 10.2.1.4 Gehalte an SEE in Flachbildschirmen

In Flachbildschirmen werden Seltene Erdmetalle als Leuchtstaub eingesetzt, wobei hier neben Yttrium als mengenmäßig bedeutendste Inhaltsstoffe auch Europium, Lanthan etc. Verwendung finden (vgl. Tabelle 70).

Neben den Elementen der Seltenen Erden ist bezüglich kritischer Rohstoffe unter anderem auch noch Indium zu beachten. Nach Tesar und Öhlinger (2012) beträgt der Indium-Gehalt von LCD-Bildschirmen  $234 \text{ mg/m}^2$ . Der am häufigsten in Verkehr gebrachte 32"-Bildschirm mit einer Fläche von  $0,29 \text{ m}^2$  hat demnach eine In-Inhalt von 69 mg und mit einem Rohstoffpreis von 520 \$/kg (<http://www.minormetals.com>, Abfrage 5.10.2012) ergibt sich ein

Wert des enthaltenen Indiums von 0,03 €. Dabei sind aber Kosten für die Abtrennung und Aufbereitung des enthaltenen Indiums noch nicht berücksichtigt.

Tabelle 70: Gehalte an Seltenen Erden in LCD-Displays mit CCFL-Hintergrundbeleuchtung. Quelle: [Buchert et al. 2012]

		<b>Notebook</b>	<b>Monitor</b>	<b>TV</b>
Yttrium	[mg]	1,8	16,0	110
Europium	[mg]	0,13	1,20	8,10
Lanthan	[mg]	0,11	1,00	6,80
Cer	[mg]	0,076	0,68	4,50
Terbium	[mg]	0,038	0,34	2,30
Gadolinium	[mg]	0,011	0,095	0,63

## 10.2.2 Sammlung von Elektroaltgeräten in Österreich

Erste Erfahrungen mit der getrennten Sammlung von EAG auf kommunaler Ebene wurden in Pilotprojekten gewonnen, die hauptsächlich in Mitteleuropa durchgeführt wurden. Die Ergebnisse in Österreich sind in Salhofer und Gabriel (1997), auf Europäischer Ebene in Lohse et al. (1998) beschrieben. Als wesentliches Ergebnis konnte festgestellt werden, dass eine getrennte Sammlung innerhalb der kommunalen Strukturen zur Abfallsammlung (Recyclinghöfe bzw. Einrichtungen zur Problemstoffsammlung) gut integrierbar und ohne großen Aufwand umsetzbar ist. Diese Erfahrungen im Hinblick auf erreichbare Sammelmengen und Kosten der Sammlung dienen der Vorbereitung von legislativen Regelungen auf nationaler und europäischer Ebene. Gregory et al. (2009) geben einen aktuelleren Überblick von den etablierten Sammelsystemen in europäischen Ländern und Regionen der USA.

Während die Europäische Elektroaltgeräterichtlinie 2002 (2002/96/EG) 10 Gerätekategorien definiert (Haushaltsgroßgeräte, IT-Geräte, Unterhaltungselektronik etc.) wurde in Österreich auf Basis der vorliegenden Erfahrungen eine verwertungsorientierte Einteilung gewählt, bei der z.B. Kühlgeräte nicht gemeinsam mit Großgeräten erfasst werden, da sie unterschiedlichen Verwertungswegen zugeführt werden. In der revidierten Fassung der Europäischen Elektroaltgeräterichtlinie (2012/19/EU) sind die Gerätekategorien im Wesentlichen den fünf in Österreich eingeführten Sammel- und Verwertungskategorien angepasst. Zusätzlich wurde allerdings eine Kategorie „kleine IT- und Telekommunikationsgeräte“ eingeführt, die aus Sicht der Verwertung interessant ist, da hier die Kleingeräte mit höherem Anteil an Leiterplatten zu finden sind.

In Österreich sind zurzeit fünf Sammel- und Verwertungssysteme für Elektroaltgeräte etabliert, die Elektroaltgerätekoordinierungsstelle (EAK) hat die Aufgabe, die Übernahme von den kommunalen Sammelstellen zu koordinieren und ein einheitliches Berichtswesen sicherzustellen. Die getrennte Sammlung von EAG ist eine Verpflichtung der Kommunen, ab

den regionalen Übernahmestellen gehen die EAG in die Verantwortung der Sammel- und Verwertungssysteme über. Neben den Kommunen hat auch der Elektrofachhandel eine Rücknahmeverpflichtung.

In der Tabelle 71 sind die Sammelmengen an Elektroaltgeräten in Österreich dargestellt (Daten nach [EAK 2006, EAK 2007, EAK 2008, EAK 2009, EAK 2010 und EAK 2011]). Von den Sammel- und Verwertungssystemen wurden im Jahr 2011 rund 23.700 t Elektrokleingeräte und etwa 880 t Lampen getrennt erfasst und der Verwertung zugeführt. Im gleichen Zeitraum gelangten allerdings erheblich größere Mengen in Verkehr, nämlich 45.300 t Elektrokleingeräte und 1.550 t Lampen [EAK 2011]. Eine genaue Bestimmung der tatsächlich entsorgten Geräte ist nicht möglich, da die Nutzungsdauer der Geräte nicht bekannt ist. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass das abfallrelevante Potenzial deutlich höher ist als die derzeitigen Sammelmengen. Als ein nicht erfasster Teilstrom sind die als Fraktion des Restmülls entsorgten Geräte zu nennen, die von Schuh (2012) mit 1,05 bis 1,40 kg/EW·a, das entspricht 8.400 bis 11.200 t/a abgeschätzt wurden. Eine Studie über die Entsorgungswege von EKG in den Niederlande [Huisman et al. 2012] gibt an, dass von 8,6 kg/EW·a als abfallrelevante Menge 2,2 kg/EW·a über Sammel- und Verwertungssysteme und 2,18 kg/EW·a über andere Verwerter erfasst werden, im Restmüll ließen sich hingegen 2,18 kg/EW·a feststellen. Eine Menge von 2,06 kg/EW·a war nicht zuzuordnen.

Tabelle 71: Sammelmengen an Elektroaltgeräten Kategorien in Österreich

	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Großgeräte	17.135	16.051	15.376	18.446	19.093	18.619
Kühl- und Gefrierschränke	15.683	13.748	13.705	14.687	12.872	13.046
Bildschirmgeräte	13.185	14.999	15.087	18.536	18.425	18.544
Elektrokleingeräte	14.397	15.828	16.317	20.025	21.696	23.677
Gasentladungslampen	979	956	905	863	861	883
<b>Summe</b>	<b>61.379</b>	<b>61.582</b>	<b>61.390</b>	<b>72.556</b>	<b>72.946</b>	<b>74.770</b>

In der Sammelkategorie Elektrokleingeräte ist die größte Bandbreite an unterschiedlichen Gerätearten zu finden: von größeren Geräten wie Mikrowellen über Haushaltskleingeräte, IT-Geräte, Unterhaltselektronik bis zu Spielzeugen, Werkzeugen etc. Eine getrennte Sammlung von Teilfraktionen findet bereits heute bei Mobiltelefonen statt, wobei das Sammelsystem „Wundertüte“ eine auch im globalen Vergleich bemerkenswert gute Leistungsfähigkeit aufweist [Beigl et al. 2012].

Derzeit wird in einer vom Institut für Abfallwirtschaft der Universität für Bodenkultur Wien betreuten Masterarbeit eine getrennte Erfassung von wertstoffreichen Kleingeräten untersucht. Dazu wird bei fünf Recyclinghöfen des Abfallverbands Tirol Mitte ein Sammelversuch durchgeführt, bei dem sowohl die erzielbaren Mengen als auch der erforderliche Aufwand (zusätzlicher Platzbedarf, Arbeitsaufwand) erhoben wird. Eine erste Zuordnung der bisher

gemeinsam erfassten Elektrokleingeräte nach den Kategorien „wertvolle EKG“ (PCs, Mobiltelefone, CD und DVD-Player, Drucker, SAT-Receiver etc.) und „andere EKG“ im Juli 2012 zeigte einen Masseanteil der „wertvollen EKG“ von 8 bis 27 % in drei ländlichen Gemeinden und von 16 bis 25 % in zwei städtischen Kommunen, im Mittel über alle Gemeinden 17 %. Die getrennte Sammlung dieser beiden Kategorien wird seit Anfang August 2012 als Versuch durchgeführt. Ergebnisse dazu sind Mitte November 2012 zu erwarten.

Weitere Versuche zur Intensivierung der getrennten Sammlung von Elektrokleingeräten werden zur Zeit in den Niederlanden und in mehreren Gebieten in Deutschland (etwa in Mainz, Düsseldorf und Leipzig) betrieben, auch die Stadt Wien führt einen Sammelversuch in Wohnhausanlagen durch, bei dem aufgrund einer haushaltnahen Sammlung die Erfassungsmenge gesteigert werden soll. Ergebnisse einer ersten Projektphase zeigen, dass mit der haushaltnahen Sammlung zusätzlich 1,1 bis 1,7 kg/EW·a an Elektrokleingeräten und Bildschirmgeräten zu erfassen sind [Spitzbart et al. 2009].

Es ist zu erwarten, dass aus diesen Sammelversuchen in bestimmten Siedlungsstrukturen die Schlussfolgerung abgeleitet wird, dass die getrennte Erfassung wertstoffreicher Kleingeräte für die Kommunen auch ökonomisch vorteilhaft ist. Für die Verwerter von EAGs entsteht daraus die Herausforderung, dass in Zukunft stärker differenzierte Inputströme (Chargen mit hochwertigem Material und solche mit niedrigen Gehalten) anstelle der heute vorherrschenden gemischten Materialströme zu verarbeiten sind. Die Festlegung von massenbezogenen Verwertungsquoten in der „WEEE-directive“ kann nur Einfluss auf die Rückgewinnung von Materialien mit hohem Massenanteil haben (Eisenmetalle, NE-Metalle), die geringen Anteile der kritischen Metalle werden durch diese Regelung nicht berührt (vgl. dazu auch Rotter (2010)). Die folgenden Ansatzpunkte bestehen, um das Potenzial an rückgewinnbaren Rohstoffen aus Elektroaltgeräten besser zu nutzen:

- Förderung der haushaltnahen Sammlung von Elektrokleingeräten, insbesondere in Wohnhausanlagen. Wie die bisher vorliegenden Ergebnisse zeigen, kann durch die Bequemlichkeit einer haushaltnahen Sammlung die Sammelmenge an EKG deutlich gesteigert werden. Dies ist allerdings aufgrund des Betreuungs- und Abholungsaufwands nur in größeren Wohnhausanlagen sinnvoll.
- Stärkere Erfassung beim Handel: mit der neuen WEEE directive (2012) ist der Handel verpflichtet, kleine EAG (< 25 cm Kantenlänge) auch ohne Neukauf (0:1) zurückzunehmen wenn die Verkaufsfläche > 400 m<sup>2</sup> beträgt. Zur Erzielung höherer Sammelmengen ist dazu allerdings eine entsprechende Öffentlichkeitsarbeit Voraussetzung.
- Problemstoffsammlung: die in Österreich flächendeckend eingeführte Problemstoffsammlung (stationäre Sammlung und mobile Sammlung) könnte stärker für die Sammlung von Elektrokleingeräten genutzt werden.

Neben der Schaffung einer verbesserten Infrastruktur zur getrennten Sammlung sind begleitende Informationskampagnen zur Information und Motivation der Bürger von großer Bedeutung. Ein positives Beispiel dafür ist die EAK-Schulkampagne mit Ausgabe einer Schul-DVD. Eine weitere begleitende Maßnahme stellt die Eindämmung der illegalen Exporte von Elektroaltgeräten dar. Weitere Vorschläge zur Optimierung der Rückgewinnung stellen folgende Punkte dar:

- Erarbeiten von Listen mit der Charakterisierung von Produkten im Hinblick auf kritische Ressourcen
- Untersuchung der Sensitivität (Ökobilanzen) und der Wirtschaftlichkeit der Rückgewinnung
- Erarbeitung von technischen Optionen zur Aufbereitung von Schlacken aus der MVA zur Rückgewinnung von Kupfer und Edelmetallen

### 10.3 Windkraftanlagen

Eine Wachstumsbranche, in der Neodym eingesetzt wird, ist die Windkraft. Die im Jahr 2009 installierte Anlagenkapazität in der EU (EU 27) betrug 132 TWh [BMU 2011]. Viele Windkraftanlagen (WKA) benötigen zur Anpassung der Umdrehungsgeschwindigkeit von der Rotornabe zur Generatorwelle ein Übersetzungsgetriebe. Damit sind jedoch folgende Nachteile verbunden:

- Getriebeöl und Zusatzeinrichtungen wie Temperaturüberwachung, Kühler, Pumpe, Flüssigkeitsstands-Messung, Verrohrung und Auffangwanne werden benötigt.
- Energieverluste im Getriebe.
- Windböen können bei kleineren Windrädern das Getriebe überlasten und frühzeitig zum Abrieb führen.
- Größeres Gewicht von Getriebe-Systemen bei kleinen Windrädern.
- Raumbedarf für das Getriebe.
- Größerer Verbrauch an Stahl durch die Errichtung des Getriebes. Gemäß Angaben der Fa. VESTAS können bei einer getriebelosen 3 MW-Anlage ca. 10 t Stahl eingespart werden [VESTAS 2013].

Die Verwendung von FeNdB-Magneten in getriebelosen WKA ist eine der technischen Möglichkeiten zur Vermeidung der genannten Nachteile und trägt zur Leistungssteigerung der WKA bei. Nicht jede getriebelose WKA enthält jedoch Neodym. Grundsätzlich können

die folgenden technischen Möglichkeiten der sogenannten „Erregung“ der Generatoren unterschieden werden [Giersch 2003]:

- Schleifringenerregung
- Bürstenlose Erregung (zum Beispiel: sogenannte RG-Sätze)
- Permanentmagnet-Erregung

Die weitere Unterscheidung der Generatormodelle in Synchron- und Asynchrongeneratoren sowie die Anwendung von Hybrid-Systemen (Getriebe kann „kurzgeschaltet“ werden) führen dazu, dass der europäische WKA-Markt für Nichtexperten unübersichtlich ist. Hinzu kommt noch die steigende Präsenz ostasiatischer (vor allem chinesischer) Hersteller und Zulieferer auf dem Markt, welche die Recherchen erschwert.

Der globale Marktanteil getriebeloser WKA für das Jahr 2008 wurde auf ca. 15 % geschätzt [Urban 2010]. Ein Windkraft-Experte des europäischen JRC, R.L. Arantegui gab in einer persönlichen Mitteilung an Moss für das Jahr 2009 einen Marktanteil von 14 % an [Moss et al. 2011]. Jener für getriebelose WKA (14 bzw. 15 %) kann jedoch nicht für eine Schätzung von Nd in WKA verwendet werden, da die Anteile der oben genannten Generatoren-Typen, z.B. getriebelose WKA mit Schleifringenerregung, nicht bekannt sind. Der Anteil der Nd-Technologie-WKA ist somit geringer als 14 bzw. 15 %. Buchert et al. (2011) schätzten dass im Jahr 2010 nur ca. 2 % der global hergestellten FeNdB-Magnete in Windkraftanlagen verbaut wurden. Annahmen im Rahmen der vorliegenden Studie (siehe nächster Absatz) zeigen, dass dieser Anteil jedoch höher sein könnte (bis ca. 12 %). Möglicherweise haben Buchert et al. (2011) die von Sakki (2009) stammende Schätzung für das Jahr 2008 übernommen (ebenfalls 2 %).

Ausgehend von den globalen Zuwächsen im Jahr 2009 (39 GW) und 2010 (36 GW) ergibt sich bei Annahme eines Marktanteiles von getriebelosen WKA, die Nd verwenden, von 5 bis 14 % und bei einem spezifischen Nd-Bedarf von 0,15 bis 0,3 t Nd/MW ein globaler Nd-Verbrauch in WKA von etwa 300 t/a bis ca. 1.800 t/a Neodym für 2009 bzw. 2010 (rund 1,5 bis 9 % der globalen Primärproduktion von ca. 18.300 t/a). Bezogen auf das in Permanentmagneten (alle Permanentmagnet-Anwendungen) global verbaute Nd ist der Prozentsatz in WKA ca. 2 % bis 12 % (gerundet).

### **10.3.1 Nd- und Dy-Menge in WKA mit Permanentmagnet-Generator**

Die Zusammensetzung der FeNdB-Magneten unterliegt (bis auf Dysprosium) einer geringen Schwankungsbreite von etwa 66–69 % Fe, 28–30 % Nd, 2–4 % Dy und 1 % B [Moss et al. 2011, US-DoE 2011]. Für spezielle Anwendungen (nicht Windkraft) kann der Dysprosium-Gehalt auch höher sein. Da FeNdB-Magnete korrosionsanfällig sind, werden die Blöcke bzw.

Formen oftmals beschichtet. Häufig findet hierbei eine Nickelbeschichtung Verwendung. Andere Möglichkeiten sind dreilagige Ni-Cu-Ni-Überzüge sowie Zn, Sn, Ag, Au oder Epoxyharz [KJ Magnetics 2012, Westphal und Kuchta 2012]. Der Massenanteil der Beschichtung ist bei großen Blöcken für WKA sehr gering, jedoch sind die Zusammensetzung und der Korrosionszustand der Blöcke möglicherweise für ein späteres Recycling relevant.

Die spezifischen Magnetmassen bewegen sich nach Moss et al. (2011), Lifton (2009) und IG Windkraft (2011) zwischen 0,5 t/MW und 1 t/MW (bezogen auf die Leistung der WKA). Davon abweichend gab die Fa. Arnold Magnetics auf Anfrage des U.S. Departments of Energy Werte zwischen 0,2 und 0,6 t Magnetmasse pro MW an [US-DoE 2011]. Bei kleinen Windrädern mit hoher Drehzahl kann der Anteil der FeNdB-Technologie und damit auch der spezifische Nd-Bedarf geringer sein. Moss et al. geben für WKA mit hoher Drehzahl einen Nd-Bedarf von 0,08 t/MW an. Relevant für die vorliegende Studie sind jedoch vor allem mittlere und große Windkraft-Anlagen. Von einer Magnetmasse von 0,5 bis 1 t/MW und einem Neodym-Gehalt des Magneten von ca. 30 % ausgehend ergibt sich bei diesen Anlagen eine spezifische Nd-Masse von ca. 0,15 bis 0,30 t Nd/MW. Zum Vergleich erwähnt Brixia (2010) für eine 3-MW-Anlage einen Nd-Bedarf von 0,6 t. Die spezifische Menge für diesen Anlagentyp ist somit 0,2 t Nd/MW. Dies deckt sich mit dem oben angegebenen Bereich für den Nd-Bedarf mittlerer und großer WKA-Anlagen. Der von VESTAS (2013) für eine 3-MW-Anlage (Typ V112) angegebene Neodym-Anteil von 0,082 t Nd (sowie zusätzlich 0,007 t Dy) ist ein Einzelwert, der nicht mit den übrigen Literaturdaten übereinstimmt und damit noch zu prüfen wäre.

### **10.3.2 Technische Trends, Metallmärkte und weitere Entwicklung**

Es besteht derzeit ein klarer Trend zur globalen Verbreitung der Windenergie-Technologie und zur Errichtung größerer und effizienterer Anlagen. Das Wachstum des Marktes hält insgesamt an [US-DoE 2011]. Optimistische Schätzungen der Entwicklung von Windkraft gehen davon aus, dass sich die installierte Leistung bis zum Jahr 2050 auf ca. 2.000 GW erhöhen könnte [IEA 2009]. Gegenüber 2008 (121 GW installierte Leistung) ist dies eine Steigerung von ca. 1.900 GW. Die längerfristigen Schätzungen sind hierbei mit Unsicherheiten behaftet, welche unter anderem vom Öl- sowie Kohlepreis, Preis für SE-Oxide und von den Umweltförderstrategien abhängen. In Österreich ist die Windkraft derzeit eine Wachstumsbranche. Gemäß IG Windkraft lag der Anteil der Windenergie am elektrischen Energieverbrauch Österreichs im Jahr 2011 bei 3,6 % und im Jahr 2012 bei ca. 4,9 % (Schätzwert der IG Windkraft für 2012).

Der stark volatile Metallmarkt für Nd (Abbildung 78; Spitze im Sommer 2011 bei ca. 470 \$/kg für 99 % Nd, danach Rückgang auf etwa 120 \$/kg bis April 2012 sowie unter 100 \$/kg im

November 2012) machte Nd im Jahr 2011 vorübergehend zu einem deutlichen Kostenfaktor der Errichtung. Die weitere Entwicklung der Kurse für Nd und Pr ist selbst für Experten an den Börsen schwer abzuschätzen.

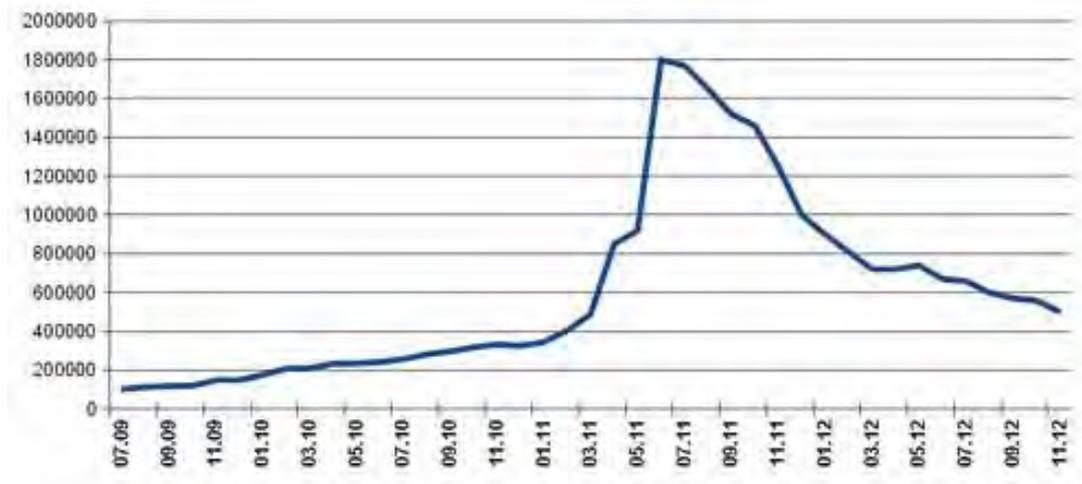


Abbildung 78: Kursentwicklung für Neodym von Juli 2009 bis Nov.2012 (RMB/t) nach Webcraft GmbH, Gottmadingen, DE (<http://www.supermagnete.de/faq/price>)

Die zukünftige technische Entwicklung bezüglich der Kraftübertragung zwischen Rotor und Turbine (getriebelos mit Permanentmagnet-Ausstattung oder mit Getriebe) wird von Experten in Österreich nicht einheitlich beurteilt [IG Windkraft 2010]. Das US Department of Energy verwendet sowohl ein „low market“- als auch ein „high market“-Szenario bei der Abschätzung des zukünftigen Bedarfes an Nd in der Windkraft. Im „low market“-Szenario wird angenommen, dass zukünftig der Marktanteil der Permanentmagnet-WKA an Land 25 % und offshore 15 % betragen wird, während im Bereich „high market“ die Annahme besteht, dass der Marktanteil sowohl an Land wie auch offshore 75 % betragen wird [US-DoE 2011]. Aufgrund der bereits bestehenden technischen Alternativen zum Einsatz von Nd in WKA erscheinen jedoch die Abschätzungen von Moss et al. (2011) realistischer. Moss et al. (2011) gehen von einem Marktanteil der Nd-Technologien im Sektor Windkraft von 15 % für das Jahr 2020 und von 20 % für das Jahr 2030 aus.

### 10.3.3 Lebenszyklus von WKA

Vom US-DoE (2011) sowie von Wilburn (2011) wird die Lebensdauer von WKA auf 20 bis 30 Jahre geschätzt. Nach einer Generalsanierung kann gemäß Wilburn (2011) die weitere Betriebsdauer 15 Jahre betragen, sodass sich 35 bis 45 Jahre ergeben. Andererseits liegen in Deutschland bereits Erfahrungen mit der Demontage und dem sogenannten Repowering vor. Letzteres bedeutet, dass kleinere WKA am gleichen Standort durch größere Anlagen bzw. durch neuere Anlagen mit einem höheren Wirkungsgrad ersetzt werden. In Deutschland wurden 116 Windräder mit einer Leistung von insgesamt 56 MW im Jahr 2010

demontiert und durch 80 Anlagen mit insgesamt 183 MW ersetzt (Erhebungen des Deutschen Windenergie-Institutes, zitiert in BWE (2012)). Gemäß BWE (2012), rechnet es sich oft, Anlagen abzubauen, zu verkaufen und zu ersetzen, wenn sie eine Lebensdauer von 12 bis 15 Jahren erreicht haben. Der BWE schätzt, dass spätestens 2015 über 9.500 Windräder mit einer Leistung von 6.000 MW ins Repowering-Alter kommen. Ein Repowering wurde in Österreich 2006 im Windpark Zurndorf durchgeführt (Typ Enercon E-40, 500 kW Nennleistung), der Ende 1997 den Betrieb aufnahm. Im Zuge des Repowerings fuhr der Windanlagenhersteller die Altanlagen zurück und gewährte einen Preisnachlass auf die neu errichteten WKA (Typ Enercon E-70, 2 MW Nennleistung).

Bereits in der Planungsphase von WKA wird von den Projektbetreibern der Abbau der Anlagen nach Ende der Nutzungsdauer finanziell berücksichtigt. Finanzielle Sicherheiten werden in der Praxis auch in Österreich von den betroffenen Gemeinden, beispielsweise in Form von Bankgarantien, gefordert [Schittl 2012]. Wie häufig dies in Österreich der Fall ist, kann jedoch derzeit nicht angegeben werden. Der Materialeinsatz einiger WKA wurde von D'Souza et al. (2011) näher untersucht. Die prognostizierte durchschnittliche Recyclingrate aller Komponenten einer Windturbine vom Typ Vestas V-112 liegt bei 81 %. Einen großen Anteil daran hat der Stahlturm, welcher ungefähr die Hälfte des Gesamtgewichts der Anlage ausmacht, und zu 97 % wiederverwertet werden kann. Nach Schittl (2012) erforscht der Windanlagenhersteller SIEMENS derzeit in einem Industriekonsortium die Recyclingmöglichkeiten von Permanentmagneten. Diese Forschungsarbeit könnte in Zukunft eine optimierte Verwertung von in Windturbinen eingesetzten Permanentmagneten ermöglichen. Das Recycling von Windenergieanlagen ist momentan in Österreich nicht etabliert. Ein Grund dafür liegt im derzeitigen geringen Aufkommen an EOL-Windenergieanlagen [Maringer 2011]. Für die Zerlegung der Generatoren sind in der Fachliteratur bisher keine Demontagetechniken beschrieben, dennoch dürfte diese aber bereits aufgrund der Masse der Kupfer-Wicklungen wirtschaftlich attraktiv sein.

#### **10.3.4 Situation und Datengrundlage in Österreich**

Die größten in Österreich installierten WKA, Typ E-126 der Fa. ENERCON enthalten gemäß Hersteller-Spezifikation (technisches Informationsblatt Fa. ENERCON sowie Firmenschrift „WINDBLATT 2/2011“) kein Neodym. Der Marktanteil von ENERCON beträgt in Österreich 43 % der installierten Leistung. Im April 2012 wurden im Rahmen des vorliegenden Projektes folgende Fragen an die Interessensgemeinschaft Windkraft Österreich (IG Windkraft) gerichtet (schriftlich):

- Wurde bei der IG Windkraft der Einsatz von Neodym-Eisen-Bor-Magneten in Österreich in den letzten Jahren thematisiert, z.B. in Studien im Auftrag der IG

Windkraft, wie etwa die Abschätzung der Gesamtmasse der Magneten oder Unterlagen zu technischen Alternativen zu getriebelosen WKA?

- Ist der Anteil getriebeloser WKA (Bestand, in MW ausgedrückt) in Österreich bekannt, können Sie dafür Daten zur Verfügung stellen?
- Ist der Anteil der WKA (z.B. Zuwachs oder Bestand, in MW ausgedrückt) in Österreich bekannt, bei denen Neodym-Eisen-Bor-Magnete verwendet werden? Können Sie diesbezüglich Daten zur Verfügung stellen?

Die freundliche und rasche Antwort der IG Windkraft ergab, dass Bereitschaft besteht, den Anteil getriebeloser WKA in Österreich zu ermitteln, dieser jedoch keinen Rückschluss auf die Verwendung von Neodym zulässt. Die IG Windkraft hat bisher keine Studien zu diesem Thema durchgeführt oder in Auftrag gegeben. Man ist sich jedoch der Bedeutung der Rohstoffversorgung in Bezug auf Neodym bewusst. Als weitere Vorgangsweise empfahl die IG Windkraft im April 2012 eine vertiefte Recherche bei den Herstellern. Diese wurde im Rahmen einer Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien teilweise durchgeführt [Gattringer 2012] (vgl. Kapitel 9.5).

Die Abschätzung von Gattringer (2012), konnte durch Recherchen auf der Homepage von VESTAS und DeWIND im Jänner 2013 nicht verbessert werden. Die Fa. VESTAS gibt an, dass einige neuere Modelle und zwar V112-3.0 und die 2.0 MW „Grid Streamer“ Neodym und Dysprosium im Generator verwenden [VESTAS 2013]. Die Statistik der Anlagen auf [www.thewindpower.net](http://www.thewindpower.net) zeigt auf, dass in Österreich derzeit (Stand Jänner 2013) die VESTAS-Typen V90/2000, V80/2000 und V47/660 an einigen Standorten aufgestellt sind (z.B. Aspersdorf, Auersthal, Maustrenk, Kreuzstetten, Scharndorf, Langmannersdorf, Gols, Hipples). Es ist jedoch nicht bekannt, ob es sich dabei um V90 (bzw. V80) „Grid Streamer“ oder gewöhnliche V90 (bzw. V80) Modelle handelt.

Die DeWIND beschreibt auf ihrer Homepage die 2 MW-Typen D8.2 und D9.3 detailliert. Daraus geht hervor, dass diese Modelle ein Getriebe besitzen [DeWIND 2013]. Damit liegt bei diesen Anlagen die Vermutung nahe, dass kein oder nur wenig Nd eingesetzt wird. Für weitere Modelle von DeWIND (D4, D8, D8.0) sind keine entsprechenden Informationen vorhanden.

## 10.4 Workshop „Seltene Rohstoffe“

Am 15. Jänner 2013 fand ein Informations-Workshop zum Thema „Beitrag der Abfallwirtschaft zur Versorgungssicherheit seltener Rohstoffe“ an der Montanuniversität Leoben (MUL) statt. Das Ziel dieser Veranstaltung war es, die Informationen an die Unternehmen, die kritische Rohstoffe importieren bzw. verarbeiten, Abfallsammler, -behandler, -trans-

porteurs, -händler, Technologieunternehmen im Bereich der Abfallwirtschaft und -technologie, Metallverarbeiter, Universitäten und Fachhochschulen, Behörden, Consulting- und Cluster-Unternehmen, Elektrogerätehersteller, -verarbeiter und -behandler weiterzugeben, um das Interesse der österreichischen Abfallwirtschaft zu überprüfen. Insgesamt nahmen ca. 110 Personen teil, wodurch bekräftigt wurde, dass das behandelte Thema aktuell, wichtig und zukunftsorientiert ist. Als Ausgangsbasis für die im Rahmen dieser Veranstaltung geplante Diskussion fand eine kurze Darstellung der bisherigen Ergebnisse der Studie dar, wobei vor allem folgende Punkte erläutert wurden:

- In der Vergangenheit standen die Rohstoffe kostengünstig in ausreichender Menge zur Verfügung, sodass deren Versorgungssicherheit im Gegensatz zu den Energie-Rohstoffen kaum Beachtung fand.
- Die zunehmende Komplexität der Konsumgüter in Kombination mit immer kürzeren Produktlebenszyklen und dem steigenden Bedarf an immer exotischeren Elementen führt zu entsprechenden Herausforderungen nach dem Ablauf der Lebensdauer bei der Aufbereitung und dem stofflichen Recycling der daraus entstehenden Abfallströme.
- Durch ein Recycling von Hochtechnologierohstoffen kann die strategische Abhängigkeit von Importen verringert werden, jedoch ist dadurch der Primärabbau nicht vollständig zu ersetzen. Österreich, wo kein Bergbau von Seltenen Erden erfolgen kann, ist daher auf andere Lösungsmöglichkeiten angewiesen, wie z.B. Recyclingtechnologien.
- Für ein effizientes Recycling ist die gesamte Kette von der Produktion der Waren und deren Sammlung am Ende des Lebenszyklus über deren Aufbereitung bis zur Wiederbereitstellung der enthaltenen Rohstoffe entscheidend.

Während der Podiumsdiskussion wurden sieben Themenschwerpunkte mit folgenden Inhalten behandelt:

- **Strategische Bedeutung kritischer Rohstoffe aus Abfällen:** Aus der Sicht der Abfallwirtschaft werden alle Produkte, die diese kritischen Rohstoffe beinhalten, am Ende zu Abfall weshalb ein Recycling sinnvoll erscheint. In Produktionsprozessen entstehen ebenso Nebenprodukte und Abfälle, die kritische Rohstoffe enthalten; dort ist eine innerbetriebliche Kreislaufführung oder eine alternative stoffliche Verwertung zweckmäßig. Jedoch gibt es nur zum Teil vorhandene Recyclingtechnologien, woraus neben anderen Gründen sehr niedrige Recyclingraten und in weiterer Folge eine hohe Rohstoffimportabhängigkeit der EU resultieren.

- **Produkte mit kritischen Rohstoffen:** Derzeit werden Elektroaltgeräte bei der Sammlung nur teilweise erfasst, z.B. werden in Österreich ca. 23.700 t an Elektrokleingeräten (EKG) gesammelt. Es befinden sich aber immer noch 8.400 t bis 11.200 t an EKG im Restmüll. Die Sammlung wird derzeit als haushaltsnahe Sammlung, beim Handel oder gemeinsam mit den Problemstoffen durchgeführt. Momentan gibt es ca. 700 Windkraftanlagen (WKA) in Österreich und acht dominierende Hersteller. Für WKAs mit Generatoren aus Basis von Permanentmagneten werden ca. 0,15 bis 0,30 t Neodym pro Megawatt gebraucht. Im Bereich der KFZ ist das Recycling von Abgaskatalysatoren etabliert und zu nahezu 100 % möglich. In den Schredderbetrieben gibt es jedoch neben den Katalysatoren und den  $\lambda$ -Sonden keine Aktivitäten zur Rückgewinnung von kritischen Rohstoffen. Der Marktanteil von Hybrid- und Elektrofahrzeugen ist aktuell noch gering.
- **Ressourceneffizienz in der Produktion:** Laut einer Erhebung in Österreich und Bayern vom Clusterland Oberösterreich für Klein- und Mittelunternehmen in den Branchen Kunststoff, Elektrik und Elektronik, Metall und Mechanik sehen sich über 50 % der untersuchten Betriebe als sehr oder eher ressourceneffizient an. Nur 6 % bezeichnen sich als eher wenig ressourceneffizient und 1 % als nicht ressourceneffizient. Hier gilt, das Bewusstsein für eine ressourceneffizientere Produktion zu erhöhen und Handlungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Weiters sind die Möglichkeit eines Wissensaustausches, der Zugang zu Informationen und eine Beratung zu empfehlen. Die Ressourceneffizienzmaßnahmen in der Produktion können vielseitig sein und von einer Verschnittoptimierung, über eine Wasser-, Hilfs- und Betriebsmittel-Aufbereitung bis zu einer Wärmerückgewinnung reichen. Eine große Anzahl an möglichen Maßnahmen scheitert meist aus Gründen des negativen betrachteten Kosten/Nutzen-Verhältnisses, des Mangels an Technologie (→ Forschung) und des fehlenden Know-Hows der Unternehmen.
- **Aufbereitung wertstoffreicher Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen (MVA):** Die Aufbereitung von nassen Schlacken der Fraktion > 5 mm funktioniert in Österreich bereits sehr gut. Die Aufbereitung von Schlacken < 5 mm ist hingegen nicht etabliert. Jedoch wäre der Anteil der Nichteisenmetalle (vor allem Edelmetalle) in diesen feineren Schlacke-Fractionen für eine weitere Aufbereitung sehr interessant. In der Schwerfraktion der Feinanteile befinden sich unter anderem Kupfer, Blei, Nickel, Chrom, Gold und Silber. Weil die steigenden Rohstoffpreise die Aufbereitung begünstigen, sind Innovationen im Bereich Schlackenaufbereitung (Siebanlagen, Magnet- und Wirbelstromabscheider, Dichtentrennung, Sensorsortierung) notwendig, um aus diesen Stoffströmen die kritischen Rohstoffe zurückzugewinnen.

- **Recyclinggesellschaft:** In der EU-Abfallrahmenrichtlinie werden die „Schaffung einer Recyclinggesellschaft“ und eine „Entkoppelung des Wirtschaftswachstums vom Abfallaufkommen“ angedacht. Auf dem Weg zu einer Recyclinggesellschaft ist quantitatives Wachstum durch qualitatives Wachstum zu ersetzen. Daraus resultieren mehr Lebensqualität, weniger Schadstoffbelastung, die Vermeidung volkswirtschaftlich nicht sinnvoller Stoffströme etc. Ein „Design for Recycling“ muss zur Voraussetzung für den wirtschaftlichen Erfolg werden. Das heißt, dass sich privatwirtschaftliche Gewinne lediglich durch ökologisch und sozial verantwortliches Handeln erreichen lassen, also nur, wenn auch ein volkswirtschaftlicher Nutzen entsteht. Eine Möglichkeit dies zu erreichen, sind ökosoziale Lenkungssteuern. Die Grundlagenforschung im Bereich der Rückgewinnung von seltenen Rohstoffen muss forciert werden. Neben quantitativen Recyclingzielen (WEEE, Alt-Kfz etc.) sind auch qualitative Recyclingziele notwendig, besonders bei seltenen Rohstoffen. Eine Rückgewinnung der Rohstoffe ist oft betriebswirtschaftlich unrentabel, weil der volkswirtschaftliche Nutzen zu wenig honoriert wird. Eine gut entwickelte Recyclingwirtschaft kann ein fehlendes Ökodesign nicht abfedern. Als Beispiel dafür ist der Neodym-Magnet in Computerfestplatten heranzuziehen, der durch das fehlende Ökodesign nicht wirtschaftlich auszubauen ist.
- **Materialbilanzen:** Hinsichtlich Erzlagerstätten ist Österreich, von wenigen Ausnahmen abgesehen, arm an Rohstoffen. Die Sicherung der Rohstoffversorgung inkludiert jedoch primäre und sekundäre Ressourcen. Als Beispiel hierfür kann angeführt werden, dass in Österreich zwar kaum Kupfererze vorhanden sind, aber eine beachtliche Menge an verbautem Kupfer in diversen Geräten (E-Geräte, Haushaltselektronik usw.) in Firmen und Haushalten zu finden ist. Daher sollte eine Erweiterung/Ergänzung der Bestandsaufnahme an Reserven und Ressourcen auf den urbanen Bereich („urban mining“) angestrebt werden. Als Basis für die Bewirtschaftung von sekundären Rohstoffen können Materialbilanzen dienen. Zu deren Erstellung sind grundsätzlich geeignete Methoden und Instrumente vorhanden. Erste Anwendungen und Machbarkeitsstudien brachten allerdings unbefriedigende Resultate (speziell für kritische Rohstoffe). Der Grund hierfür ist die unzureichende Datenlage. Deren Analyse sowie die Entwicklung von Maßnahmen zur Behebung der Datendefizite und das Überzeugen und Vernetzen der Akteure sind für zukünftige Materialbilanzen notwendig. Letztendlich können standardisierte Materialbilanzen auf betrieblicher und regionaler Ebene in Zukunft als Basis für ressourceneffizientes Wirtschaften dienen.
- **Recyclingtechnologien:** Die Recycling- und Raffinationsverfahren zur Aufarbeitung von Al-Schrott und Al-haltigen Reststoffen sollten verbessert werden, um eine

Optimierung von Al-Legierungen zu erreichen. Hier soll der Mut aufgebracht werden, neue Märkte zu öffnen.

Zur Rückgewinnung von Edel- und Sondermetallen aus Elektronikschrott und weiteren Abfallströmen sind einerseits Optimierungen der bestehenden Prozesse und andererseits die Entwicklung und Umsetzung neuer Technologien erforderlich. Handlungsbedarf besteht unter anderem vor allem beim Recycling von Seltenen Erden aus sekundären Rohstoffen.

Aufgrund der vielfältigen Elementverteilung von Edelmetallen beim Recycling von Kupfer sind die Optimierung der Prozesstechnik (z.B. Schlackenmetallurgie) und der Kupferraffinationselektrolyse erstrebenswert.

Das Zinkrecycling und das Recycling von Schwermetallen aus industriellen Rückständen bedürfen einer Weiterentwicklung.

Aus diesen Themenschwerpunkten ergaben sich in der Diskussion die nachfolgend zusammengefassten Kommentare und Fragestellungen. In Bezug auf die strategische Bedeutung der Abfälle mit entsprechenden Inhalten an kritischen Rohstoffen besteht nach wie vor die Problematik des Exports in Länder mit ungenügender Infrastruktur und Technologie für das fach- und umweltgerechte Recycling. Dieser Situation lässt sich beispielsweise zum einen durch geeignete Anreizsysteme oder zum anderen mittels zweckmäßiger gesetzlicher Rahmenbedingungen gegensteuern. Letztere sollten vor allem Innovationen und Entwicklungen auf dem Gebiet der Wiederverwertung fördern, indem etwa die Thematik der Besitzfrage in der Abfallwirtschaft eindeutig und klar geregelt wird. Hinsichtlich ersterem ließen sich für bestimmte Produkte bzw. Gebrauchsgüter Pfandsysteme oder Leasingmodelle einführen, um diese nach Ablauf ihrer Lebensdauer auf geordnete Weise der bestmöglichen Verwertung zuzuführen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Sammlung und Aufbereitung zu den jeweiligen Abfallfraktionen, welche ausreichend hohe Konzentrationen an den entsprechenden kritischen Rohstoffen für ein wirtschaftliches Recycling enthalten, in regionalen und kleineren Anlagen erfolgen kann. Für die tatsächliche Rückgewinnung der individuellen Metalle über die aufwändigen, metallurgischen Prozesse sind jedoch aus ökonomischen Gründen zumeist Anlagen mit ausreichend hohen Durchsatzmengen notwendig.

Ein weiteres Problemfeld besteht in den Informationsdefiziten der Bürger bzw. Konsumenten aber auch zum Teil der Abfallwirtschaftsbetriebe betreffend des Vorliegens der jeweiligen Technologiemetalle (Konzentration und Form, wie unter anderem als Reinmetall, Legierung, Verbindung, komplexer Werkstoffverbund, etc.) in den einzelnen Produkten. Die weitgehende Schließung dieser Datenlücken könnte eine Optimierung der gesamten Prozesskette von der Sammlung über die Aufbereitung bzw. Sortierung bis hin zur Rückgewinnung zur Erzielung wesentlich höherer Ausbeuten an den jeweiligen kritischen Materialien ermög-

lichen. Dem stehen jedoch meistens seitens der Produzenten einerseits betriebliche Gründe (Wettbewerbsvorteil durch Geheimhaltung relevanter Daten) und andererseits die oftmals sehr langen Herstellungsketten (Rohstoff – Werkstoff – Halbzeug – Bauteil – Bauteilgruppe – Produkt) im Wege. Neben der Weitergabe der Inhaltsangaben (Materiallisten) zu den jeweiligen Gütern kann auch eine Steigerung der Ressourceneffizienz im Produktionsablauf zur Verminderung der Rohstoff-Abhängigkeit von ausländischen Produzenten beitragen. Für deren Realisierung ist jedoch nicht nur eine Optimierung bestehender Herstellungsmethoden, sondern vielmehr auch die Umsetzung neuer Technologien notwendig, um die Mengen an Produktionsabfällen und -reststoffen zu minimieren, wofür ein erheblicher Aufwand bezüglich Forschung und Entwicklung erforderlich ist.

Um vor allem das Recycling von gebrauchten Konsumgütern zur Rückgewinnung der kritischen Rohstoffe zu intensivieren, sind ebenso umfangreiche Maßnahmen zu verwirklichen. Zum einen wäre das in den letzten Jahren bereits oftmals diskutierte „design for recycling“ tatsächlich umzusetzen und zu realisieren. Weil jedoch im Bereich der Hochtechnologie (wiederaufladbare Batteriesysteme für die Elektromobilität, Smartphones, etc.) seitens der Kunden so enorme Anforderungen (Preis, Design, Funktionalität, usw.) gestellt werden, befindet sich die Verbesserung der Recyclingfähigkeit bei den Konstrukteuren in den Entwicklungsabteilungen der jeweiligen Konsumgüter in der Prioritätenliste nach wie vor fast ausschließlich weit hinten. Darüber hinaus besteht auch noch enormer Bedarf bei der Technologieentwicklung für die Recyclingprozesse, um auch die kritischen Rohstoffe mit nennenswerten Ausbeuten und einem vertretbaren Aufwand zurückzuerhalten. Seitens der Gesetzgebung wurden bisher jedoch praktisch ausschließlich quantitative Angaben (beispielsweise 50 % stoffliches Recycling für Lithiumionenbatterien aus dem Bereich der Elektromobilität) vorgeschrieben. Nachdem die Technologiemetalle jedoch in den meisten Produkten nur in geringen Konzentrationen enthalten sind und somit keinen signifikanten Beitrag zu diesen Quoten beitragen, fehlt hier ein entsprechender Anreiz, diese tatsächlich aus den Abfallfraktionen zu extrahieren.

## 10.5 Literatur

- ACEA, 2013: Pressemitteilung des europäischen Branchenverbandes ACEA vom 31.1.2013.
- Angerer, G. et al., 2009: Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Fraunhofer-ISI „Innovationspotenziale“. Stuttgart, Deutschland: Fraunhofer Verlag.
- Anonymus, 2012: Urban Mining im Pulver. Recyclingmagazin 5/2012, 20–22.

- Beigl, P. et al., 2012: Take back systems for mobile phones – review and recommendations. *Waste and Resource Management* 165, 25–35.
- BIPRO, 2006: Verwertungsmöglichkeiten von Bildröhrenglas aus der Demontage von Elektroaltgeräten, Studie im Auftrag des BMLFUW, Wien.
- BAWP, 2011: Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2011 (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft).
- BMU, 2011: Erneuerbare Energie in Zahlen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, Deutschland.
- Boll, W., 2008: Mechanismusentwicklung für die Rhodiumkomponente in Autoabgaskatalysatoren. Diplomarbeit am Institut für Technische Chemie und Polymerchemie, Universität Karlsruhe (TH).
- Bosch, 2001: Pressemitteilung vom 4. Dez. 2011. Internet: <http://www.bosch-presse.de/presseforum/details.htm?txtID=1072>.
- Bosch, 2011/2007: Pressemitteilungen und Internetbroschüren, 4. Dez. 2011, 23. Mai 2007. Internet: <http://www.bosch.de>.
- Brebua, M. et al., 2007: Effect of flame retardants and Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> synergist on the thermal decomposition of high-impact polystyrene and on its debromination by ammonia treatment *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 79, 346–352.
- Brixa, C., 2010: Seltene Erden und High-Tech Metalle, eine Einführung. Internet: <http://www.privatconsult.com>, Download März 2012.
- Buchert, M. et al., 2011: Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität. Arbeitspaket 7 des Forschungsvorhabens OPTUM: Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen. Ökologie-Institut Darmstadt e.V.
- Buchert M. et al., 2012: Recycling critical raw materials from waste electronic equipment. Commissioned by the North Rhine-Westphalia State Agency for nature, Environment and Consumer protection. Darmstadt.
- BWE, 2012: Windindustrie in Deutschland 2011. Bundesverband Windenergie (BWE) eV.
- Christen, D., 2012: Shredderleichtfraktion – vom Abfall zum Wertstoff? In: VDI-Fachkonferenz Stoffliche und energetische Verwertung von Shredderrückständen, 21.–22. Juni 2012, Nürnberg. Herausgeber: VDI Wissensforum GmbH., Düsseldorf.
- De Michelis I. et al., 2011: Treatment of exhaust fluorescent lamps to recover yttrium: Experimental and process analyses. *Waste Management*, 31, 2559–2568.
- DeWIND, 2013: Internet: <http://de.dewindco.com/ger/>, Download Jänner 2013.
- D'Souza, N. et al., 2011. Life Cycle Assessment of Electricity Production from a V112 Turbine Wind Plant. PE North West Europe ApS.

- Dudenhöffer, F., 2012: Politik hat bei E-Autos Versprechen nicht eingelöst. MDR Exklusiv vom Juni 2012. Internet: [http://www.uni-due.de/~hk0378/publikationen/2012/20120606\\_MDR.pdf](http://www.uni-due.de/~hk0378/publikationen/2012/20120606_MDR.pdf)
- EAK 2006: Jahresbericht 2006 (Elektroaltgerätekoordinierungsstelle)
- EAK 2007: Jahresbericht 2007 (Elektroaltgerätekoordinierungsstelle)
- EAK 2008: Jahresbericht 2008 (Elektroaltgerätekoordinierungsstelle)
- EAK 2009: Jahresbericht 2009 (Elektroaltgerätekoordinierungsstelle)
- EAK 2010: Jahresbericht 2010 (Elektroaltgerätekoordinierungsstelle)
- EAK 2011: Jahresbericht 2011 (Elektroaltgerätekoordinierungsstelle)
- Eurokat, 2012: Internet: [http://www.eurokat.de/deutsch/katinfos/katinfos\\_edelmetallimkat.html](http://www.eurokat.de/deutsch/katinfos/katinfos_edelmetallimkat.html), Download Juni 2012.
- Friedl, C., 2012: Hoffnungslos verfahren. Recycling Magazin 08/2012, 30–34.
- Gattringer, 2012: Stoffflussanalyse von Neodym in Hochtechnologieanwendungen für Österreich. Diplomarbeit an der Technischen Universität Wien.
- Giannouli, M. et al., 2006: Waste from road transport: Development of a model to predict waste from end-of-life and operation phases of road vehicles in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 1–14.
- Giersch, H.-U., 2003: Elektrische Maschinen. 5. Auflage. Teubner Verlag.
- Gieshoff, J. und B. W. L. Southward, 2012: Materials for heterogeneous catalysis. In: *Precious Materials Handbook*. 1<sup>st</sup> edition. Hrsg.: UMICORE AG & Co.KG, Hanau-Wolfgang, DE.
- Go, T. F. et al., 2011: Disassembly of end-of-life vehicle: A critical review of evaluation methods. *Journal of Cleaner Production*, 19, 1536–1546.
- Goonan, T. G., 2011: Rare earth elements – end use and recyclability. Editor: USGS. Internet: <http://pubs.usgs.gov/sir/2011/5094/pdf/sir2011-5094.pdf>
- Gregory, J. et al., 2009: E-waste take-back system design and policy approaches Step Initiative.
- Hagelüken, C., 2007: Closing the loop – Recycling of automotive catalysts. *Zeitschrift Metall*, 61, 24–39.
- Hagelüken C. und M. Buchert, 2008: The mine above ground - Opportunities and challenges to recover scarce and valuable metals from end-of-life electronic devices. Vortrag auf der IERC 2008, Salzburg.
- Hanisch, C. et al., 2012: Recycling von Lithium-Ionen-Batterien – Das Projekt LithoRec. In: Thome-Kozmiensky, K.J. und D. Goldmann, 2012.
- Huisman, J. et al., 2007. Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), Final Report.

- Huisman, J. et al., 2012: The Dutch WEEE Flows. United nations University, ISP – SCYCLE, Bonn, Germany.
- IEA, 2009: Technology Roadmap Wind Energy. Author: International Energy Agency, Hrsg: OECD.
- IG Windkraft, 2010: Umfrage unter Windkraft-Experten im Rahmen der Auftaktveranstaltung „Windenergie-quo vadis?“, 2.12.2010. Umfrageergebnisse in [www.igwindkraft.at](http://www.igwindkraft.at).
- IG Windkraft, 2011: High-Tech braucht Seltene Erden, aber China hat dafür ein Monopol. Journal Windenergie Nr. 59, Jan. 2011.
- Keller M., 2006: Assessment of gold recovery processes in Bangalore, India and evaluation of an alternative recycling path for printed wiring boards. Diploma Thesis ETH Zürich 2006.
- KJ Magnetics, 2012: Internet: <http://www.kjmagnetics.com/neomaginfo.asp>, Download April 2012.
- Kletzmayer, W. und F. Neubacher, 2010: Paradigmenwechsel in Umweltschutz und Abfallwirtschaft am Beispiel Altfahrzeuge und Elektro-Altgeräte. 10. DEPOTECH Konferenz, 3.–5. Nov. 2010, 277–282.
- Kletzmayer, W., 2012: Aktuelle Situation der SLF- und Altfahrzeugeverwertung in Österreich. In: VDI-Fachkonferenz Stoffliche und energetische Verwertung von Shredderrückständen, 21.–22. Juni 2012, Nürnberg. Herausgeber: VDI Wissensforum GmbH., Düsseldorf.
- Kletzmayer, W. und M. Gratz, 2012: Aktuelle Entwicklungen und Optimierungspotentiale in der Altfahrzeugeverwertung. DepoTech 2012. Tagungsband zur 11. DepoTech Konferenz, 6.–9. Nov. 2012, Leoben. Hrsg: Lorber, K. E. et al.
- Kohlmeyer, R., 2011: Einsatz einer Kompaktsortieranlage zur Rückgewinnung von Metallen aus Shredderrückständen; In: VDI-Wissensforum: Stoffliche und energetische Verwertung von Shredderrückständen, Tagungsband. Düsseldorf.
- Konietzko, S., 2011: Ressourcenverfügbarkeit von sekundären Rohstoffen. Potenzialanalyse für Lithium und Kobalt – Bericht der Umbrella-Arbeitsgruppe Ressourcenverfügbarkeit. Im Rahmen der Projekte LithoRec und LiBRi.
- Kopera, J. J. C., 2004: Cobasys – Inside the Nickel Metal Hydrid Battery. Internet: [http://www.cobasys.com/pdf/tutorial/InsideNimhBattery/inside\\_nimh\\_battery\\_technology.html](http://www.cobasys.com/pdf/tutorial/InsideNimhBattery/inside_nimh_battery_technology.html).
- Krafftahrtbundesamt, 2013: Pressemitteilung Nr.1/2013 – Fahrzeugzulassungen im Dezember 2012. Deutsches Krafftahrtbundesamt. Internet: <http://www.kba.de>.
- Kremlicka, R., 2012: Megatrends in der Automobilindustrie und ihre Auswirkungen auf den AC Centrope. A.T. Kearney Tagung, Wien, 2012.

- Kuchta, K., 2004: Recycling von gebrauchten Autokatalysatoren – Neue arbeitssicherheits-technische und abfallrechtliche Regelungen. *Metall*, 58, 287–289.
- Kuchta, K., 2012: Vergleich der Wertstoffpotentiale von E-Schrott und Altfahrzeugen. In: VDI-Fachkonferenz Stoffliche und energetische Verwertung von Shredderrückständen, 21.–22.Juni 2012, Nürnberg. Herausgeber: VDI Wissensforum GmbH., Düsseldorf.
- Kümmerer, K., 1999: Relevanz von Platinemissionen durch Krankenhäuser. In: Zereini, F. und F. Alt (Hrsg.) Emissionen von Platinmetallen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 191–203.
- Lifton, J., 2009: The Rare Earth Crisis of 2009 – Part 1. In: Technology Metals Research Homepage. Internet: [www.techmetalsresearch.com](http://www.techmetalsresearch.com).
- Lohse, J. et al., 1998: Collecting targets for waste from electrical and electronical equipment (WEEE).
- Mairec, 2012: Firmenhomepage. Internet: <http://www.mairec.com>, Download Juni 2012.
- MaRESS, 2011: Metallische Rohstoffe, weltweite Wiedergewinnung von PGM und Materialien für Infrastrukturen (Materialeffizienz und Ressourcenschonung). Abschlussbericht AP2. Internet: [http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/MaRess\\_AP2\\_8\\_AbschlussBer.pdf](http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/MaRess_AP2_8_AbschlussBer.pdf)
- Maringer, F. 2011. Schriftliche Mitteilung an Schittl, 2012 betreffend Recycling von Windenergieanlagen in Österreich.
- MBR, 2012: Daten zum Aufbau von Sicherheitsgläsern. Internet: [www.mbr-recycling.de](http://www.mbr-recycling.de). Download Juni 2012.
- Mitan, N. et al., 2008: Effect of decabromodiphenyl ether and antimony trioxide on controlled pyrolysis of high-impact polystyrene mixed with polyolefins. *Chemosphere*, 72, 1073–1079.
- Möckel, M., 2012: Neue technologische Entwicklungen bei mobilen Stromspeichern. 12. Symposium Energieinnovation, 15.–17. Feb. 2012, Graz.
- Moss, R. L. et al., 2011. Critical Metals in Strategic Energy Technologies. Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies. Publications Office of the European Union, LUX.
- OSTFALIA, 2012: Wiedereinsatz von PVB aus Sicherheitsgläsern. Internet: [www.ostfalia.de/cms/de/ifr](http://www.ostfalia.de/cms/de/ifr). Download Juni 2012.
- Pape, R., 1999: Die  $\lambda$ -Sonde als Messgerät für das chemische Potential. Staatsexamen am Institut für theoretische Festkörperphysik, Universität Karlsruhe.
- Rabah, M. A., 2004: Recovery of aluminium, nickel–copper alloys and salts from spent fluorescent lamps. *Waste Management*, 24, 119–126.
- Rabah, M. A., 2008: Recyclables recovery of europium and yttrium metals and some salts from spent fluorescent lamps. *Waste Management*, 28, 318–325.

- Rodrigo, J. et al., 2004: Integrated Assessment of Automotive EES. Sustainable Electrical & Electronic System for the Automotive Sector (SEES). Gefördert im 6. RP der EC.
- Rotter, V. S., 2010: Ressourceneffizienz im Recycling am Beispiel Rückgewinnung seltener Metalle; Depotech 2010, 295–300.
- Rüdel H. et al., 2004: Verbleib von Platingruppenelementen in der Umwelt. Hrsg: Fraunhofer Institut Molekularbiologie und Angewandte Ökologie, Schmallenberg.
- Sakki, R., 2009: Technology Trends in Wind Power Generators. 2009 Nordic Conference, 13.–15. Sept. 2009.
- Salhofer, S. und Gabriel, R., 1997: Stand und Entwicklung bei der Sammlung und Verwertung von Elektroaltgeräten in Österreich. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 49, Heft 7/8.
- Salhofer S. et al., 2009: Vergleich von manueller Demontage und mechanischer Aufbereitung von PCs, Technical Paper KERP.
- Salhofer, S. et al., 2012: Recycling of flat screens as a new challenge in WEEE recycling. Waste and Resource Management, 165, 37–43.
- Sander, K., 2012: Entwicklung eines Leitfadens zur Durchführung von Shredderkampagnen. Folienunterlagen, In: VDI-Fachkonferenz Stoffliche und energetische Verwertung von Shredderrückständen, 21.–22. Juni 2012, Nürnberg. Herausgeber: VDI Wissensforum GmbH., Düsseldorf.
- Scherhauser, S., 2007: Die Verwertung von Altfahrzeugen – Technologien und Verwertungswege in Europa. Diplomarbeit, FH Pinkafeld.
- Schittl, 2012: Recyclingpotential von kritischen Rohstoffen in Technologien zur Energieumwandlung. Diplomarbeit am Institut für Abfallwirtschaft, Universität für Bodenkultur.
- Scholz, C., 2012: Mail an Sarc, R. (MUL/IAE) vom 16.10.2012.
- Schröter, F., 2010: VDI-Bericht vom 4. Jan. 2010 über den Schrottplatz der Deutschen Erz- und Metall-Union GmbH in Salzgitter (DEUMU). Internet: <http://ut.vdi-bs.de/DEUMU.html>.
- Schuh, A., 2012: Schadstoffeintrag aus Elektroaltgeräten und Gerätealtbatterien in den Restmüll in Österreich. Masterarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien.
- Schweimer, G. W. und M. Schuckert, 1996: Sachbilanz eines Golf. In: Tagung der Gesellschaft für Fahrzeug- und Verkehrstechnik in Wolfsburg, 27. bis 29. Nov. 1996. Ganzheitliche Betrachtungen im Automobilbau: Rohstoffe - Produktion - Nutzung – Verwertung. Herausgeber: Düsseldorf: VDI Verlag, VDI Berichte; 1307.
- Spitzbart, M. et al., 2009: Varianten zur Erfassung von Elektrokleingeräten in der Stadt Wien. Studie im Auftrag der Stadt Wien, Projektbericht unveröffentlicht.

- Stahl, D. et al., 2011: Bestimmung von Schwermetallen in Bremsbelägen von Fahrzeugen. Kantonales Labor Zürich, CH, September 2011.
- Statistik Austria, 2012. Pressemitteilung 10.196-049/12 über den KFZ-Bestand in Österreich im Jahr 2011. Internet: [http://www.statistik.at/web\\_de/presse/062556](http://www.statistik.at/web_de/presse/062556).
- Tesar, M. und A. Öhlinger, 2009: Elektroaltgerätebehandlung in Österreich Zustandsbericht 2008; UBA Report 199.
- Tesar, M. und A. Öhlinger, 2012: Flachbildschirmaltgeräte, Anforderungen an die Behandlung und Status in Österreich; UBA Report 0348, Wien.
- Urban, A., 2010: With or without gearbox? Drive train development for wind turbines. Handout zum Technologie-Workshop "Windenergie – quo vadis?", 2.12.2010, Haus der Industrie, Wien.
- US-DoE, 2011: Critical Materials Strategy. Hrsg.: US Department of Energy.
- VESTAS, 2013: Internet: <http://www.vestas.com/en/about-vestas/sustainability/sustainable-products/life-cycle-assessment/rare-earth-elements-1.aspx>, Download Jän. 2013.
- VW Group, 2011: ViaVision – Volkswagen Group Nachrichten aus der mobilen Zukunft. Nr. 4 / August 2011, 3.
- VW Group, 2012: ViaVision – Volkswagen Group Nachrichten aus der mobilen Zukunft. Nr. 1 / Februar 2012, 6.
- Weatherhead, T. und D. Hulse, 2005: A study to determine the metallic fraction recovered from end of life vehicles in the UK. Report of the Department of Trade and Industry, Sept. 2005.
- Westphal, L., 2012: Recyclingpotential von Permanentmagneten aus Elektroaltgeräten und Möglichkeiten der stofflichen Rückgewinnung. In: VDI-Fachkonferenz Stoffliche und energetische Verwertung von Shredderrückständen, 21.–22. Juni 2012, Nürnberg. Editor: VDI Wissensforum GmbH., Düsseldorf.
- Westphal, L., und K. Kuchta, 2012: Recyclingverfahren gesucht. Recyclingmagazin 13/2012, 30–33.
- Wilburn, D. R., 2011: Wind Energy in the United States and Materials Required for the Land-Based Wind Turbine Industry from 2010 through 2030. U.S. Department of the Interior und U.S. Geological Survey (USGS).

# 11. Verwertung/Sekundärmetallurgie

Bevor nachfolgend auf nähere Details zur Gewinnung von kritischen Rohstoffen aus gebrauchten Konsumgütern, Reststoffen oder sonstigen sekundären Ressourcen eingegangen wird, erfolgt zunächst noch die Darstellung einiger allgemeiner Aussagen, welche jedoch von ausschlaggebender Bedeutung sind. So erfordert das Recycling von gebrauchten Konsumgütern eine Reihe von Teilschritten (Abbildung 79), wobei der schwächste Schritt die größte Auswirkung auf die Gesamteffizienz der Rückgewinnungskette besitzt.



Abbildung 79: Beispielhafte Darstellung der Effizienz von Recyclingketten [Hagelücken 2010]

Dabei zeigt sich, dass vor allem im Bereich der Technologiemetalle noch enorme Herausforderungen bestehen, weil diese im Gegensatz zu den meisten Massenmetallen nach wie vor nur sehr geringe Rücklaufquoten (Abbildung 80) erzielen.

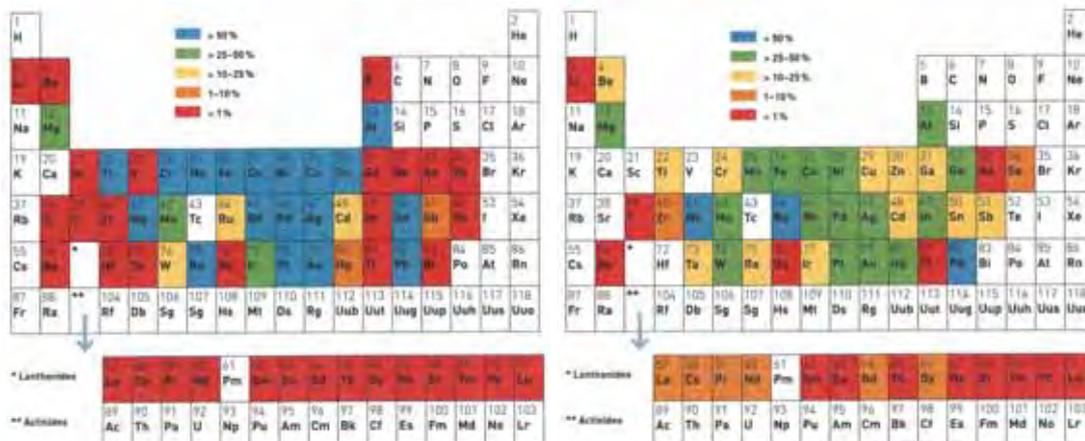


Abbildung 80: Recyclingraten (EOL-RR, links) und Anteil an Sekundärmaterial (RC, rechts) für die individuellen Metalle [Graedel et al. 2011]

EOL-RR: Recyclingrate aus gebrauchten Konsumgütern („end of life recycling rate“)

RC: Anteil an Sekundärmaterial am Gesamtbedarf der Verarbeitung („recycled content“)

Für die in der heutigen, modernen Welt unverzichtbar gewordenen und hinsichtlich ihrer Versorgungssicherheit derzeit zum Teil als kritisch oder potenziell kritisch eingestuft Rohstoffe lässt sich erkennen, dass sowohl die Recyclingraten aus den gebrauchten Konsumgütern ( $EOL-RR = g/d$ , Abbildung 81) als auch der Anteil an Sekundärmaterial am Gesamtbedarf der Verarbeitung ( $RC = (j+m)/(a+j+m)$ , Abbildung 81) noch fast ausschließlich extrem niedrige Werte aufweisen.

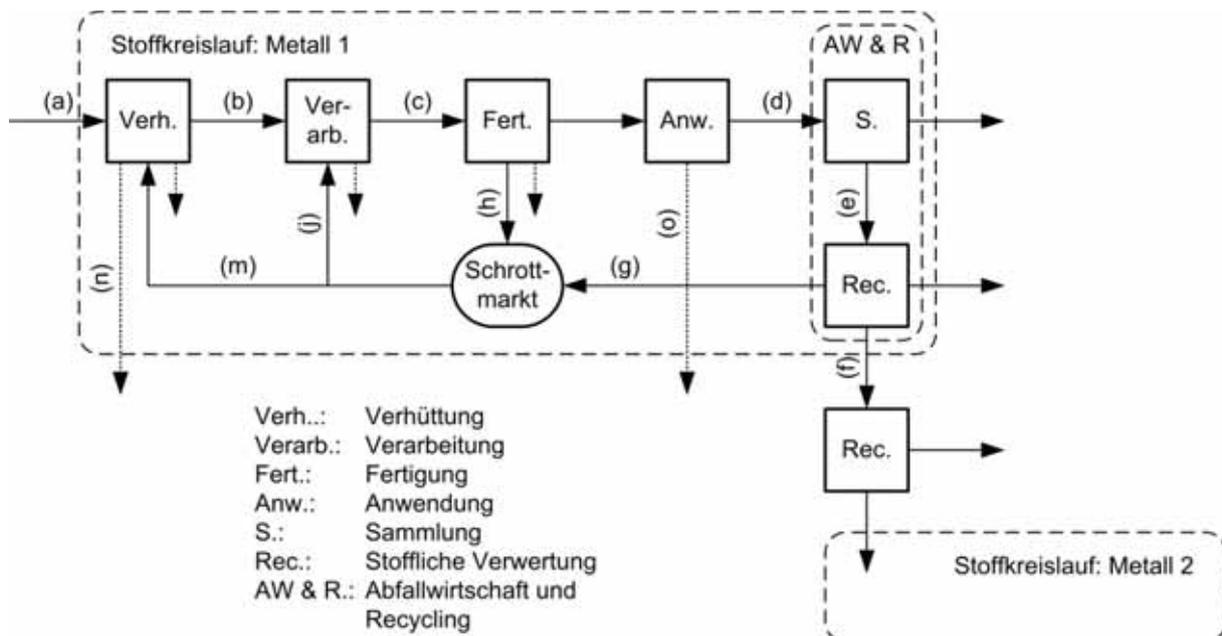


Abbildung 81: Grundsätzlicher Lebenszyklus von Metallen [Graedel et al. 2011]

(a) Primärrohstoffquelle, (b) raffiniertes Metall, (c) Zwischenprodukte, wie Legierungen und Halbzeuge, (d) Metallinhalt der gebrauchten Produkte, (e) zur stofflichen Verwertung gesammelter Metallinhalt, (f) Metallinhalt, der als Begleitelement eines anderen Metalls dem Kreislauf verlorenght, (g) rückgeführter Altschrott, (h) Produktionsabfälle, Neuschrott, (j) direkt in der Verarbeitung eingesetzte Schrotte, (m) für die Verhüttung genutzte Schrotte, Sekundärmetallurgie, (n) Berge und Schlacken, (o) Dissipation in der Anwendung

In Abbildung 81 wird auch bereits indirekt angedeutet, dass im zunehmenden Ausmaß eine Vernetzung stattzufinden hat und nicht mehr wie bisher zum Teil aus einem bestimmten Stoffstrom nur die Extraktion eines oder einiger weniger Wertmetalle erfolgt. Dies gilt nicht nur für die Primärmetallurgie, welche immer stärker auf Erze und Konzentrate geringerer Qualität und komplexer Zusammensetzung angewiesen ist, sondern vor allem für die Sekundärmetallurgie, im Besonderen jener der Technologiemetalle. Dies resultiert daraus, dass sich nicht nur die Komplexität der Produkte und die Zahl der in den jeweiligen Produkten benötigten Elemente bzw. Wertmetalle zunehmend erhöht (Abbildung 82), sondern darüber hinaus vor allem die kritischen Rohstoffe oftmals nur in geringsten Konzentrationen enthalten sind.

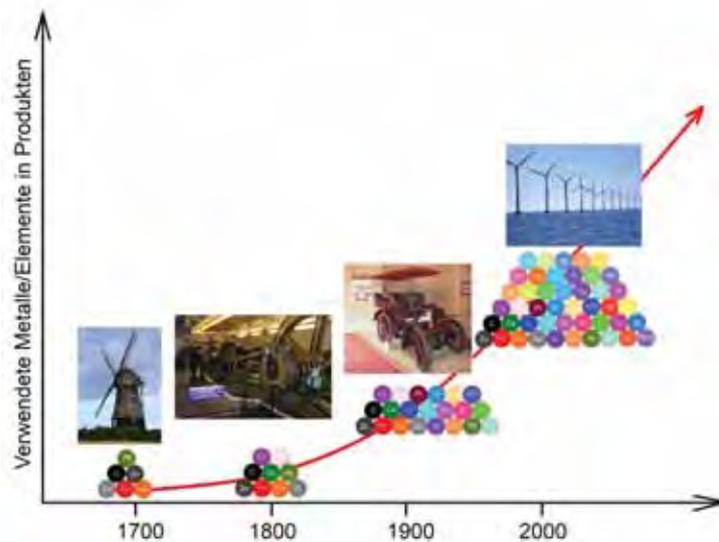


Abbildung 82: Zunahme der Elementvielfalt in den Produkten im Laufe der letzten Jahrhunderte  
[UNEP]

Bezüglich der Recyclingfähigkeit gibt es grundsätzlich zahlreiche Einflussfaktoren, von denen einige nachfolgend aufgelistet werden:

- Inhalt an Wertmetallen und deren Preise
- Zusammensetzung (Störstoffe, etc.), Rückgewinnungsrate, Technologie, Kosten
- Anwendungssegment, Lebenszyklus, Logistik

Auch für die Auswahl des geeigneten Verfahrens sind im Wesentlichen die gleichen Faktoren (Materialzusammensetzung, Wertmetallkonzentration, Matrixeigenschaften, sowie weitere enthaltene Metalle und organische Verunreinigungen, etc.) von Bedeutung. Im Allgemeinen lassen sich zwei Ansätze unterscheiden – spezialisierte Prozesse für bestimmte Einsatzstoffe sowie eher universell ausgerichtete Technologien für sehr unterschiedliche Materialien. Dabei ist zu beachten, dass sich die Wirtschaftlichkeit einer bestimmten Prozesskette (wie beispielsweise der Extraktion von Cobalt aus Lithium-Ionen-Akkus oder von Seltenen Erden aus Leuchtstoffen) innerhalb kurzer Zeit aufgrund geänderter Rahmenbedingungen (neue Recyclingtechnologien, Preisänderungen, massive Steigerung des Abfallaufkommens, etc.) drastisch ändern kann, die Verfahrens- und Prozessentwicklung jedoch zumindest einige Jahre in Anspruch nimmt. Aus diesem Grund sollte letztere nicht ausschließlich nur dann erfolgen, wenn eine wirtschaftliche Realisierung möglich erscheint, sondern vor allem im Bereich der kritischen Rohstoffe auch entsprechend vorausschauend, um im Bedarfsfall zumindest die geeigneten Technologien griffbereit vorliegen zu haben. Nachfolgend erfolgt in den jeweiligen Unterkapiteln die Beschreibung der Sekundärmetallurgie einzelner, ausgewählter Metalle.

## 11.1 Recycling von Wolfram

Als Sekundärrohstoffe für die Gewinnung von Wolfram haben vor allem die Bereiche Hartmetalle und W-Metall bzw. Walzprodukte und Schwermetalle (vgl. Abbildung 46) Bedeutung, während aus wolframhaltigen Stahlschrotten bevorzugt wiederum Stähle gewonnen werden und in den Wolframchemikalien die dissipative Verteilung in vielen Fällen für ein wirtschaftliches W-Recycling zu hoch ist. Weil die meisten Schrottarten (Tabelle 72) wesentlich höhere W-Gehalte als die gängigen Erze ( $< 1\% \text{ WO}_3$ ) aufweisen, erfolgt das Wolframrecycling schon seit längerer Zeit aus wirtschaftlichen Gründen, wobei hier vor allem auch die Produktionsabfälle Berücksichtigung finden (Abbildung 83).

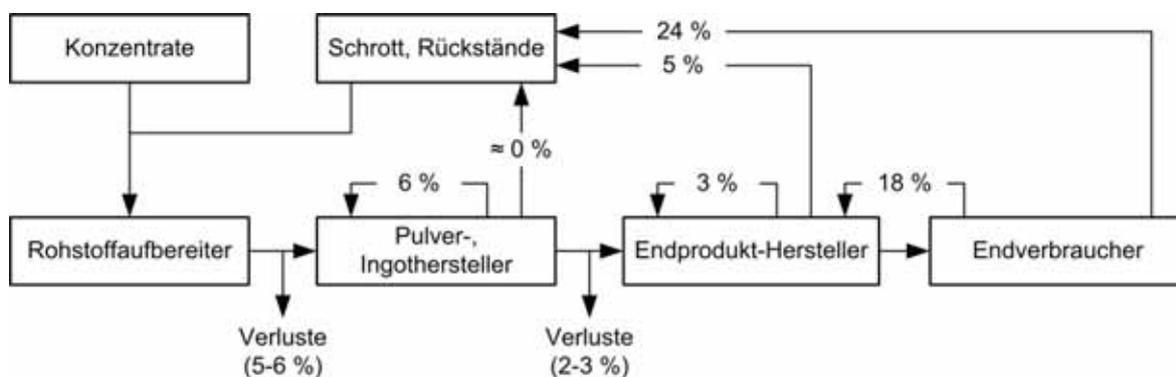


Abbildung 83: Materialflüsse bei der Herstellung von Wolfram-Produkten [Gille und Meier 2012]

Für die Aufarbeitung der Schrotte, welche grundsätzlich in Hart- (stückiges Material) und Weichschrotte (feine Partikel, Pulver, Staub, Schlämme, Späne und Grünlinge) unterteilt werden, stehen zahlreiche verschiedene Verfahren zur Verfügung, welche grob in vier Gruppen unterteilbar sind:

- Schmelzmetallurgie
- Direktes Recycling von Wolfram
- Semidirektes Recycling von Wolfram
- Indirektes Recycling von Wolfram

Die Schmelzmetallurgie weist den Vorteil auf, dass die oxidischen Bestandteile des Schrotts verschlacken, während sich die löslichen Verunreinigungselemente in der Metallschmelze verteilen. Jedoch steht das gesamte hier eingesetzte Wolfram anschließend nicht mehr für das Recycling durch andere Verfahren zur Verfügung und ist daher für den Wolframkreislauf verloren. Beim direkten Recycling [Angerer et al. 2011a] wird das im Lieferzustand eingesetzte Material durch physikalische oder chemische Methoden (z.B. Zink- oder Coldstream-Prozess für Hartmetalle bzw. Oxidation und Reduktion von Wolfram-Weichschrott) in Pulver

umgewandelt, ohne dass eine Abtrennung von Verunreinigungen etc. erfolgt. Als Voraussetzungen ergeben sich daher, dass die Zusammensetzung des Schrotts mit dem gewünschten Endprodukt übereinstimmen muss, hohe Schrottqualitäten erforderlich sind und während der Verarbeitung keine Kontaminationen eingeschleppt werden dürfen.

Tabelle 72: Typische wolframhaltige Schrotte und ihr Einsatzmöglichkeiten in der Schmelzmetallurgie  
[Lassner und Schubert 1999]

Nr.	Schrottart	W-Gehalt [Gew.-%]		Produkt	Bevorzugte Schrottarten
1	Hochreines W	≥ 99	Hartschrott	Superlegierungen	1
2	Oxidpartikelverstärkte W-Legierungen (ZrO <sub>2</sub> , CeO <sub>2</sub> , La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	96–98		Stellite	1, 3, 6, 9
3	Hartmetallstücke (enthalten auch Co und Ta)	60–97		Eutektisches Schmelzkarbid	1, 6
4	Schwermetall-Wolframlegierungen	92–94		Menstruum WC	4, 6, 9, 11, 12
5	Wolfram-Kupfer	60–90		Werkzeugstahl	1, 2, 4, 7, 11, 12
6	Reine W-Pulver	98–100		Ferrowolfram	1, 2, 4, 6, 7, 11, 12
7	W-Schleifschlämme	30–60	Weichschrott	Schmelzzusatz	1–4, 6–12
8	W-Schneidrückstände	70–80			
9	Hartmetallpulver	60–95			
10	Hartmetall-Schleifschlamm	15–60			
11	Schwermetallpulver	92–97			
12	Schwermetallspäne	92–97			
13	W-Cu-Pulver und Grünlinge	50–90			
14	Kehrricht (aus verschiedenen Quellen)	40–60			

Die semidirekten Methoden lassen sich anwenden, wenn zumindest zwei unterschiedliche Phasen vorliegen, von denen eine chemisch gelöst wird während die andere(n) beständig sind. Im Bereich der Hartmetalle befassten sich die jeweiligen Untersuchungen [Angerer et al. 2011a] ausschließlich mit der Auflösung der metallischen Matrix, sodass die Hartphase für den direkten Wiedereinsatz in der Hartmetallherstellung erhalten bleibt. Beim indirekten Recycling von Wolfram findet eine Umarbeitung der Reststoffe durch hydrometallurgische Verfahren statt, um letztendlich neues Ammoniumparawolfram (APT) als Ausgangsmaterial für die Herstellung der zahlreichen W-haltigen Produkte zu erhalten. Nachdem dafür teure und energieaufwändige Prozesse notwendig sind, sollten hier nur jene verunreinigten Schrotte als Einsatzstoff Verwendung finden, für welche sich die anderen Methoden nicht eignen. Für die Hartmetallschrotte zeigten zahlreiche Untersuchungen [Angerer et al. 2011b], dass nicht nur die Primärgewinnungsrouten nach einer entsprechenden Oxidation des

Materials in Frage kommt (vgl. Abbildung 36), sondern grundsätzlich auch einige weitere Möglichkeiten bestehen. [Luidold, 2012]

## 11.2 Sekundärmetallurgie von Niob und Tantal

In Bezug auf Niob erfolgt ein Recycling praktisch ausschließlich durch die Wiederverwendung von Nb-haltigen Stählen und Superlegierungen, während die Verwertung von Schrotten und sonstigen Reststoffen unter Rückgewinnung von Niob bisher vernachlässigbar erscheint. Während diesbezügliche Mengenangaben nicht verfügbar sind, könnten auf diesem Wege rund 20 % des offensichtlichen Verbrauchs abgedeckt werden. [USGS 2012]

Im Gegensatz hierzu lässt sich doch ein erheblicher Anteil an Tantal aus den jeweiligen Schrottfractionen zurückgewinnen, wobei vor allem die bei der Herstellung von Ta-haltigen elektronischen Komponenten anfallenden Neuschrotte sowie Hartmetalle und Superlegierungsschrotte Bedeutung aufweisen. Die jeweiligen Stoffflüsse stellen sich laut Gille und Meier (2012) entsprechend Abbildung 84 dar, wobei auffällt, dass relativ große Mengen an internen Materialkreisläufen bei den Herstellern in den einzelnen Fertigungsstufen auftreten und nur geringe Anteile des Tantals tatsächlich in den einzelnen Produkten zum Endverbraucher gelangen.

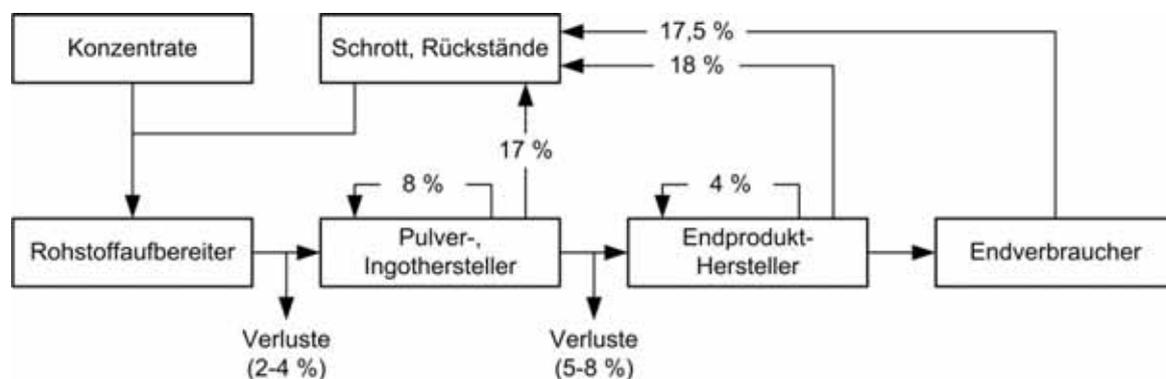


Abbildung 84: Interne und externe Stoffflüsse an Tantal [Gille und Meier 2012]

Wie bereits vorhin beschrieben (vgl. Abbildung 47), fanden im Jahr 2011 etwa 42 % des globalen Tantalbedarfs Verwendung in Feststoff-Elektrolytkondensatoren. Während diese Bauteile für die unterschiedlichsten elektronischen Geräte typischerweise zwischen etwa 24 und 43 Gew.-% Ta enthalten, liegt dieser kritische Rohstoff in den Endprodukten nur noch in geringsten Konzentrationen (157 ppm in einem durchschnittlichen Handy) vor, weshalb dessen Recycling aus derartigen Fraktionen nicht wirtschaftlich erscheint und darüber hinaus Tantal aus prozesstechnischen Gründen in den derzeit genutzten Prozessen zur Rückgewinnung der ökonomisch viel interessanteren Edelmetalle nicht herstellbar ist. Ein großer Anteil dieser Kondensatoren erfüllt jedoch nicht die erforderlichen Spezifikationen und fällt

daher aus der Fertigung als wiederzuverwertender Ausschuss an. Nachdem jedoch bisher keine effektive Methode zu deren Recycling existiert, gelangen diese oftmals in die erste Stufe des Gewinnungsverfahrens für Tantal und durchlaufen nach einer geeigneten Vorbehandlung (Röstung) somit gemeinsam mit dem Konzentrat aus dem Bergbau die gesamte, sehr aufwändige Prozessroute (vgl. Abbildung 38). Grundsätzlich wäre eine Rückgewinnung von Tantal aus Elektronikaltgeräten (WEEE) erstrebenswert, um die Recyclingrate für dieses Element (Abbildung 80) zu erhöhen, da dieser Einsatzbereich das größte Anwendungsgebiet für dieses Metall darstellt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der durchschnittliche Ta-Gehalt zumeist unter 200 ppm liegt und derzeit die entsprechenden Schrotte in eine der pyrometallurgischen Prozessstufen der Cu-Gewinnung gelangen, um vor allem die Edelmetalle zu extrahieren, welche aktuell die größte ökonomische Triebkraft für das Recycling darstellen. Die dabei ablaufende, weitere Verdünnung und Verschlackung des Tantals schließt jedoch eine Extraktion und Gewinnung über diese Route völlig aus, weshalb dazu komplett neue Ansätze und Prozesse anzudenken und auszuarbeiten sind. [Luidold 2012]

Darüber hinaus ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass sich Niob und Tantal auch aus den Schlacken der Zinnmetallurgie gewinnen lassen, welche für gewöhnlich bis zu jeweils 4 % Nb bzw. Ta enthalten. Für diese gibt es je nach Wertmetallgehalt und zur Verfügung stehender Infrastruktur grundsätzlich einige unterschiedliche Verwertungsrouten (Abbildung 85), um daraus die beiden Metalle als reine Verbindungen oder zumindest als Konzentrat zu erhalten.

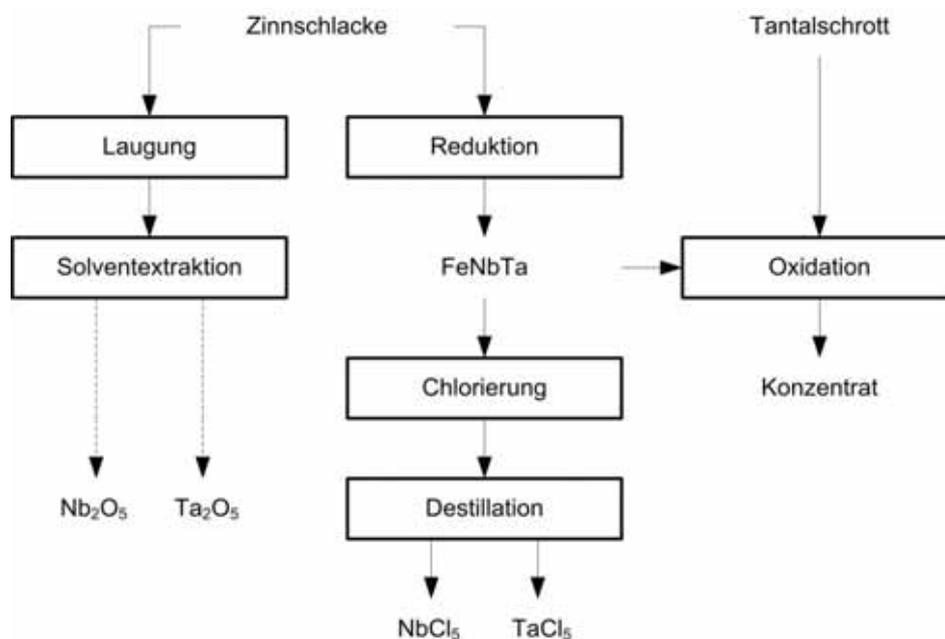


Abbildung 85: Aufbereitung von Nb/Ta-Sekundärrohstoffen

Beispielsweise lassen sich die Sn-Schlacken mit Kohlenstoff vermischen und in einem Dreiphasen-Lichtbogenofen zu einer kohlenstoffreichen Ferrolegierung mit rund 10–20 % Ta

sowie 10–20 % Nb reduzieren. Durch deren Röstung oder mittels Zugabe von  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  erfolgt unter kontrolliert reduzierenden Bedingungen eine Trennung einer Ta/Nb-haltigen Schlacke von Zinn, Wolfram und Phosphor, welche bei diesen Bedingungen Legierungen bilden. Das somit erhaltene Konzentrat mit typischerweise 50–60 % Tantal- und Nioboxid kann anschließend als sekundärer Rohstoff in die Primärmetallurgie der beiden Metalle eingeschleust werden. [Gille et al. 2006]

### 11.3 Recycling von Seltenen Erden

Während das Recycling von Seltenen Erden bisher kaum existent war (vgl. Abbildung 80) und sich darüber hinaus hauptsächlich auf Produktionsabfälle konzentrierte, führte der rasante Preisanstieg in den Jahren 2010 und 2011 (Abbildung 86) zu zahlreichen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in diesem Bereich. [Luidold et al. 2013]

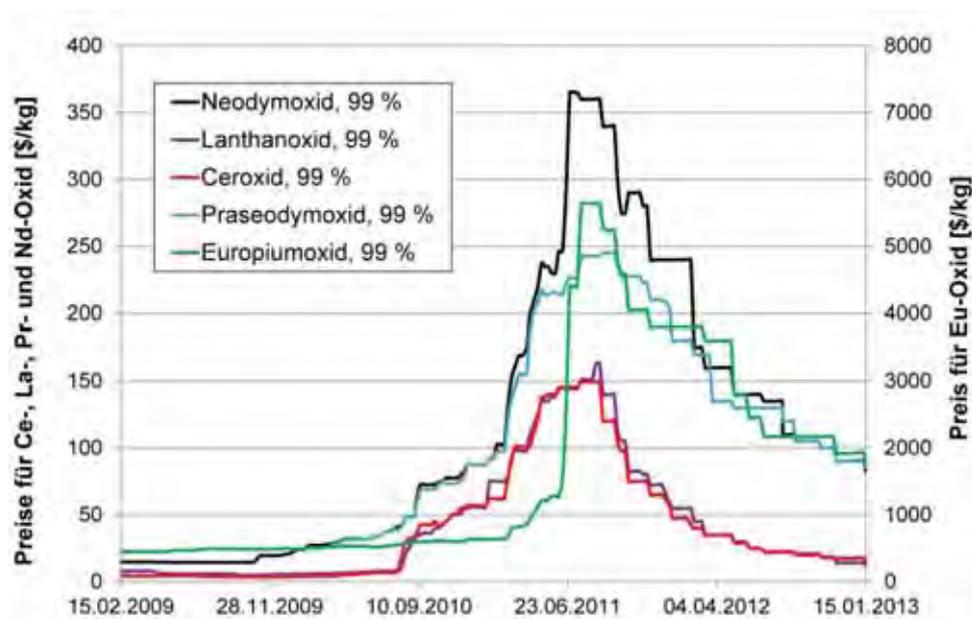


Abbildung 86: Preisentwicklung einiger SE-Oxide in den letzten Jahren [Luidold et al. 2013]

So dienten in der Vergangenheit gebrauchte Nickelmetallhydrid-Batterien industriell zur Rückgewinnung von Nickel als Reinmetall oder Ferrolegierung, während die Seltenen Erden lange Zeit nicht berücksichtigt wurden. Als Stand der Technik (BAT, best available technology) gilt derzeit der Prozess von Umicore, beim dem zuerst ein Einschmelzen der Akkus in einem Ofen zu einer metallhaltigen Schmelze (Fe, Ni, Cu und Co) und einer flüssigen SE-haltigen Schlacke erfolgt. Anschließend trennt eine hydrometallurgische Behandlung die einzelnen Elemente der Legierung voneinander, während die Schlacke als Zuschlagstoff für Beton Verwendung findet oder über nasschemische Prozesse die Elemente der Seltenen Erden extrahiert werden. Somit bedürfen bei diesem Verfahren beide aus dem

Schmelzaggregat erhaltene Fraktionen (Schlacke und Legierung) einer weiteren Verarbeitung durch hydrometallurgische Methoden, um die Wertmetalle daraus zu erhalten. Daher beschäftigt sich der Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie mit der Ausarbeitung eines rein hydrometallurgischen Konzepts, mit dem sich nach den bisherigen Ergebnissen aus diesen wiederaufladbaren Batterien ein SE-Konzentrat als Doppelsulfat,  $(\text{Na, K})\text{SE}(\text{SO}_4)_2$ , mit sehr geringen Verunreinigungsgehalten gewinnen lässt. [Luidold 2012]

Neben den Nickelmetallhydrid-Batterien stellen die Leuchtstäube aus den unterschiedlichen Gasentladungslampen eine weitere potenzielle Sekundärrohstoffquelle für die SE-Elemente dar. Für deren Nutzung erweist es sich als sehr vorteilhaft, dass für diese bereits seit Jahren eine gesetzliche Vorschrift zur gesonderten Sammlung und Behandlung besteht, bei welcher einerseits die sortenreine Rückgewinnung von Stoffen im Vordergrund steht und andererseits jedoch auch der Schadstoffentfrachtung, vor allem aufgrund des vorhandenen Quecksilbergehalts, Bedeutung zukommt. Aus den Aufbereitungsanlagen resultieren Glas, Aluminium, Leucht- und Kunststoffe sowie Metalle als Fraktionen, welche sich einer weiteren Verwertung zuführen lassen. [OSRAM]

Nachdem jedoch die Feinfraktion, in welcher sich die Leuchtstoffe ansammeln, eine extrem komplexe Mischung darstellt und darüber hinaus neben dem toxischen Quecksilber eine große Anzahl an unterschiedlichen Elementen enthält, stellen sich enorme Herausforderungen an einen möglichen Recyclingprozess zur Rückgewinnung der Seltenen Erden aus dieser Reststofffraktion. Laut einer Mitteilung vom 13.01.2011 verfügt dennoch die französische Firma Rhodia über ein geeignetes Verfahren und die notwendigen Anlagen zur Gewinnung dieser Elemente aus den gebrauchten Leuchtstoffen. Darüber hinaus befassen sich zahlreiche weitere Arbeiten im Labormaßstab mit dieser Thematik, welche unter anderem von Wojtalewicz-Kasprzak (2007) übersichtlich zusammengefasst wurden. Bezüglich der Verwertung von LEDs, welche in geringerem Ausmaß SE-haltige Leuchtstoffe enthalten, gibt es jedoch noch keine Veröffentlichungen beziehungsweise Angaben zu gesonderten Aufbereitungsverfahren. Somit ist bei diesen davon auszugehen, dass die aktuell noch geringen Anfallmengen als allgemeiner Elektronikschrott oder überhaupt mit dem Restmüll entsorgt werden, wodurch jedoch zahlreiche Wertmetalle verlorengehen. [Luidold und Schnideritsch 2012]

Bezüglich Seltene Erden beschäftigten sich Bast et al. (2012) mit dem Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrzeugantrieben, wobei aus den Untersuchungen eine Technologie zur Wiederverwertung von Hochleistungsmagnetwerkstoffen resultieren soll, wozu folgende Ansätze verfolgt wurden:

- Funktionelle Wiederverwendung (des Motors, von Teilen oder zumindest der einzelnen Magnete).

- Werkstoffliche Wiederverwertung der Magnetschrotte zur Herstellung neuer Magnete.
- Rohstoffliche Wiedergewinnung der SE-Metalle aus vorsortiertem und zerkleinertem Material.

Mit der werkstofflichen Verwertung setzten sich auch bereits Zakotnik et al. (2008) auseinander, deren Ergebnisse bestätigten, dass reine Magnetschrotte durch eine Wasserstoffbehandlung bei moderaten Temperaturen zu Pulver zerfallen oder gemahlen werden, aus welchem nachfolgend eine Vakuumbehandlung bei höheren Temperaturen den Wasserstoff entfernt, sodass wiederum Magnete aus dem zurückbleibenden Material herstellbar sind. Das Vorliegen entsprechender Verunreinigungsgehalte (Beschichtungen, Korrosion, etc.) erfordert jedoch oftmals eine weitergehende Behandlung, wobei neben anderen Methoden auch eine Chlorierung des Materials durch Umsetzung mit  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{FeCl}_2$  oder auch  $\text{MgCl}_2$  von unterschiedlichen Autoren untersucht wurde. Weil in den Magnetschrottfractionen, welche aus der Demontage von Elektrogeräten stammen, neben den SE-haltigen Permanentmagneten auch noch Kupferspulen und vor allem mit Gold beschichtete Kontakte vorliegen, zeigten Untersuchungen im Labormaßstab, dass sich durch geeignete Verfahrensabläufe grundsätzlich sowohl Kupfer und Gold als auch die Elemente der Seltenen Erden mit vertretbarem Aufwand gewinnen lassen, wobei für die Umsetzung im Pilot- oder Großmaßstab noch einige weitere Arbeiten notwendig sind. [Luidold 2012]

Im Gegensatz zu den vorhin erwähnten Abfall- bzw. Reststofffraktionen (NiMeH-Akkus, Leuchtstäube und Magnetschrotte) finden sich in der öffentlich zugänglichen Literatur jedoch bisher kaum Arbeiten zur Rückgewinnung von Seltenen Erden aus weiteren Fraktionen, wie beispielsweise optischen Gläsern bzw. Rückständen der Glasindustrie, Katalysatoren, etc. Zusammenfassend ist bezüglich des SE-Recyclings noch enormer Forschungs- und Entwicklungsaufwand erforderlich. Dies betrifft sowohl Untersuchungen im Labormaßstab, um die jeweiligen Technologien zu entwickeln, als auch die Umsetzung der im Kleinmaßstab erhaltenen Ergebnisse in die industrielle Praxis in Form von Pilot- bzw. Großanlagen. Nachdem alle bisherigen Recyclingverfahren nur die Gewinnung eines SE-Konzentrats aus den Reststoffen enthalten, sind darüber hinaus auch Prozesse zur Trennung der individuellen Elemente der Seltenen Erden im industriellen Maßstab zu realisieren, wozu es zumindest bereits zahlreiche Grundlagenuntersuchungen gibt.

## 11.4 Sekundärmetallurgie der Edelmetalle

Mit den modernen metallurgischen Verfahren lassen sich in den meisten Fällen sehr hohe Rückgewinnungsraten erzielen, nachdem die Technologien im Bereich der Edelmetalle über Jahrhunderte hinweg entwickelt wurden. Jedoch ist zu beachten, dass das Recycling von

Konsumgütern und zum Teil auch von Industrieprodukten mehr als nur einen metallurgischen Prozess benötigt und bei den vorgeschalteten Schritten (vgl. Abbildung 79) oftmals erhebliche Verluste auftreten. Diese erfolgen jedoch zumeist bereits bei eigenen Unternehmen und beinhalten beispielsweise die Entnahme von Leiterplatten aus Computern oder des Monolithen aus Autokatalysatoren, etc., bevor die eigentliche Edelmetallscheidung (Abbildung 87) mit den folgenden vier Hauptschritten ausgeführt wird [Hagelüken 2011]:

- Homogenisierung und Probenahme
- Metallurgische Voranreicherung
- Konzentrataufschluss
- Sukzessive Abtrennung der einzelnen Edelmetalle sowie deren Raffination

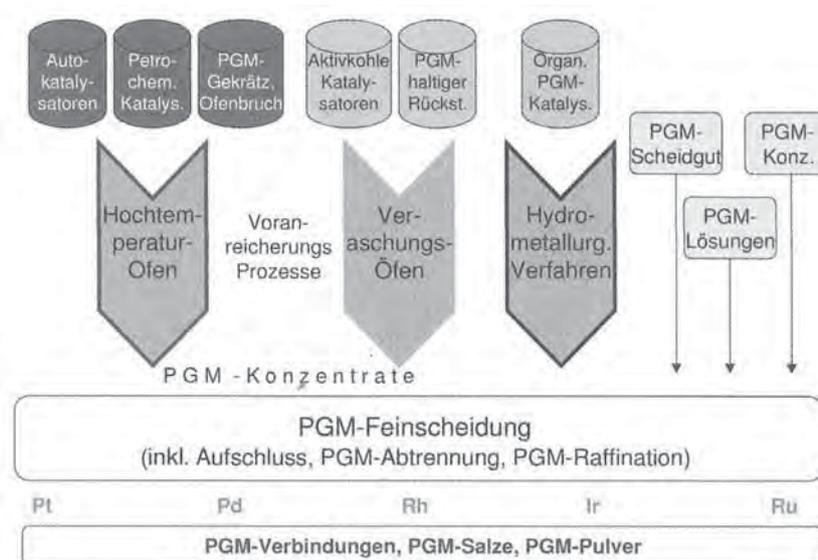


Abbildung 87: Prinzipieller Ablauf einer spezialisierten Sekundärscheidung [Brumby et al. 2006]

Dem ersten Schritt kommt besondere Bedeutung zu, weil die Analyse der aus dem Material entnommenen Probe einerseits die Grundlage für die Abrechnung mit dem Lieferanten bildet sowie andererseits Informationen für den optimalen Prozessablauf liefert und geringe Abweichungen aufgrund des hohen Wertes der Edel- bzw. Platingruppenmetalle bereits entsprechende wirtschaftliche Auswirkungen aufweisen. Sofern das Material nicht bereits ausreichend hohe Gehalte (ca. > 30 % Au + PGM) aufweist und sich somit direkt hydrometallurgisch aufschließen lässt, wird eine Voranreicherung benötigt. Diese kann durch Abbrennen oder hydrometallurgischem Aufschluss der Matrix, Schmelzanreicherung (Pyrometallurgie), oder selektivem Laugen der Edelmetalle erfolgen. Anschließend werden die Edelmetalle in den Konzentraten voneinander getrennt und zu hochreinen Metallen raffiniert, wobei bei den PGM-Konzentraten zuerst eine Abtrennung von Silber und Gold erfolgt, bevor

komplexe hydrometallurgische Verfahren (vgl. Abbildung 45) zur Isolierung und Raffination der einzelnen Elemente dienen. Die dabei entstehenden Seitenströme sind sorgfältig nachzubehandeln, um zur Gewährleistung hoher Edelmetallausbeuten die darin enthaltenen Spuren an Edelmetallen zurückzugewinnen. Die meisten Verwerter von edelmetallhaltigen Sekundärmaterialien spezialisierten sich in der Zwischenzeit auf bestimmte Segmente, für welche jeweils entsprechende Verfahrensrouten installiert wurden, ohne die gesamte Bandbreite an Schrotten und Reststoffen abzudecken. Daneben verarbeiten auch einige Kupferhütten (Abbildung 88) zusätzlich edelmetallhaltige Einsatzstoffe, wobei in der Regel die exotischeren Elemente der Platingruppenmetalle (Rhodium, Ruthenium und Iridium) verloren gehen, sofern nicht eine eigene Raffinationsstufe für Platin und Palladium existiert. [Hagelüken 2011]

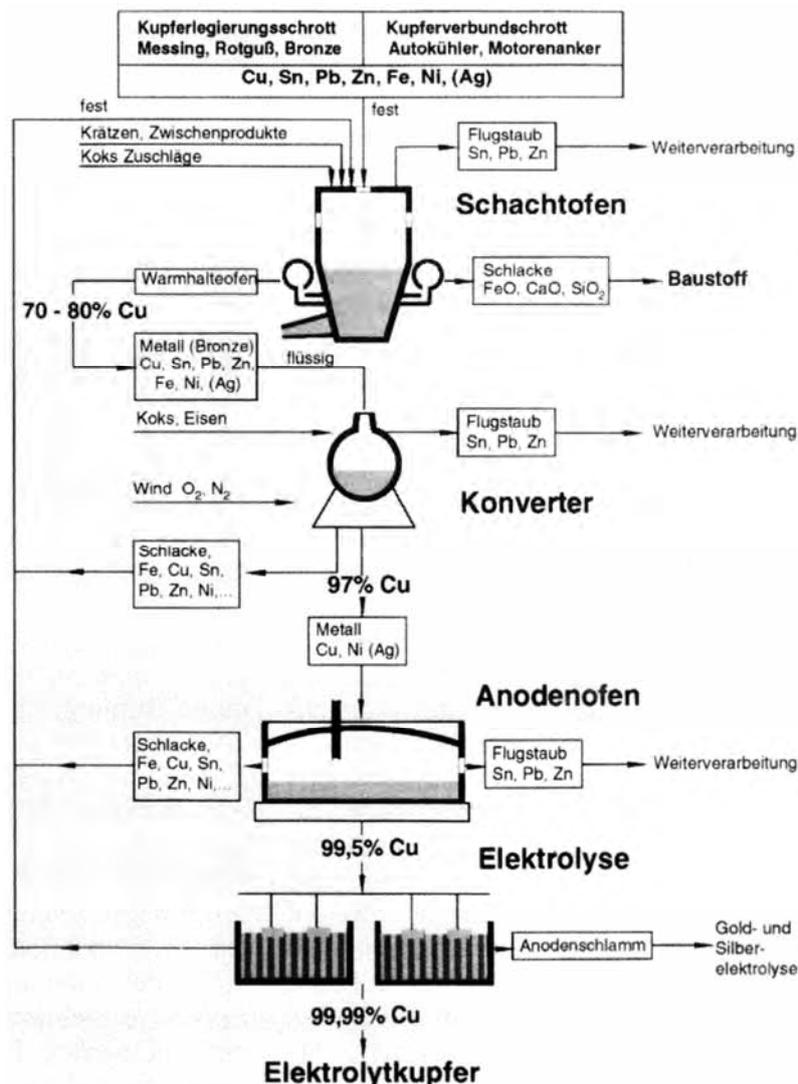


Abbildung 88: Klassische Kupfer-Recyclinghütte [Arpaci und Vendura 1993]

In modernen Anlagen integrierter Metallhütten und Scheidereien (Abbildung 89) werden viele Vorteile der spezialisierten Betriebe mit denen der universellen Ansätze kombiniert. Damit

lassen sich durch ein komplexes Fließbild, mittels innovativer Teilprozesse und einer Nachbehandlung der Primärschlacke und anderer Nebenprodukte sowie aufgrund des großen Materialdurchsatzes bei geringen spezifischen Produktionskosten eine relativ hohe Flexibilität und große Toleranzen gegenüber Verunreinigungen erzielen.

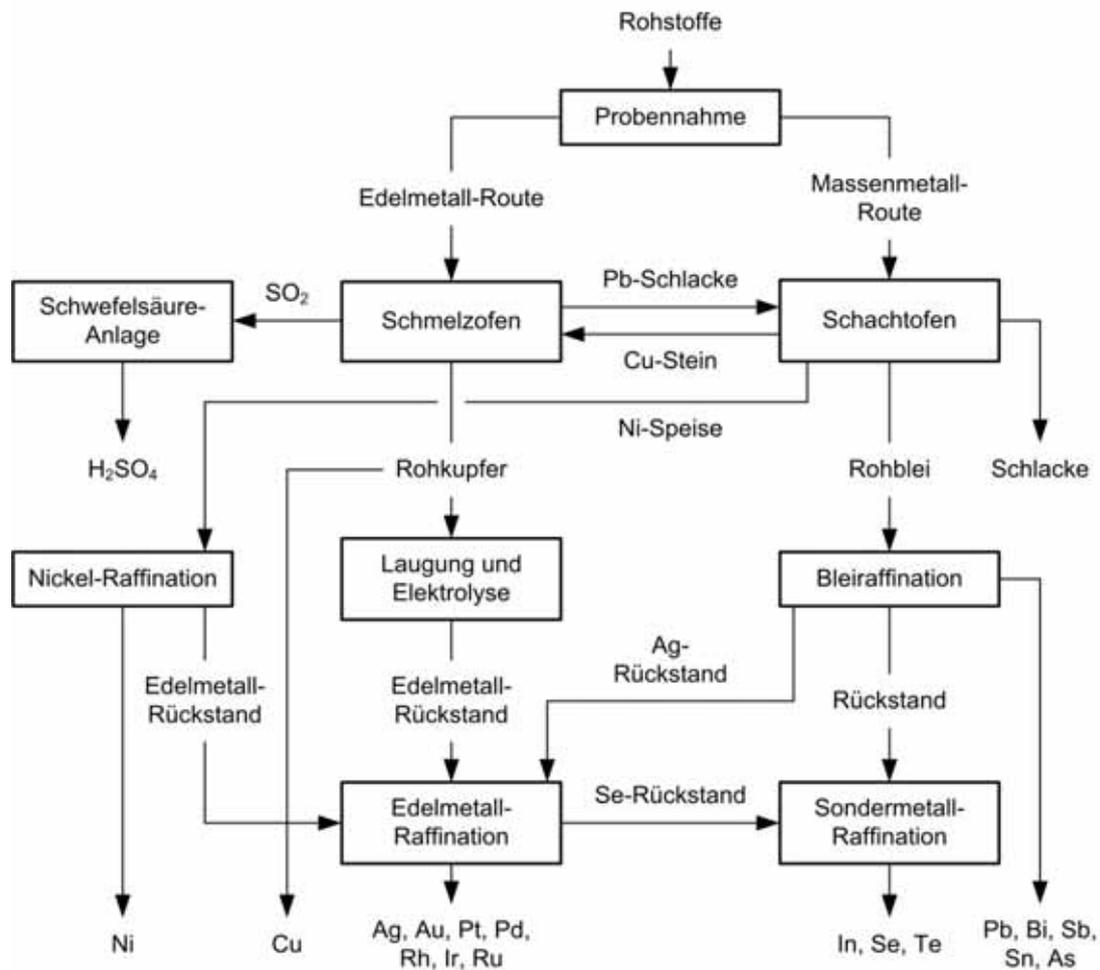


Abbildung 89: Grundsätzlicher Verfahrensablauf bei Umicore [Hagelüken 2011]

Dennoch bestehen beim Edelmetallrecycling nach wie vor Herausforderungen unterschiedlichen Ausmaßes. Große Schwierigkeiten ergeben sich beispielsweise aus Produkten mit Stoffkombinationen, welche nicht zu den etablierten Scheideverfahren passen. Zur Problematik, dass die Rückgewinnung eines wichtigen Metalls zu Verlusten anderer Elemente führt, zählen für gewöhnlich nicht die Kombinationen von Edelmetallen untereinander, sondern deren gemeinsames Vorliegen mit anderen wertvollen Sonder- oder Basismetallen. Darüber hinaus verursachen unterschiedliche gefährliche Substanzen (Quecksilber, Halogene, etc.) ebenso Beeinträchtigungen, denen in geeigneter Weise zu entgegnen ist. Aus diesem Grund sollte bei der Entwicklung neuer Produkte auch ihre Recyclingfähigkeit am Ende ihrer Lebensdauer Berücksichtigung finden. Aktuell bildet die gemeinsame Rückgewinnung der Edelmetalle mit Sondermetallen (z.B. Indium, Gallium, Tellur oder Seltene

Erden) eine entsprechende Aufgabenstellung, weil die effektiven Recyclinglösungen für derartige Produkte (LCD-Bildschirme und -Fernseher, etc.) hier erst mehr oder weniger am Anfang stehen. Eine weitere, kaum zu lösende Schwierigkeit liegt in der zum Teil dissipativen Nutzung von Edelmetallen, bei welchen die Konzentrationen so gering sind, dass eine Rückgewinnung auf absehbare Zeit völlig unwirtschaftlich bleibt. Dies betrifft beispielsweise die homogenen Platinkatalysatoren für die Silikonherstellung oder auch Zündkerzen, Lambda-Sonden, Platin- bzw. Rutheniumbeschichtungen von Festplattenscheiben sowie RFID-Chips und in funktionalen Textilien verwendetes Silber.

## 11.5 Literatur

- Angerer, T. et al., 2011: Technologien zum Recycling von Hartmetallschrotten (Teil 1). *World of Metallurgy – Erzmetall*, 64, 6–15.
- Angerer, T. et al., 2011: Technologien zum Recycling von Hartmetallschrotten (Teil 2). *World of Metallurgy – Erzmetall*, 64, 62–70.
- Arpaci, E. und T. Vendura, 1993: Recycling von Kupferwerkstoffen. In: *Metall*, 47, 340–345.
- Bast, U. et al., 2012: Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtrieben. *Recycling und Rohstoffe*, Band 5. Neuruppin, Deutschland: TK Verlag (2012) 699–706.
- Brumby, A. et al., 2006: Edelmetalle. In: *Chemische Technik – Prozesse und Produkte*, 6b – Metalle. Weinheim, Deutschland: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA.
- Gille, G. et al., 2006: Die Refraktärmetalle Niob, Tantal, Wolfram, Molybdän und Rhenium. In: *Chemische Technik: Prozesse und Produkte*, 6b. Weinheim, Deutschland: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Gille, G. und A. Meier, 2012: Recycling von Refraktärmetallen. In: *Recycling und Rohstoffe*, Band 5, Thome-Kozmiensky, K. J. und D. Goldmann (Hrsg.). Neuruppin, Deutschland: TK Verlag, 537–560.
- Graedel, T. E. et al., 2011: Recycling rates of metals – a status report. UNEP: A status report of the working group on the global metal flows to the International Resource Panel.
- Hagelüken, C., 2010: Wir brauchen eine globale Recyclingwirtschaft. Internet: [http://www.nachhaltigwirtschaften.at/nw\\_pdf/events/20101011\\_rohstoffversorgung\\_christian\\_hagelueken.pdf](http://www.nachhaltigwirtschaften.at/nw_pdf/events/20101011_rohstoffversorgung_christian_hagelueken.pdf) (Zugriff: 22.08.2012).
- Hagelüken, C., 2011: Edelmetallrecycling – Status und Entwicklungen. In: *Sondermetalle und Edelmetalle*, 121. Clausthal-Zellerfeld: GDMB, 163–178.
- Lassner, E. und W.-D. Schubert, 1999: *Tungsten: Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds*. New York: Kluwer Academic / Plenum Publishers.

- Luidold, S., 2012: Verfahrenstechnik bei der Primärmetallurgie und dem Recycling von Technologiemetallen. Habilitationsschrift, Lehrstuhl für Nichteisenmetallurgie, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich.
- Luidold, S. und H. Schnideritsch, 2012: Möglichkeiten des Recyclings von LEDs im Vergleich zu anderen Beleuchtungskörpern. In: Energieeffizienz in der Metallurgie, 129. Clausthal-Zellerfeld: GDMB, 41–54.
- Luidold, S. et al., 2013: Recycling von Seltenen Erden aus Sekundärrohstoffen. In: Recycling und Rohstoffe, Band 6, Neuruppin, Deutschland: TK Verlag, 533–544.
- OSRAM: Kapp-Trenn-Verfahren. Internet: Kapp-Trenn-Verfahren. Internet: [http://www.osram.at/osram\\_at/Ueber\\_uns/Gesellschaft\\_und\\_Umwelt\\_-\\_Global\\_Care/Umweltbewusstes\\_Entsorgen/Kapp\\_Trenn\\_Verfahren/index.html#](http://www.osram.at/osram_at/Ueber_uns/Gesellschaft_und_Umwelt_-_Global_Care/Umweltbewusstes_Entsorgen/Kapp_Trenn_Verfahren/index.html#) (Zugriff: 6.5.2012).
- Pawlek, F., 1982: Metallhüttenkunde. Berlin, Deutschland: Walter de Gruyter.
- UNEP: Metal recycling – opportunities, limits, infrastructure (in Druck).
- USGS, 2012: Mineral Commodities Summaries – Niobium. Internet: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/niobium/mcs-2012-niobi.pdf> (Zugriff: 25.08.2012).
- Wojtalewicz-Kasprzak, A., 2007: Erzeugung von synthetischen Selten-Erd-Konzentraten aus Leuchtstoffabfällen. Dissertation, Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften, TU Clausthal, Clausthal, Deutschland.
- Zakotnik, M. et al., 2008: Possible methods of recycling NdFeB-type sintered magnets using the HD/degassing process. In: Journal of Alloys and Compounds, 450, 525–531.

## 12. Handlungsbedarf und -empfehlungen

Aus den in den vorhergehenden Kapiteln im Detail beschriebenen Ergebnissen der Studie lassen sich die folgenden Maßnahmen zur Verbesserung der Verfügbarkeit der für die österreichische Industrie besonders kritischen Rohstoffe ableiten.

### 12.1 Empfehlungen hinsichtlich Forschung und Entwicklung:

- Geowissenschaftliche Untersuchungen zur eindeutigen Bewertung der derzeit als „bedingt sicherungswürdig“ eingestuft Rohstoffvorkommen
- Entwicklung verbesserter Explorationsverfahren
- Entwicklung und Optimierung von Aufbereitungsverfahren für Sekundärrohstoffe, wie beispielsweise sensorgestützte Verfahren für Fraktionen aus gebrauchten Konsumgütern
- Erweiterung der thermodynamischen Datenbanken (SE- bzw. refraktärmetallhaltige Schlackenphasen, etc.)
- Grundlagenuntersuchungen zu den neuartigen Stoffsystemen, welche im Produktlebenszyklus der kritischen Rohstoffe auftreten
- Entwicklung von metallurgischen Prozessen und Technologien, welche flexibel mit komplexen Reststoffen schwankender Zusammensetzung arbeiten können
- Entwicklung von Prozessketten, welche die Gewinnung einer möglichst hohen Anzahl an Rohstoffen aus Primär- und Sekundärquellen ermöglichen
- Entwicklung von Recyclingtechnologien für bisher nicht nutzbare primäre bzw. sekundäre Rohstoffquellen
- Optimierung der bestehenden Recyclingtechnologien zur Anhebung der Ausbeuten an kritischen Rohstoffen
- Aufbau eines Recyclingkompetenzzentrums
- Erstellung von dynamischen Stoffflussanalysen
- Detailuntersuchung der Abfallwirtschaftssysteme hinsichtlich Hochtechnologierohstoffe (Erarbeitung einer Sekundärrohstofflandkarte für Österreich)
- Ausarbeitung standardisierter Materialbilanzen
- Verstärkung der Ausbildung hinsichtlich Recycling entlang der gesamten Wertschöpfungskette

- Optimierung von Sammelsystemen für Elektroaltgeräte, insbesondere durch Pilotprojekte
- Entwicklung und Optimierung von Methoden zur Identifizierung und zum Screening von kritischen Rohstoffen in Abfällen

## 12.2 Weitere Empfehlungen:

- Aufrechterhaltung und Ausbau der Primärgewinnung
- Verstärkte Prospektion und Exploration für kritische Rohstoffe mit hohem (Wolfram, Grafit, ...) oder unsicherem (Niob/Tantal, ...) Geopotenzial
- Erhöhung der Ressourceneffizienz
- Bewertung der geologischen Lagerstätten hinsichtlich bisher für den Betreiber nicht relevanter Nebenprodukte
- Standortspezifische Modellrechnungen, ab welchem Rohstoffpreis eine Förderung aus sicherungswürdigen Vorkommen wirtschaftlich ist
- Ausbau der metallurgischen Infrastruktur im Bereich der Technologiemetalle
- Stärkere Vernetzung der einzelnen Akteure entlang der Wertschöpfungskette (Informationsweitergabe, etc.)
- Intensivierung der Sammlung durch Förderung der haushaltsnahen Sammlung, stärkere Erfassung beim Handel und/oder Nutzung der Problemstoffsammlung für Elektrokleingeräte
- Getrennte Sammlung bestimmter Produktgruppen (Permanentmagnete, etc.)
- Unterbindung des Exports bestimmter Abfallfraktionen (Alt-KFZ, etc.)
- Verbesserung der Datenlage hinsichtlich Stoffflussanalysen
- Schließung des Recyclingkreislaufs
- Klärung der Besitzfrage von Abfall und anderen Rechtsunsicherheiten
- Vermehrte Einführung von Leasing- oder Pfandsystemen
- Aufbau von Materialdatensystemen, welche auch für Klein- und Mittelunternehmen einsetz- und verwendbar sind
- Formulierung von Ressourcenzielen
- Schaffung von Anreizsystemen für Forschung und Entwicklung im Bereich der Industrie
- Bewusstseinsbildung, Information und Beratung der betreffenden Personengruppen (Konsumenten, etc.)
- Verstärkung der innerbetrieblichen Kreislaufführung und Verbesserung des Recyclings

- Formulierung von qualitativen neben quantitativen Recyclingzielen in der Gesetzgebung
- Einhebung von ökosozialen Lenkungssteuern
- Verstärktes „Design for Recycling“ durchsetzen

# Anhang

Nachstehend erfolgt noch in einem ersten Kapitel eine detaillierte Beschreibung der allgemeinen Lagerstättentypen von ausgewählten kritischen Rohstoffen (Antimon, Germanium, Grafit, Niob und Tantal, Platingruppenmetalle, Elemente der Seltenen Erden, Vanadium sowie Wolfram). Der zweite Abschnitt befasst sich mit den Details (erhobene Daten, Schätzungen, Herleitungen, etc.) zu den erstellten Stoffflussanalysen für Neodym, Niob als auch Palladium, um die Nachvollziehbarkeit deren Ergebnisse zu ermöglichen.

# 1. Allgemeine Lagerstättentypen der ausgewählten kritischen Rohstoffe

In den nachfolgenden Kapiteln erfolgt eine allgemeine Beschreibung der üblichen Typen an Lagerstätten für Antimon, Germanium, Grafit, Niob und Tantal, Platingruppenelemente, Metalle der Seltenen Erden, Vanadium und Wolfram.

## 1.1 Antimon

Die wichtigsten Lagerstättentypen sind hydrothermal in den oberen Bereichen der Erdkruste (epizonal) entstanden. Daher treten Antimon-Lagerstätten bevorzugt in eher jungen, noch nicht erodierten Orogenen auf. Genetisch lassen sich diese in magmatische, strukturgebundene und sedimentäre Lagerstätten einteilen [Dill 2010].

Zur ersten Gruppe gehören Verdrängungs-, Skarn- und Ganglagerstätten, die proximal bis distal am Kontakt von subvulkanischen Intrusionskörpern auftreten (z.B. Serbien, Thailand, Malaysia), sowie Gold-Lagerstätten des Carlin-Typs, in denen Antimon neben Arsen und Quecksilber als Begleiter von fein disseminiertem Gold und Silber in Sedimenten vorkommt. Ein weiterer Vertreter sind epithermale Lagerstätten des High- und Low-sulfidation-Typs (z.B. Südostasien und Bolivien). Zu dieser Gruppe können auch Sb-(Au-Hg)-Lagerstätten, die in Geothermalfeldern auftreten (z.B. Italien, Griechenland), gerechnet werden.

Die strukturgebundene Gruppe umfasst im Wesentlichen reine Antimon- und polymetallische Antimon-(Gold)-Lagerstätten, die beide an syntektonische Scherzonen und damit assoziierte Strukturen gebunden sind. Während erstere in nicht bis sehr schwach metamorphen Gesteinsabfolgen auftreten und sich unter epithermalen Bedingungen ( $< 200\text{ °C}$ ) gebildet haben, sind letztere meist in etwas höher metamorphen Gesteinen anzutreffen (z.B. Rheinisches Schiefergebirge, Deutschland; Nordostportugal) [Wagner und Cook 2000, Neiva et al. 2008]. Diese polymetallischen Sb-(Au-W-Sn-As-Pb)-Vererzungen sind mesothermalen (Bildungstemperaturen ca.  $200\text{--}400\text{ °C}$ ) Ursprungs. Ihre Entstehung steht in Zusammenhang mit der Migration von Fluiden entlang von regionalen Scherzonen, die sich während der späten Orogenese, oft im Zuge der Umstellung von Kompressions- auf Extensionstektonik, in der oberen Kruste formten. Ein erhöhter regionaler Wärmefluss in der Erdkruste liefert die notwendige Wärmequelle. Als Quelle von Antimon und den begleitenden Elementen werden Krustengesteine diskutiert, für den Transport kommen metamorphe Fluide, zum Teil unter Beteiligung meteorischer oder magmatischer Wässer, in Frage [Neiva et al. 2008]. Ein ähnliches geotektonisches Szenario mit Extension wurde für die Bildung der Sb-, Sb-Au- und Au-Lagerstätten in Süd-Tibet vorgeschlagen, wobei aber dort die Lagerstätten zoniert in

thermischen Domstrukturen auftreten, die um syntektonische Leukogranit-Intrusionen entwickelt sind [Yang et al. 2009].

Zur Gruppe der strukturgebundenen Antimon-Lagerstätten sind auch jene im archaischen Murchison Grüngesteinsgürtel in Südafrika zu zählen, in dem die größten Sb-Vorkommen außerhalb Chinas zu finden sind. Diese liegen entlang einer ca. 50 km langen, zwischen ultramafischen/mafischen und felsischen Vulkaniten entwickelten tektonischen Strukturzone („Antimony Line“), in durch hydrothermale Alteration entstandenen Talk-, Talk-Karbonat-Schiefern und Karbonat-Chert-Gesteinen [Pearson und Viljoen 1986]. Als Beiprodukt von Antimon wird Gold gewonnen.

Die weltweit größte Antimon-Lagerstätte in Xikuashan, China, liegt in einer Abfolge von schwach metamorphen oberdevonischen Schwarzschiefern, Mergeln und Kalken, die auf einer flach marinen Plattform abgelagert wurden und nun in einer Antiklinalstruktur aufgeschlossen sind. Die Lagerstätte erstreckt sich über ca. 16 km<sup>2</sup>. Zwei bis 5 m mächtige und über 500 m lange stratiforme Erzkörper, die mit grauen Cherts wechsellagern, befinden sich in Abbau. Die stockwerkartigen Vererzungen mit Stibnit, Baryt und Fluorit erstrecken sich bis 200 m ins Liegende der schichtigen Erzkörper [Fan et al. 2004].

## 1.2 Germanium

Die heute wirtschaftlich wichtigsten Germaniumquellen sind niedrigtemperierte Sulfidlagerstätten (z.B. Red Dog, USA). Zukünftig ist Germanium auch verstärkt aus Kohle und Lignit zu gewinnen, um die steigende Nachfrage am Weltmarkt bedienen zu können. Zu den Vertretern sulfidischer Ge-Erzkörper werden VHMS-Lagerstätten (volcanic-hosted massive sulfide) gezählt, aus denen sich abhängig von der Zusammensetzung Zink, Blei, Kupfer, Gold oder Silber gewinnen lassen (z.B. Ural, Russland). Trotz der moderaten Konzentrationen von bis zu 100 ppm Ge sind diese aufgrund der großen Abbaumengen eine wirtschaftlich sehr bedeutende Quelle für Germanium, aber auch anderer Begleitelemente wie Indium, Cadmium oder Gallium. Porphyrische Cu-Mo-Au-Lagerstätten (z.B. Catamarca, Argentinien), polymetallische Sn-Ag- (z.B. Potosi, Bolivien), sowie gang- und stockwerkartige Ag-Pb-Zn-Lagerstätten (z.B. Freiberg, Deutschland) stellen ebenfalls bedeutende Ge-Quellen dar. Germaniumträger sind hierbei meist Bornit, Chalkopyrit, Sphalerit aber auch Akzessorien wie Argyrodit.

Ein großer Teil der derzeitigen Ge-Produktion stammt aus SHMS-Lagerstätten (sediment-hosted massive sulfide). Aus der Vererzung Red Dog wird etwa Germanium zusammen mit Blei und Zink aus schichtgebundenen Zn-Pb-Baryt-Erzen gewonnen. Die meisten SHMS-Lagerstätten enthalten nur geringe bis moderate Germaniumkonzentrationen, sind aber aufgrund der Produktionsmengen und Reserven ein ökonomisch interessanter Typ.

Eisenarme Sphalerite aus niedrigthermalen (< 300 °C) karbonatgebundenen Pb-Zn(-Ag)-Lagerstätten stellen einen weiteren wichtigen Typus dar. Nach Höll et al. (2007) werden, basierend auf geochemischen Kriterien der Vererzungen und der Zusammensetzung der Fluide, der „Mississippi Valley Type“ (MVT), der „Irish Type“ (IRT), der „Alpine Type“ (APT) und der „Kipushi Type“ (KPT) unterschieden. Hauptträger von Germanium in den karbonatgebundenen Pb-Zn-Lagerstätten sind die Zinksulfide Sphalerit und Wurtzit.

Der biophile Charakter von Germanium macht Kohle- und Lignitvorkommen zu einer weiteren wirtschaftlich interessanten Quelle. Zudem wird der Großteil der weltweiten Ge-Reserven in organischem Material vermutet (vor allem Russland und China). Bereits heute stammen 30 % der primären Germaniumproduktion aus dem Abbau von Kohle und Lignit in Russland, China und Usbekistan [Bleiwas 2010]. Somit sind in weiterer Folge auch Filter- und Feinstflugaschen aus Kohlekraftwerken eine potenzielle Ge-Quelle der Zukunft.

### 1.3 Grafit

Die größten bauwürdigen Grafit-Lagerstätten finden sich in regional- oder kontaktmetamorphen Gesteinen, in denen der für die Grafitbildung notwendige Kohlenstoff aus sedimentären organischen Substanzen wie Kohlen, Kerogen oder Kohlenwasserstoffen mobilisiert wird. Die Bildungsbedingungen von metamorphem Grafit liegen meist in der Grünschieferfazies, können aber auch bis in die Amphibolit- bis Granulitfazies reichen, wobei die Kristallinität mit steigendem Metamorphosegrad zunimmt. Neben Druck und Temperatur spielen noch weitere Faktoren wie die Art des organischen Ausgangsmaterials, Fluidzusammensetzung oder Reaktionszeit für die Bildung von Grafit eine entscheidende Rolle [Pohl 2011]. Grafit-Vererzungen treten häufig in metamorphen Kalksilikaten, Marmoren, aluminiumreichen Paragneisen und Metapeliten auf [Dill 2010]. Eine weitere wichtige Lagerstättenart sind epithermale Grafit-Lagerstätten in Form von Gang- oder Imprägnationsvererzungen in Bereichen von Scherzonen mit assoziierter magmatischer Aktivität. Dieser Typ liegt in Sri Lanka, Indien oder Kanada vor. Daneben ist das Auftreten von Grafitgängen möglich, deren Bildung durch die Platznahme von Pegmatiten bei gleichzeitiger Lösung von Kohlenstoff aus präexistentem organischem Material erklärt wird [Weis et al. 1981]. Neben pegmatitischen Vererzungen können Grafit-Mineralisationen im Zuge einer Intrusion alkalischer bis alkaligranitischer Schmelzen auftreten (z.B. Mongolei) [Dill et al. 2006].

## 1.4 Niob und Tantal

Hinsichtlich der wirtschaftlich nutzbaren primären Lagerstätten lassen sich auf Grund der magmatischen Gesteine, mit denen sie vorkommen, drei Haupttypen unterscheiden [Küster 2009, Shaw und Goodenough 2011]:

- Karbonatite und assoziierte Gesteine
- Alkalische bis peralkalische Granite und Syenite
- Granite und Pegmatite der LCT-Familie; diese sind angereichert an Lithium, Cäsium und Tantal [Černý und Ercit 2005]

Der erste Typ tritt häufig in kontinentalen Extensions- und Riftzonen auf. Karbonatite kommen oft gemeinsam mit silikatischen Alkaligesteinen (Nephelin-Syenite, Foid-führende Magmatite, alkalireiche Ultramafite etc.) vor. Diese Lagerstätten sind meist Nb-dominiert (Pyrochlor, Nb > Ta), wobei Niob häufig mit Elementen der Seltenen Erden (SEE), Uran, Thorium, Zirkonium etc. vergesellschaftet ist. Eine ökonomisch interessante Anreicherungen (> 0,3 Gew.-% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) lässt sich durch Prozesse wie magmatische Differentiation, hydrothermale Alteration und Remobilisierung sowie durch lateritische Verwitterungsprozesse (z.B. Araxá und Catalao, Brasilien) erklären. Niob wird zum Teil als Beiprodukt aus einigen karbonatitischen/lateritischen SEE-Lagerstätten gewonnen (z.B. Bayan Obo, China).

Lagerstätten des Typs 2 sind ebenfalls häufig an kontinentale Riftzonen geknüpft, treten allerdings auch in orogenen Settings nach der Gebirgsbildung (post-orogen, post-Kollisionsstadium) auf. Diese speziellen Granite (A-Typ-Granite) und Syenite etc. weisen starke Anreicherungen an Eisen, „High-Field-Strength“-Elementen (HFS; Nb, Ta, Zr) und anderen inkompatiblen Elementen (U, Th, F) auf, wobei als deren Quelle eine Teilaufschmelzung der subkontinentalen Lithosphäre postuliert wird. Polymetallische Lagerstätten dieses Typs (Nb > Ta) werden derzeit vor allem in SW-Grönland (Provinz Gadar) exploriert bzw. auf der Halbinsel Kola (Lovozero) abgebaut.

Der dritte Typ ist mit Graniten und Pegmatiten der LCT-Familie vergesellschaftet. Er stellt weltweit die wichtigste primäre Quelle für Tantal dar. Dabei handelt es sich um peraluminöse SiO<sub>2</sub>-reiche magmatische Gesteine, in denen es zur Anreicherung von Lithium, Rubidium, Cäsium, Beryllium, Zinn, Tantal und Niob (Ta > Nb) kam und daher als Seltene-Elemente-Granite bezeichnet werden. Neben Columbit-Tantalit und Mikrolith kristallisieren häufig zinnhaltige (Kassiterit) sowie lithiumhaltige Minerale (Spodumen, Petalit). Nb-Ta-Granite entstehen durch Aufschmelzung kontinentaler Krustengesteine und anschließender magmatischer Differentiation. Sie intrudieren typischerweise als post-orogene Granite in kontinentale Kollisionzonen und werden in einer spät-magmatischen Phase oft von Pegmatitschwärmen umrahmt. Bei den Intrusionen handelt es sich um leukogranitische

Schmelzen, wobei typische Nebengemengteile Biotit, Muskovit, Topas und Turmalin sind. Granitische Lagerstätten finden sich etwa in Yichun (Südost-China) oder Beauvoir (Frankreich) [Černý und Ercit 1989]. Tantal ist aufgrund von Fraktionierungsprozessen häufig in den distalen Bereichen der Pegmatite stärker angereichert. Granitische Ta-Erzkörper zeichnen sich durch einen hohen Grad an Albitisierung und Vergreisungserscheinungen auf, welche auf postmagmatische metasomatisch-hydrothermale Alterationsprozesse zurückzuführen sind. Innerhalb der LCT-Pegmatite werden mehrere Untertypen unterschieden [Černý 1989, Černý und Ercit 2005], wobei aber alle Tantalminerale (Columbit-Reihe, Mikrolith, Wodginit, etc.) führen können. Die weltweit wichtigsten Tantal-Pegmatite dieses Typs sind Greenbushes und Wodgina (Australien), Tanco (Kanada), Mibra/Volta Grande (Brasilien), Kenticha (Äthiopien), Morrua und Marropino (Mosambique), Manono-Kitotolo (Demokratische Republik Kongo) etc. Der Großteil der Coltan-Produktion Zentralafrikas (Ostkongo) stammt aus dem (meist) artisanalem Bergbau auf Pegmatite des LCT-Typs oder daraus infolge Verwitterung entstandenen eluvialen und alluvialen Seifenlagerstätten. Bei den primären Vererzungen handelt es sich um Ta-Sn-Nb-reiche Pegmatite, die mit postkinematischen, neoproterozoischen Zinngraniten des Kibara Orogens assoziiert sind [Pohl 2011].

## 1.5 Platingruppenmetalle

Die Platingruppenelemente zeigen eine starke Affinität zu Nickel-Kupfersulfiden und Chromiten, wobei deren Lagerstätten zum größten Teil mit (ultra-)mafischen magmatischen Komplexen assoziiert sind. Für die Anreicherung der PGMs sind oft mehrere Prozesse verantwortlich. So spielen die Entmischung sulfidischer von silikatischen Schmelzen, die magmatische Kristallisation dieser Elemente (z.T. mit Chromit), magmatische Differentiationsprozesse aber auch die anschließende Remobilisierung der PGE durch metasomatisch-hydrothermale Fluide eine bedeutende Rolle bei der Lagerstättenbildung [Dill 2010]. Der zur Bildung von PGE-haltigen Sulfiden benötigte Schwefel stammt entweder primär aus dem Erdmantel oder wird durch Assimilation von krustalem Gestein ins System eingebracht.

Den wirtschaftlich bedeutendsten Lagerstättentyp stellen lagige mafische Intrusionen dar. Hierzu zählen der südafrikanische Bushveld Komplex, der in den USA gelegene Stillwater Komplex, sowie der Great Dyke in Zimbabwe. Im Jahr 2010 stammten 77 % der Weltjahresproduktion von Platin, 40 % der von Palladium und 78 % der restlichen PGE aus Südafrika [USGS 2011]. Geologisch werden im Bushveld Komplex zwei PGM-führende Erzhorizonte in den lithostratigraphischen Einheiten der Rustenburg Abfolge unterschieden. Das Merensky Reef stellt ein lateral unterschiedlich mächtiges Band aus Pyroxen- und Plagioklaskumulatphasen dar. Die Anreicherung der Platingruppenelemente wird durch die erneute Intrusion einer PGE-reichen primitiven Schmelze mit anschließender Mischung mit magmatischen

Kumulaten erklärt. Durch Segregation bildete sich eine sulfidische Schmelze, in welcher bevorzugt Cu, Ni und die Platingruppenelemente angereichert wurden. [Naldrett et al. 2009]. Die zweite lithostratigraphische Einheit mit PGE-Anreicherungen ist die sogenannte UG2 Chromitit-Abfolge. Sie stellt heute den – zusammen mit dem Merensky Reef – wichtigsten Horizont mit PGM im Bushveld-Komplex dar. Die PGE- und Chrom-Vererzungen der UG2 Abfolge entstanden in Folge einer Injektion frischer Schmelzen in die Magmenkammer und anschließender Assimilation felsischer Gesteine. Durch die Kontamination der Schmelze mit silikatischen Phasen konnte vermutlich Chromit auskristallisieren, welcher angereichert an PGM am Boden der Magmenkammer akkumuliert wurde [Kinnaird et al. 2002]. Die Genese dieser PGM-reichen Chromitite ist jedoch nach wie vor nicht vollständig geklärt.

Intensiv wird auch die Genese der PGE-Lagerstätten in der russischen Noril'sk-Lagerstätte diskutiert, die als einer der größten Versorger des Weltrohstoffmarktes mit Nickel und Platingruppenelementen (vor allem Palladium) gilt. Die Lagerstättenbildung steht in Zusammenhang mit kontinentalen Flutbasalten. Als notwendige Schwefelquelle für die Bildung der sulfidischen PGE-Mineralisationen in der Noril'sk-Vererzung wird in nahezu allen genetischen Modellen die Assimilation von Anhydrit-führendem Nebengestein angenommen, wobei eine mögliche Mobilisation von Sulfiden aus der Unterkruste nicht außer Acht gelassen werden darf [Krivolutskaya 2011]. Alternative Interpretationen favorisieren eine Anreicherung der Erze als Folge einer Remobilisierung der Platingruppenelemente aus älteren paläoproterozoischen Sedimenten und deren krustalen Untergrundgesteinen [Starostin und Sorokhtin 2011].

Eine weitere Art von PGE-Lagerstätten tritt in ringförmigen Ultramafitkomplexen (Alaska-Ural-Typus) und in den ultramafischen Anteilen von Ophiolithen auf, in letzteren findet sich zumeist eine Assoziation der PGM mit Chromititen. Beide Typen scheinen derzeit allerdings subökonomisch zu sein und den Autoren sind keine derartigen produzierenden Lagerstätten bekannt (die Acoje Mine in Indonesien, welche bis 2003 PGE als Beiprodukt zu Cr gewann, nahm erst vor kurzem wieder Explorationstätigkeiten auf). Fluviale Seifenlagerstätten waren historisch gesehen die ersten Produzenten von Platin (Ural). Diese weisen jedoch heute keine Bedeutung mehr auf. In der Verwitterungszone primärer Lagerstätten entstehen unter anderem Platinoxide. Große Mengen (400 Millionen Tonnen) derartiger supergener Erze kommen z.B. in der Hartely Mine, Zimbabwe vor [Oberthür et al., 2003], die aber bisher noch nicht wirtschaftlich gewonnen werden, da das Problem ihrer Aufbereitung bisher ungelöst ist.

## 1.6 Elemente der Seltenen Erden

Genetisch lassen sich unterschiedliche Lagerstättentypen definieren, wobei die Gewinnung der SEE allerdings meist nur als Nebenprodukt erfolgt. Primäre SEE-Lagerstätten sind

vorwiegend mit sehr speziellen magmatischen Gesteinen assoziiert und mit damit verbundenen hydrothermalen Systemen. Des Weiteren führen intensive Verwitterungsprozesse SEE-haltiger alkalischer und karbonatitischer Gesteine zu einer sekundären supergenen Anreicherung der Elemente der Seltenen Erden und zur Bildung von autochthonen, lateritischen Regolith- und Saprolithdecken oberhalb eines magmatischen Komplexes bzw. zur Bildung von eluvialen, alluvialen oder küstennahen Seifenlagerstätten [Pohl 2011].

Die wichtigste Lagerstättenart, aus der aktuell SEE gewonnen werden, stellen Karbonatite dar, die mit alkalischen Magmatiten (Syenite, Phonolithe, Nephelinite etc.) assoziiert sind, wobei Vererzungen auch in den Alkaligesteinen selbst auftreten können. Hinsichtlich des geologisch-tektonischen Rahmens sind SEE-vererzte karbonatitische und alkalische Intrusionskomplexe vor allem auf prä-kambrische Kratone beschränkt und stehen oft im Zusammenhang mit kontinentalen Riftzonen [Kanazawa und Kamitani 2006]. Die Anreicherung der SEE in diesen hochtemperierten magmatischen und magmatisch-hydrothermalen Systemen wird auf fraktionierte Kristallisation bzw. auf die Nicht-Mischbarkeit silikatischer und karbonatitischer Schmelzen und Fluide zurückgeführt [Dill 2010].

Neben diesen stets an alkalischen Magmatismus gebundenen Lagerstätten treten SEE-Vererzungen in SEE-U-Nb-haltigen Pegmatiten auf [Dill 2010]. Die Anreicherung der Seltenen Erden in diesen mit Graniten assoziierten Pegmatiten wird durch die Remobilisation aufgrund zirkulierender Fluide im Spätstadium der Kristallisation erklärt.

Das derzeit weltweit größte und ökonomisch wichtigste Vorkommen für „Leichte“ SEE ist die in der Inneren Mongolei, China, gelegene Fe-SEE-Nb-Lagerstätte Bayan Obo. Die Genese dieser Lagerstätte wird kontrovers diskutiert, da sie sowohl Charakteristika karbonatitischer als auch solche magmatisch-hydrothermalen Eisenoxid-Kupfer-Gold-Vererzungen aufweist [Wu 2008]. Auch hinsichtlich des Abbaus „Schwerer“ SEE ist China der wichtigste Produzent. „Schwere“ SEE werden aus den in den südchinesischen Provinzen Guangdong und Jiangxi gelegenen Ionenadsorptionstonen (IAT)-Lagerstätten gewonnen. Diese supergenen Vorkommen entstanden durch lateritische Verwitterung SEE-haltiger Granite unter subtropischen klimatischen Verhältnissen, wodurch die SEE infolge von Verwitterungsprozessen aus den Graniten mobilisiert und anschließend adsorptiv an die bei der Verwitterung entstandenen Tonminerale (Kaolinit, Halloysit) gebunden wurden. Dabei kam es zu einer relativen Anreicherung der „Schweren“ SEE bzw. relativen Verarmung der „Leichten“ SEE. Geeignete paläoklimatische Bedingungen über längere Zeiträume hinweg (z.B. geringe regionale Hebung und Erosion) führten zur Bildung großräumiger SEE-Lagerstätten in Form von Ionenadsorptionstonen. Aufgrund der einfachen geologischen Lagerungsverhältnisse und der adsorptiven Bindung der SEE an die Oberfläche der Tonminerale lassen sich die Metalle der Seltenen Erden aus den supergenen IAT-Lagerstätten ohne größeren

technischen Aufwand gewinnen. Daher sind auch die Bauwürdigkeitsgrenzen dieser Lagerstätten verglichen mit den primären Lagerstätten signifikant geringer (vergleiche Tabelle am Ende des Kapitels).

Neben den chinesischen Erzkörpern werden derzeit SEE aus küstennahen Seifenlagerstätten in Indien (Aluva) und Malaysia (Lehat), lateritischen Regolithen in Brasilien (Araxá) und Australien (Mt. Weld), sowie aus Vorkommen in alkalischen Intrusionskomplexen in Russland (Lovozero) gewonnen. Die Produktion aus diesen Lagerstätten ist allerdings von untergeordneter wirtschaftlicher Bedeutung. Die 2002 geschlossene karbonatitische SEE-Vererzung Mountain Pass in den USA – sie war bis in die 1980er Jahre das wichtigste SEE-Vorkommen der Welt – nahm nach längerfristigen Sanierungsarbeiten ihre Produktion wieder auf und soll Ende des Jahres 2013 ihre volle Leistungsfähigkeit erreichen. Zudem laufen Bestrebungen hinsichtlich eines Abbaus von SEE gemeinsam mit der Gewinnung von Uran und Zink in Kvanefjeld in Südwestgrönland, einem der größten in Alkaligesteinen auftretenden SEE-Vorkommen der Welt (Projekt noch in Prefeasibility-Phase). Kvanefjeld ist eines der größten laufenden SEE-Bergbauprojekte der Welt mit nachgewiesenen Reserven von 960 Millionen Tonnen Erz bei einem Gehalt von ca. 1 Gew.-% Gesamt-SEE-Oxiden. Auch in Europa, insbesondere in Deutschland (Lagerstätte Storkwitz), gibt es Bemühungen SEE-Vorkommen zukünftig zu erschließen. Als eine neue alternative Quelle für SEE wurden in letzter Zeit auch pelagische Tiefseesedimente genannt. Kato et al. (2011) berichteten von erhöhten Konzentrationen von SEE, die an Eisenoxide-hydroxide und Phillipsit gebunden sind, in Tiefseeschlämmen des Pazifik.

## 1.7 Vanadium

Magmatische Lagerstätten, allen voran orthomagmatische V-Ti-Fe-Lagerstätten in mafischen Intrusionskomplexen, stellen den wichtigsten Typ für Vanadium dar. V-Vorkommen in sedimentären Uran- oder Phosphor-Erzkörpern sind derzeit nur von untergeordneter ökonomischer Relevanz. Angesichts der geochemischen Affinität von Vanadium zu organischem Material finden sich potenziell wirtschaftliche Ressourcen dieses Metalls auch in Schweröl, Kohlen und bituminösen Gesteinen wie Öl- oder Schwarzschiefern. Vanadium wird in diesen Gesteinen mit organischem Kohlenstoff angereichert, weshalb in weiterer Folge auch Feinstflug- und Verbrennungssaschen von Öl- und Kohlekraftwerken, sowie Schlacken aus der Stahlindustrie sekundäre Quellen für dieses Element darstellen.

Die weltweit führenden, produzierenden Nationen sind China, Südafrika und Russland. In allen drei Ländern sind, neben Schlacken aus der Roheisen- und Stahlindustrie, orthomagmatische Vorkommen von Titanomagnetit assoziiert mit mafischen Intrusionen die wichtigsten primären Vanadiumquellen. Die wohl bekanntesten Lagerstätten dieses Typs

liegen im Bushveld-Komplex in Südafrika, der enorme Ressourcen an Chrom, Platingruppen-elementen und Vanadium beinhaltet (siehe Anhang: Kapitel 1.5 „Platingruppenmetalle“). Der Bushveld-Komplex stellt eine Abfolge von lagigen (ultra-)mafischen Intrusionen in einer Sequenz von spätarchaischen-jungproterozoischen Schelfsedimenten dar [Beukes 1987]. Eine dieser Abfolgen umfasst die (ultra-)mafischen Gabbonorite, Chromitite und Pyroxenite der Rustenburg-Serie, deren obere Zone durch das Auftreten monomineralischer Titanomagnetitlagen charakterisiert ist. Die Vanadiumgehalte der Magnetite belaufen sich in den unteren Kumulaten auf bis zu 1,2 Gew.-% V [Pohl 2011]. Die Gewinnung von Magnetit mit ca. 0,85–0,95 Gew.-% V erfolgt in der Mapoch-Mine im Tagebergbau aus einem 1,5 bis 2,5 m mächtigen Erzkörper [Bauer et al. 1996, Pohl 2011].

Die hohen Rohstoffpreise der letzten Jahre haben die Gewinnung von Vanadium aus alternativen Quellen wie sedimentären Schwarz- und Ölschiefen wirtschaftlich interessant gemacht. Bituminöse Schwarzschiefer zeichnen sich durch einen hohen Anteil an organischem Kohlenstoff aus und bilden sich durch die Sedimentation von organischem Material unter sauerstofffreien Bedingungen in Gewässern oder Sümpfen. Schwarzschiefer wurde in vielen Provinzen Chinas (Yunnan, Guizhou, Hunan, Zhejiang, Jiangxi, Guangxi, Gansu, Xinjiang) als ökonomisch bedeutsame Quelle für die Gewinnung von Vanadium, aber auch Molybdän, Silber, Yttrium und Gallium identifiziert [Li et al. 2009]. Mit etwa 118 Millionen Tonnen  $V_2O_5$  sind in jenen Sedimenten mehr als 87 % der Vanadium-Reserven Chinas enthalten [Bin 2006].

## 1.8 Wolfram

Wirtschaftlich wichtige Wolfram-Lagerstätten bilden sich in der Regel in magmatisch-hydrothermalen Systemen in Verbindung mit felsischen Intrusionen, zumeist in Gebirgsgürteln (Orogene), die ihrerseits als Folge subduktionsbezogener Kollisionstektonik entstanden. Diese Orogene sind geologisch gesehen eher jung (ca. 250–65 Millionen Jahre). Wesentliche Gebirgsgürtel mit Wolframerzkörper finden sich in Ostasien (Südchina, Korea, Thailand), im Altai-Sayan-Gürtel Südsibiriens (Kasachstan etc.), im australischen East Coast Fold Belt und dem alpidischen Gebirgsgürtel (Frankreich bis Türkei). Auch in den Kordilleren Nord- und Südamerikas liegen zahlreiche bedeutende Lagerstätten (Kanada, USA, Peru, Bolivien). Die wichtigsten W-Vererzungen Europas finden sich im variszischen Gebirgsgürtel, der sich von Tschechien, Deutschland, über Südengland nach Spanien und Portugal erstreckt. Die Zinn-Wolframlagerstätten in Nordostbrasilien und Zentralafrika liegen in geotektonischen Extensionszonen.

Die fünf wichtigsten Typen sind: Skarne, Gang-/Brekzien-/Stockwerklagerstätten, disseminierte bzw. Greisenlagerstätten, porphyrische und schichtgebundene Vererzungen [Pitfield und Brown 2011, Schmidt 2012].

Reine Wolframlagerstätten kommen vorwiegend in Assoziation mit stark fraktionierten I-Typ-Graniten vor, während polymetallische Sn-W-Vererzungen eher mit A- und S-Typ-Graniten vergesellschaftet sind [Pohl 2011]. Die magmatisch-hydrothermale Herkunft der erzbringenden Lösungen ist für viele Erzkörper mittels stabiler Isotope nachgewiesen [Zaw und Singoyi 2000]. Zusätzlich ist eine spätere Zirkulation kühlerer, oxidierender, meteorischer Wässer in den Exoskarnen (metasomatisch alteriertes Nebengestein) möglich.

Wolfram-Skarnlagerstätten treten meist in karbonatischen Nebengesteinen auf, in mehr oder wenig eindeutiger räumlicher Assoziation mit granitischen Intrusionen. Es sind diesbezüglich proximale (direkter Kontakt Granitoid/Nebengestein) und distale Lagerstätten/Erzkörper (vom Kontakt entfernt) unterscheidbar. Distale Skarnlagerstätten zeigen oft Ähnlichkeiten zu regionalmetamorph gebildeten Kalksilikatgesteinen und durch regionalmetamorph-metasomatische Prozesse entstandene Reaktionsskarne, die allerdings ebenso wie magmatogene Skarne Scheelit führen können. Letztere bilden allerdings kaum Lagerstätten wirtschaftlicher Größe aus. Das vorherrschende Wolframmineral in Skarnen ist meist Scheelit, welcher zum Teil mehrere Gewichtsprozent Molybdän enthalten kann. Kalzium-Skarnlagerstätten – wobei reduzierende und oxidierende Skarne unterschieden werden können – mit entsprechend großen Erzreserven finden sich zum Beispiel in Nordamerika (Cantung, Mactung, Pine Creek), Australien (King Island) oder Korea (Sangdong).

Gangförmige Erzkörper bilden ein Kontinuum von Gang- bis Stockwerkvererzungen. Sie treten im Granit oder auch in den Nebengesteinen auf. Quarz ist das typische Gangmineral, Wolframit das dominante Wolframmineral. Begleitelemente in diesen Lagerstätten können Zinn, Kupfer, Molybdän, Wismut und Gold sein. Die Erzkörper zeigen daher oft eine komplexe Mineralvergesellschaftung, sowie eine zeitliche und räumliche Zonierung. In Fällen, in denen die W-transportierenden magmatisch-hydrothermalen Fluide keine Vererzungen in diskreten Strukturen (Gängen) bilden, sondern die apikalen Bereiche der Granite gänzlich durch die hydrothermalen Fluide alteriert werden, entstehen disseminierte Greisenlagerstätten mit Fluor (Topas, Fluorit), Bor (Turmalin), Lithium (Li-Glimmer) als typische Elemente. Granitische Greisen- und Ganglagerstätten sind aus Cornwall, Großbritannien, dem Erzgebirge, Deutschland oder auch Portugal (Panasqueira) beschrieben.

Untergeordnet treten Wolfram-Mineralisationen im Zusammenhang mit A-Typ-Graniten, Monzoniten oder Rapakivi-Graniten in Kratonen oder in Grabenbruchsystemen zusammen mit Nb-Ta-Mineralen auf (z.B. Nigeria, Kamerun). Pegmatite mit Wolfram (Okbang, Südkorea) sind selten wirtschaftlich bedeutend. Wolfram ist in Pegmatiten eher ein Begleiter

von Nb-Ta-, Sn-, Be- und Li-Mineralen (z.B. Wodgina, Australien). Diese Erzkörper sind aber häufig die Quellen für Seifenlagerstätten.

In porphyrischen Lagerstätten treten die Vererzungen in einem stockwerkartigen Netzwerk von Gängen und Rissen auf, ist also durch Strukturen kontrolliert. Es bestehen allerdings Übergänge zu disseminierten Vererzungstypen und auch mineralisierte Brekzienzonen finden sich häufig. Wolframit und Scheelit werden von Molybdän-, Wismut- und Zinnmineralen begleitet. Die Alterationstypen und -zonierungen sind ähnlich wie bei anderen Porphyr-Lagerstätten, wobei Wolfram eher an die zentralen Hochtemperaturzonen (Kalifeldspat-, Greisenalteration) gebunden ist.

Schichtgebundene Wolframlagerstätten vom Typ Felbertal wurden bisher als eigenständiger Sondertypus aufgefasst. Auf Grund ihrer schichtgebundenen bis mitunter stratiformen Ausbildung ließen sie sich oft als syngenetische Vererzungen interpretieren, welche keine Assoziation mit Graniten aufweisen. Exhalative Quellen (Hot Springs) oder evaporitische Brines, wie sie rezent vom Searles Lake, USA bekannt sind, werden als mögliche prä-metamorphe Äquivalente angesehen. Es ist unbestritten, dass gerade in den Ostalpen dieser nicht an Granite gebundene Typ von Vererzungen existiert. Hinsichtlich der Typuslokalität Felbertal konnte allerdings gezeigt werden, dass die Mineralisation räumlich und zeitlich sehr wohl mit einem Metagranitoid in Beziehung steht. Die Lagerstätte Felbertal kann daher auch als granitische stockwerkartige Lagerstätte interpretiert werden.

## 1.9 Literatur

- Bauer, G. et al., 1996: Vanadium and Vanadium Compounds. In: Elvers, B., Hawkins, S., Hussey, W.E. (Hrsg.): Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, A 27, 367–386.
- Beukes, N. J., 1987: Facies relations, depositional environments and diagenesis in a major Early Proterozoic stromatolitic carbonate platform to basinal sequence, Campbellrand Subgroup, Transvaal Supergroup, Southern Africa. *Sedimentary Geology*, 54, 1–46.
- Bin, Z. Y., 2006: Progress of the research on extraction of vanadium pentoxide from stone coal and the market of the  $V_2O_5$ . *Hunan Nonferrous Metals*, 22, 16–20.
- Bleiwas, D. I., 2010: Byproduct mineral commodities used for the production of photovoltaic cells, U.S. Geological Survey, Circular 1365.
- Černý, P., 1989: Characteristics of pegmatite deposits of tantalum. In: Černý, P. und F. Saupé (Hrsg.): Lanthanides, tantalum and niobium, Berlin, Heidelberg, Springer Verlag.
- Černý, P. und T. S. Ercit, 1989: Mineralogy of niobium and tantalum: Crystal chemical relationships, paragenetic aspects and their economic implications. In: Lanthanides, tantalum and niobium: Mineralogy, geochemistry, characteristics of primary ore deposits, prospecting, processing and applications, Springer Verlag, Berlin, 27–79.

- Černý, P. und T. S. Ercit, 2005: The classification of pegmatites revisited. *Canadian Mineralogist*, 43, 2005–2026.
- Dill, H. G. et al., 2006: A review of industrial minerals of Mongolia: the impact of geological and geographical factors on their formation and use. *International Geology Review*, 48, 129–173.
- Dill, H. G., 2010: The „chessboard“ classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth Science Reviews*, 100, 1–420.
- Fan, D. et al., 2004: The Xikuangshan Sb deposit hosted by the Upper Devonian black shale series, Hunan, China. *Ore Geology Reviews*, 24, 121–133.
- Höll, R. et al., 2007: Metallogenesis of germanium – A review. *Ore Geology Reviews*, 30, 145–180.
- Kanazawa, Y. und M. Kamitani, 2006: Rare earth minerals and resources in the world. *Journal of alloys and compounds*, 408–412, 1339–1343.
- Kato, Y. et al., 2011: Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nature Geoscience*, 4, 535–539.
- Kinnaird, J. et al., 2002: Chromitite formation – a key to understanding process of platinum enrichment. *Applied Earth Sciences*, vol.111, p. 23–35.
- Krivolutskaya, N. A., 2011: Formation of PGM-Cu-Ni deposits in the process of evolution of flood-basalt magmatism in the Noril'sk Region. *Geology of Ore Deposits*, 53, 309–339.
- Küster, D., 2009: Granitoid-hosted Ta mineralization in the Arabian Nubian Shield: Ore deposit types, tectono-metallogenic setting and petrogenetic framework. *Ore Geology Reviews*, 35, 68–86.
- Li, M. et al., 2009: Extraction of vanadium from black shale using pressure acid leaching. *Hydrometallurgy*, 98, 308–313.
- Naldrett, A. J. et al., 2009: PGE tenor and metal ratios within and below the Merensky Reef, Bushveld Complex: Implications for its genesis. *Journal of Petrology*, 50, 625–659.
- Neiva, A. M. R. et al., 2008: Antimony quartz and antimony-gold quartz veins from northern Portugal, *Ore Geology Reviews*, 34, 533–546.
- Oberthür, T. et al., 2003: Geochemistry and mineralogy of platinum-group elements at Hartley Platinum Mine, Zimbabwe. Part 2: Supergene redistribution in the oxidized Main Sulfide Zone of the Great Dyke, and alluvial platinum-group minerals. *Mineralium Deposita*, 38, 344–355.
- Pearson, T. N. und M. J. Viljoen, 1986: Antimony mineralization in the Murchison greenstone belt; an overview. In Anhaeusser, C. R. und S. Maske (Hrsg.), *Mineral Deposits of South Africa, Volume I*, Geological Society South Africa, Johannesburg, 293–320.
- Pitfield, P. und T. Brown, 2011: Tungsten – BGS commodity profile. British Geological Survey, Keyworth, Nottingham, Internet: [www.MineralsUK.com](http://www.MineralsUK.com)

- Pohl, W. L., 2011: *Economic Geology – Principles and Practice*. Blackwell Publishing Ltd, West Sussex.
- Schmidt, S., 2012: From deposit to concentrate: The basics of tungsten mining, Part 1: Project generation and project development: ITIA Newsletter Tungsten, June 2012.
- Shaw, R. und K. Goodenough, 2011: Niobium-tantalum, BGS commodity profiles, British Geological Survey, 26. Internet: [www.MineralsUK.com](http://www.MineralsUK.com)
- Starostin, V. I. und O. G. Sorokhtin, 2011: A new interpretation for the origin of the Norilsk type PGE-Cu-Ni sulphide deposits, *Geoscience Frontiers*, 2, 583–591.
- USGS, 2011: 2010 Minerals Yearbook – Platinum-Group Metals [Advanced Release], Virginia. Internet: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/platinum/myb1-2010-plati.pdf>
- Wagner, T. und N. J. Cook, 2000: Late-Variscan antimony mineralisation in the Rheinisches Schiefergebirge, NW Germany; evidence for stibnite precipitation by drastic cooling of high-temperature fluid systems. *Mineralium Deposita*, 35, 206–222.
- Weis, P. L. et al., 1981: The origin of epigenetic graphite: evidence from isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45, 2325–2332.
- Wu, C., 2008: Bayan Obo controversy: Carbonatites versus Iron Oxide-Cu-Au-(REE-U), *Resource Geology*, 58, 348–354.
- Yang, Z. et al., 2009: Post-collisional Sb and Au mineralization related to the South Tibetan detachment system, Himalayan orogen. *Ore Geology Reviews*, vol. 36, p. 194-212
- Zaw, K. und B. Singoyi, 2000: Formation of magnetite-scheelite skarn mineralization at Kara, northwestern Tasmania: evidence from mineral chemistry and stable isotopes, *Economic Geology*, 95, 1215–1230.

## 2. Stoffflüsse ausgewählter kritischer Rohstoffe

Die nachfolgenden Unterkapitel beschreiben detailliert die Daten, welche für die Erstellung der Stoffflussanalysen von Neodym, Niob und Palladium Verwendung fanden beziehungsweise, welche Annahmen und Abschätzungen getroffen wurden. Hierbei erfolgt vor allem eine Unterteilung in die wesentlichen Anwendungsgebiete dieser Elemente.

### 2.1 Neodym

Da Neodym in beinahe allen Anwendungsgebieten in Form von NdFeB-Permanentmagneten eingesetzt wird, sind diese vorab genauer beschrieben.

#### 2.1.1 Hochleistungs-Permanentmagnete auf Basis von $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$

Ein Permanentmagnet stellt ein Material dar, welches dauerhaft magnetisiert ist und diesen Zustand im Laufe der Zeit nur unwesentlich verliert. Diese können bis zum 2000-fachen ihres Eigengewichts heben [Angerer et al. 2009]. Durch Anlegen eines äußeren Magnetfelds  $H$  wird ein magnetischer Fluss  $B$  in Festkörpern induziert, der bei dessen anschließender Entfernung im Allgemeinen wieder gegen Null gehen würde. Bei magnetischen Materialien, im Besonderen Magnetwerkstoffe, bleibt ein magnetischer Fluss  $B$  auch bei  $H = 0$  erhalten. Dieser Wert nennt sich Remanenz und liefert Information über die Leistungsfähigkeit eines Permanentmagneten.

Materialien, die sich zur Verwendung als Permanentmagnete eignen, sind z.B. Hartferrite, Seltene-Erden- ( $\text{NdFeB}$  oder  $\text{SmCo}$ ) oder Aluminium-Nickel-Cobalt-(Alnico)-Legierungen. Der stärkste der hier genannten ist der Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnet ( $\text{NdFeB}$ ) [Angerer et al. 2009]. Typischerweise besitzen diese bei Raumtemperatur eine Remanenz von 1,1 bis 1,3 Tesla und eine Energiedichte von 250–300  $\text{kJ/m}^3$  [Haring et al. 2003]. Rodewald et al. (2002) sprechen sogar von Energiedichten bis 420  $\text{kJ/m}^3$ .

Neodym-Eisen-Bor-( $\text{NdFeB}$ )-Magnetwerkstoffe sind zwar stärker als Samarium-Cobalt-Systeme, jedoch ist deren Curie-Temperatur und somit Temperaturbeständigkeit niedriger. Des Weiteren weisen sie, bedingt durch das stark negative elektrochemische Standardpotenzial der Seltenen Erden von  $E = -2,2$  bis  $-2,5$  V, eine sehr hohe Korrosionsanfälligkeit auf [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 mittels Beimengung von Cobalt und Kupfer (edle Metalle – positives Standardpotenzial) verbessert werden oder durch Beschichtung der Magnete mit galvanischen Überzügen (Chrom, Zinn

oder Nickel), Elektro-Tauch- oder Aluminiumsprühlackierungen [Rodewald et al. 2002]. Unabhängig von der Beimengungen zur Verbesserung der Temperatur- und Korrosionsbeständigkeit bestehen Neodym-Magnete aus folgenden Massenanteilen: 72,3 % Eisen, 26,7 % Neodym und 1 % Bor [Angerer et al. 2009].

Die Abbildung 90 zeigt die zeitliche Entwicklung der Energiedichte von Permanentmagneten vom Jahr 1910 bis 2000. Des Weiteren sollen die zylinderförmigen Balken 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.

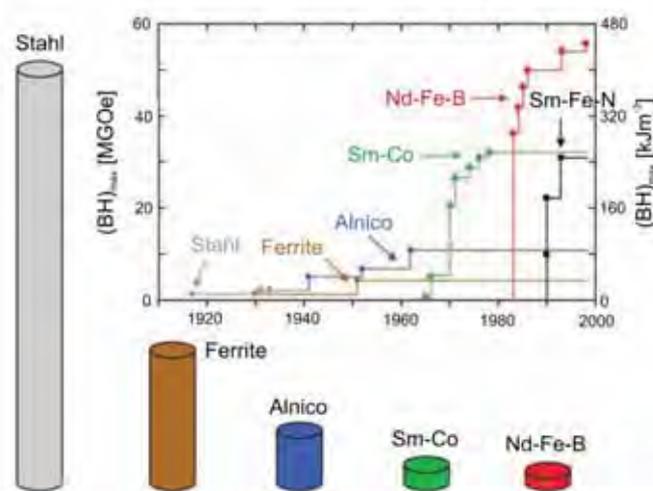


Abbildung 90: Zeitliche Entwicklung der Permanentmagnete gegen die Energiedichte [Gutfleisch et al. 2011]

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. Deren Produktion verteilt sich zu 75–80 % auf China, 17–25 % Japan und 3–5 % Europa. 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 [Schüler et al. 2011].

Für die Erstellung der Stoffflussanalyse von Neodym ist es von grundlegender Bedeutung, dass die Konzentration von Neodym in Permanentmagneten bekannt ist. Die Tabelle 73 zeigt die der Literatur entnommenen Gehalte an Neodym, Dysprosium, Eisen und Bor.

Tabelle 73: Konzentrationen einzelner Elemente in NdFeB-Permanentmagneten

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

Du und Graedel (2011) schätzen die weltweiten Lager an Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagneten, welche sich in diversen Produkten in Verwendung befinden, auf 97.000 Tonnen. Die SFA für Neodym in Österreich (2011) wurde in folgende Prozesse gegliedert:

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

## 2.1.2 Windkraftwerke

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 soll er bereits bei 4,9 % ausmachen (IG Windkraft 2011). Betrachtet man den Anteil der Windkraft an der Ökostromerzeugung im Jahr 2010, so liegt dieser bei 34,2 %, jener der Wasserkraft 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 mit 1–13 MW/Jahr moderat. Erst ab dem Jahr 2000 nahm die Kapazitätserweiterung zu und die installierte Leistung entwickelte sich von 415 MW im Jahr

<sup>2</sup> Neodym/Praseodym-Gemisch, von Schüler et al. (2011) angenommen

2003 zu 1.084 MW im Jahr 2011 [IG Windkraft 2011]. Davon wurden alleine im letzten Jahr 73 MW mit einer durchschnittlichen Anlagengröße von 2,2 MW errichtet. Wie in Abbildung 91 ersichtlich, teilt sich die gesamte installierte Leistung auf einige verschiedene Hersteller auf, wobei Enercon und Vestas gemeinsam 82 % der Marktanteile halten.

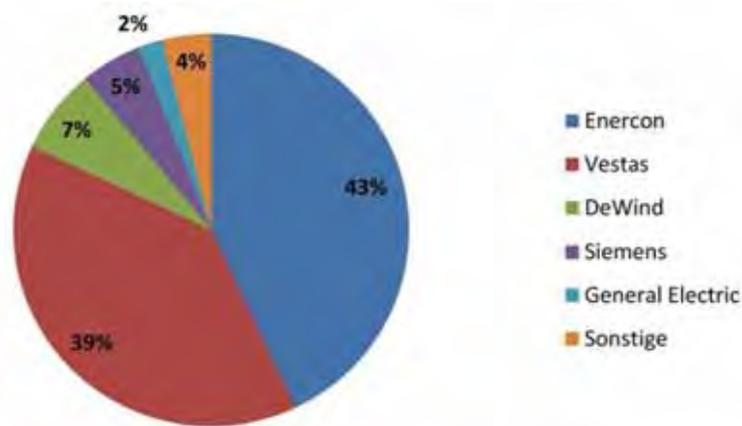


Abbildung 91: Installierte Leistung Windkraft in Österreich nach Herstellern, Stand Dezember 2011 [IG Windkraft 2011]

Da in Österreich keine Produktion von Neodym-Eisen-Bor-Magneten erfolgt, handelt es sich bei dem nachfolgend 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 WKAs mit Direktantrieb fällt das Getriebe weg, diese bestehen folglich nur aus Rotor und Generator. Die Anlagen mit Direktantrieb werden entweder mit kupferhaltigen Elektro- oder mit starken Permanentmagneten betrieben [Murphy&Spitz Research 2011]. Die getriebelosen Anlagen bieten die Vorteile, dass sie wartungsfrei bzw. -arm sind und niedrigere Betriebskosten, bedingt durch die Einsparung des Schmieröls für das Getriebe, aufweisen [Weinhold 2010].

Schüler et al. (2011) schätzten, dass 14 % der neu installierten Windkraftanlagen Neodym-Permanentmagneten beinhalten. Um dies für Österreich angeben zu können, wurden mehrere Ansätze gewählt. Ausgehend von Informationen von der Homepage der Interessensvertretung „IG Windkraft“ fand eine Befragung der Hersteller der in Österreich installierten Windkraftanlagen mittels Fragebogen zur Verwendung von Permanentmagneten in ihren Produkten statt. Da diese nicht alle notwendigen Informationen lieferte, dienten zusätzliche Internetrecherchen dazu, bei den Unternehmen genauere Angaben zu finden und dadurch auf die Verwendung von Nd-Fe-B-Permanentmagneten schließen zu können.

Weil sich die Angaben zum Magnetmaterialbedarf auf die Leistung (t/MW) beziehen, wurden die von der IG Windkraft (2011) bezogenen Marktanteile in die installierte Kapazität pro Hersteller umgerechnet (siehe Tabelle 74). Dies ergibt eine leichte Ungenauigkeit von 10 MW,

dies lässt sich aber tolerieren, da die erhaltenen Ergebnisse dennoch annähernd der Verteilung der installierten Leistung nach Herstellern entsprechen.

Tabelle 74: Hersteller in Österreich installierter WKA inkl. Marktanteil und berechneter Leistung sowie recherchierte Information zur Verwendung von NdFeB-Permanentmagneten verschiedener Hersteller

Hersteller	Anteil [%]	Leistung [MW]	WKA mit NdFeB	Quelle
Enercon	43	466,12	Nein	Enercon Homepage
Vestas	39	422,76	k.A.	
DeWind	7	75,88	k.A.	
Siemens	5	54,20	Nein	Auskunft Siemens Energy
General Electric	2	21,68	k.A.	
Repower	1,1	11,92	Nein	Auskunft Repower
Nordex	0,14	1,52	Nein	Nordex Homepage
Windtec	0,2	2,17	k.A.	
Fuhrländer	0,2	2,17	k.A.	
Leitwind	0,3	3,25	Ja	Auskunft Leitwind
Lagerwey	0,6	6,50	Ja	Lagerwey Homepage
Seewind	0,7	7,59	k.A.	
Summe	99,24	1.076		

Die Tabelle 75 zeigt die in der Literatur angegebenen Werte für die eingesetzten Mengen [t/MW] an Permanentmagneten in Windkraftanlagen.

Tabelle 75: Abschätzung des Magnetbedarfs für Permanentmagnet-Generatoren in WKA

Quelle		Magnetbedarf [t/MW]		
		Min.	Max.	Mittelwert
[Gutfleisch et al. 2011]		-	-	0,5
[Moss et al. 2011]	General Electric	0,5	0,75	0,625
	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

Da sowohl zum Gewicht der Permanentmagnet-Generatoren als auch zur Neodym-Konzentration in den Magneten Schätzungen existieren, sind im nächsten Schritt die betreffenden Windkraftanlagen zu identifizieren. Es wurde der Ansatz gewählt, die Recherche mittels Fragebogen auf Herstellerebene durchzuführen, da die IG Windkraft die notwendigen Informationen nicht zur Verfügung stellen konnte. Die Fragen sollten klären, ob der jeweilige Hersteller NdFeB-Magnete verwendet, ob er Anlagen mit dieser Technologie in Österreich installiert hat und ob er die gebrauchten Magnete recycelt. Von den acht kontaktierten WKA-Herstellern gaben nur drei eine Rückmeldung ab. Für die anderen fanden Informationen von der Plattform „thewindpower.net“, die von der Europäischen Interessens-

vertretung für Windkraft unterstützt wird, Verwendung. Diese Internetplattform beinhaltet alle in Österreich errichteten Windfarmen, die dazugehörigen Hersteller und in den meisten Fällen auch die Anlagentypen. 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 lässt sich auf 20 Jahre schätzen [Schittl 2012, Du und Graedel 2011]. Die Abbildung 92 zeigt den Lebenszyklus einer Windkraftanlage [D'Souza et al. 2011]. Dieser 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].

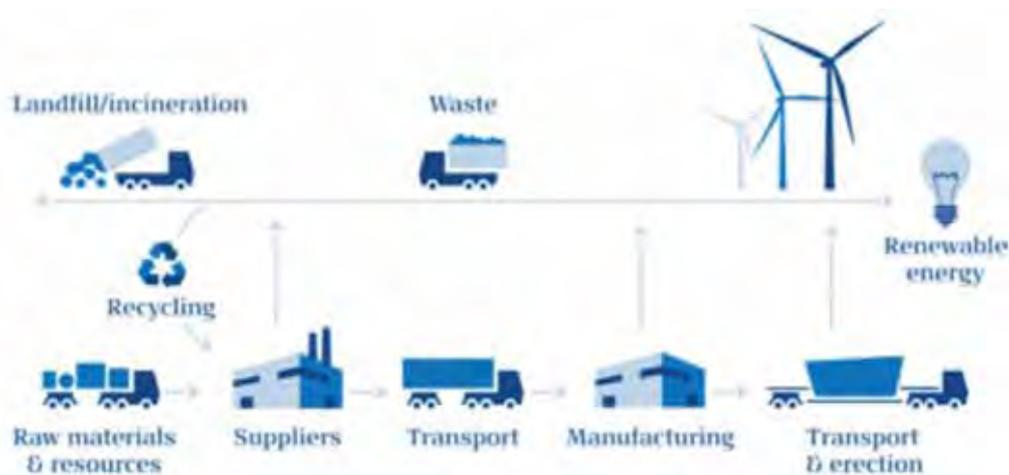


Abbildung 92: Lebenszyklus einer Windturbine [D'Souza et al. 2011]

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 sich die einzelnen Komponenten der Windturbine recyceln lassen (siehe Tabelle 76).

Tabelle 76: Behandlung der einzelnen Komponenten einer WKA nach der Demontierung [D'Souza et al. 2011]

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

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 beim 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, enthielt der im Rahmen des an die Hersteller gerichteten Fragebogens auch eine Frage zu diesem Thema. 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  $\pm 4$  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  $710 \pm 90$  kg/MW ausgegangen. Schüler et al. (2011) schätzten den Anteil der mit NdFeB-Permanentmagneten versehenen Windkraftanlagen an den Neuinstallationen auf 14 %, dies ergibt bei insgesamt 73 MW für diesen Typ  $10,2 \pm 2,6$  MW im Jahr 2011.

Das Lager wurde nach eigener Recherche auf insgesamt 214 MW geschätzt, abzüglich des Input-Flusses im Jahr 2011 ergibt das  $204 \pm 51$  MW in Österreich installierte Leistung. Der Güterfluss der Neodym-Eisen-Bor-Magneten in den Prozess „Windkraft“ beläuft sich daher auf  $7,3 \pm 2,0$  t, das zuvor bestehende Lager auf  $145 \pm 40$  t.

Mit Hilfe der Software STAN ließen sich nach Angabe der Neodym-Konzentrationen mit  $0,29 \pm 0,04$  t/t die Flüsse und Lager in Neodym-Mengen umrechnen. Die Tabelle 77 stellt diese dar, 2011 befanden sich  $42 \pm 33$  % Tonnen Neodym im Prozess „Windkraft“, der Zuwachs betrug  $+ 2,1 \pm 22$  % Tonnen.

Tabelle 77: Quantifizierte Flüsse und Lager im Prozess „Windkraftwerke“ im System Neodym in Österreich (2011)

Windkraftwerke		Neodym [t]
Windkraftanlagen mit NdFeB	Input-Fluss	$2,1 \pm 0,46$
Lager	Lager	$(42 \pm 14) + (2,1 \pm 0,46)$

## 2.1.3 Medizin und Forschung

Bezüglich der Stoffflussanalyse von Neodym in Österreich fanden im Bereich „Medizin und Forschung“ die beiden Anwendungen Nd:YAG-Laser und Magnetresonanztomographie Berücksichtigung.

### 2.1.3.1 Nd:YAG-Laser

Lasere (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) sind ein unverzichtbares Werkzeug sowohl in Bereichen der Wissenschaft und Forschung als auch der Medizin und Materialbearbeitung. Deren Prinzip basiert auf dem Effekt der stimulierten Emission von Strahlung. Diese Stimulation kann optisch (Einstrahlung von Licht) oder elektrisch (z.B. Gasentladung) erfolgen. Zunächst werden die 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 (das heißt gleicher Wellenlänge und Frequenz) aus wie das stimulierende Photon. Das „neu entstandene“ Photon kann dann seinerseits andere angeregte Atome zur Ausstrahlung stimulieren. Alle diese Photonen bewegen sich in die gleiche Richtung, es entsteht monochromatisches Licht.

Im Gegensatz hierzu fällt bei Licht, welches durch Verwendung einer Glühbirne entsteht, 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.

Der Werkstoff 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 Neodym als Lasermaterial indem Yttrium im Kristallgitter durch 0,8–1,1 Mol-% Neodym ersetzt ist [Angerer et al. 2009]. Der Bereich der Festkörperlaser wird von Nd:YAG dominiert.

Lasere lassen sich vor allem zur Bearbeitung von Materialien verwenden. Dazu gehören unter anderem das Schneiden und Verbinden, Oberflächenbehandlungen und die Formgebung. In der industriellen Materialbearbeitung werden vor allem drei Lasertypen herangezogen:  $CO_2$ -, Nd:YAG- und Dioden-gepumpte Hochleistungs-Lasere [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 finden Nd:YAG-Lasere häufig in der Dermatologie Einsatz, sowohl mit einer Wellenlänge von 1.064 nm als auch frequenzverdoppelt mit 532 nm [Greve und Raulin 2011].

Genauere Zahlen oder Schätzungen für die Verwendung von Nd:YAG-Lasermaterial in Österreich waren nicht auffindbar. Aus der Tabelle 78, welche die von Angerer et al. (2009) erstellte Projektion des globalen Neodym-Verbrauchs für die Herstellung von Nd:YAG-Kristallen für die Laser-Materialverarbeitung darstellt, lässt sich eindeutig erkennen, 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 soll laut Projektion im Jahr 2030 bei 42–215 kg betragen. 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 Mol-% vorliegt, kann dieser Materialfluss als unbedeutend bezeichnet werden. Auch ein Recycling dieser geringen Mengen und niedrigen Konzentrationen käme vermutlich nicht in Frage.

Tabelle 78: Projektion des globalen Rohstoffverbrauchs für die Herstellung von Nd:YAG-Kristallen zur Laser-Materialverarbeitung [Angerer et al. 2009]

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

### 2.1.3.2 Magnetresonanztomographie (MRT)

Laut Moss et al. (2011) werden 5 % der weltweit hergestellten Neodym-Eisen-Bor-(NdFeB)-Magnete für den Einsatz in der Magnetresonanztomographie (MRT, magnetic resonance imaging) verwendet. Auch Rodewald et al. (2002) postulieren eine Nutzung dieser Magnete im Bereich der Magnetresonanztomographie und -spektroskopie. Laut Hornak (2011) finden in MR-Tomographen jedoch hauptsächlich supraleitende Elektromagneten Gebrauch. In diesen Materialien wird der Effekt ausgenutzt, dass der elektrische Widerstand supraleitender Werkstoffe bei Unterschreiten ihrer kritischen Temperatur den Wert Null erreicht (Siehe dazu auch MRT-Geräte im Kapitel 2.2.1.2 „Supraleiter“). Über den direkten Einsatz von Hochleistungs-Permanentmagneten in diesem Anwendungsbereich ließ sich der Literatur keine vertiefende Information entnehmen. Laut dem 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 diese in Österreich keine MRT-Geräte mit NdFeB-Magneten gebaut hat. Es wurde von Seiten der Firma Philips betont, dass sie in ihren Geräten nur die Supraleiter-Technologie verwenden, weil diese bei der MRT den Stand der Technik darstelle. Des Weiteren lassen sich Philips Austria und Siemens mehr als 90 % der in Österreich installierten MRT-Geräte zuordnen. Auch der Bericht von Angerer et al. (2009) bezeichnet Siemens Healthcare und Philips

Healthcare als bedeutende europäischen Hersteller von Tomographen. Eine Recherche auf der Homepage von Siemens Healthcare führte zu einem Gerät (MAGNETOM C! 0.35T), dessen Magnetfeld durch Einsatz von Permanentmagneten generiert wird. Der Vorteil dieses speziellen Tomographen besteht darin, dass aufgrund des eingesetzten Permanentmagneten keine ringförmige Anordnung mehr notwendig ist und die Patienten also während der Bildgebung zugänglich sind, wodurch sich auch Behandlungsmöglichkeiten ergeben. Im 18. Wiener Gemeindebezirk befindet sich ein so genanntes „MRT open“ im Betrieb [MRT open 2012]. Als Vorteil findet der Einsatz bei Patienten mit Herzschrittmachern, Übergewicht, Platzangst und Gelenksbeschwerden als auch bei Kindern Erwähnung. Laut Du und Graedel (2011) liegt die Einsatzdauer eines MRT-Geräts bei 10 Jahren.

## **2.1.4 Private Haushalte**

Im Bereich der privaten Haushalte finden für die Stoffflussanalyse von Neodym die Elektrofahrzeuge sowie die Elektronik und Elektrotechnik Berücksichtigung.

### **2.1.4.1 Elektrofahrzeuge**

Seit etwa 20 Jahren wird an der Entwicklung alternativer, von fossilen Brennstoffen unabhängigen Antriebstechnologien für Kraftfahrzeuge gearbeitet. Die Fahrzeugtypen, welche 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 Elektro- als auch durch einen Verbrennungsmotor mit geringerer Leistung angetrieben werden. Das Hybridfahrzeug benötigt daher 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 NeFeB-Magnete nutzen [Angerer et al. 2009]. Zusätzlich zu den SE-enthaltenden Elektromotoren beinhalten Hybrid-Fahrzeuge auch Nickel-Metall-Hydrid-Batterien, die sich durch Bremsenergie wieder aufladen lassen und in denen die SE als sogenanntes Mischmetall, einem Gemisch aus Lanthan, Cer, Neodym und Praseodym [Schüler et al. 2011] Verwendung findet. Schüler et al. (2011) beziffern die Masse der NiMeH-Batterie des Toyota Prius nach Auskunft von Toyota mit 35 kg, wobei 7 % oder 2,9 kg den Seltenen Erden zuzuordnen sind. Des Weiteren erwähnen sie die Marktführung des Toyota Prius und die daraus folgende Dominanz dieses Batterietyps. Langfristig gesehen wird diese Form des Energiespeichers aber von der Lithium-Ionen-Batterie abgelöst werden. Im Jahr 2010 waren laut Wimmer (2012) rund 4,5 Millionen Pkw in Österreich zugelassen, davon allerdings nur 0,11 % mit Hybrid-Antrieb.

Das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie plante, dass bis 2020 900.000 Hybridautos und 130.000 bis 150.000 Elektroautos in Österreich zugelassen sein sollten [Wimmer 2012]. Leoni (2005) spricht davon, dass 90.000 Hybrid-Fahrzeuge weltweit im Jahr 2004 verkauft wurden, wobei davon 62 % Toyota-Prius- 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. Die Tabelle 79 zeigt die verschiedenen Literaturquellen entnommenen Informationen zum Nd-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 Werte in dieser Arbeit für alle Hybridfahrzeuge Verwendung fanden.

Tabelle 79: Der Literatur entnommene Schätzungen zu den Neodym-Gehalten der Hybrid-Fahrzeuge

<b>Modell</b>	<b>Quelle</b>	<b>Neodym-Gehalt [kg]</b>	<b>Magnet-Gehalt [kg]</b>
Toyota Prius (Motor)	[Oakdene Hollins 2010]	1	-
	[Oakdene Hollins 2010]	0,9–1,8	-
	[Bryce 2010]	1	-
Elektromotor	[Schüler et al. 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	-

Laut Statistik Austria (2012) wurden in Österreich 356.145 Personenkraftwagen (PKW) im Kalenderjahr 2011 neu zugelassen. Davon waren 631 mit Elektro- und 1310 mit Hybrid-Antrieb ausgestattet. Um auch die Lager in den privaten Haushalten quantifizieren zu können, ist es notwendig, die Anzahl der insgesamt gemeldeten Fahrzeuge zu kennen. Laut Statistik Austria (2011a) waren dies am 31.12.2011 in Österreich 4.513.421 PKW, davon 989 mit Elektro- und 6.060 mit Hybrid-Antrieb.

Ein weiteres Verkehrsmittel, das sich zurzeit großer Beliebtheit erfreut, stellt das Elektrofahrrad dar. Der VCÖ (2011) sagte für das Jahr 2011 für die Elektrofahrräder Verkaufszahlen von bis zu 40.000 Stück voraus. Die Tabelle 80 zeigt diese nach Kalenderjahren bzw. die Prognose der Verkaufszahlen des VCÖ für das Jahr 2011, für welche sich keine definitiv ermittelte Daten auffinden ließen.

Tabelle 80: Verkaufszahlen für Elektrofahrräder in Österreich nach Jahren [VCÖ 2011]

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

Luo (2007) gab an, dass im Motor eines Elektrofahrrads (36 V/180 W) 380 g NdFeB-Magnet verbaut sind. Liu et al. (2011) nannten 300 g bzw. 500 g als Masse des Magneten in einem Elektrofahrrad. Die Einsatzdauer eines Autos liegt laut Du und Graedel (2011) bei 14 Jahren. Für die weitere Berechnung der Verweildauer der Elektro- sowie Hybridautos und Elektrofahrräder wurde diese Einsatzdauer angenommen, da keine weiteren Informationen dazu zu finden waren. Jedoch lässt sich annehmen, dass diese im Fall der Elektrofahrräder als etwas zu hoch angesetzt ist.

### **Elektroautos**

Aus den im Vorhergehenden dargestellten Daten ergibt sich eine durchschnittliche Neodym-Menge von  $0,193 \text{ kg} \pm 0,048 \text{ kg}$  pro Elektroauto. Ebenso fand bereits Erwähnung, dass in Österreich Ende 2011 989 Elektroautos zugelassen waren und dass im Jahr 2011 63 Elektroautos neu dazukamen. Diese Zulassungszahlen ließen sich zur Berechnung des Neodym-Flusses und -Lagers für Elektroautos im Jahr 2011 herangezogen.

Aus der durchschnittlichen Lebensdauer eines Autos von 14 Jahren resultierten die Berechnung des Anfallpotenzials und die Schätzung des Abfallflusses in Richtung Prozess „Abfallwirtschaft“. Die Tabelle 81 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, welcher der Abfallwirtschaft und somit einem Recycling zugeführt wird, sehr klein.

Tabelle 81: Quantifizierte Flüsse und Lager der Elektroautos im Prozess „Private Haushalte“ im System Neodym in Österreich (2011)

<b>Elektroautos</b>	<b>Neodym [kg]</b>
Input-Fluss 2011	$120 \pm 3$
Lager 2011	$(70 \pm 2) + (110 \pm 3)$
Output-Fluss als Abfall	$10 \pm 0$

## Hybridautos

Aus den oben angeführten Daten ergibt sich eine durchschnittliche Neodym-Menge von  $0,90 \pm 0,10$  kg pro Hybridauto. Ebenso fand dort bereits Erwähnung, 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. Die Schätzung des Output-Flusses zum Prozess „Abfallwirtschaft“ (Anfallpotenzial) erfolgt erneut über die angenommene durchschnittliche Lebensdauer von 14 Jahren. Die Tabelle 82 zeigt die daraus resultierenden Neodym-Flüsse und -Lager für Hybridautos in Österreich im Jahr 2011.

Tabelle 82: Quantifizierte Flüsse und Lager der Hybridautos im Prozess „Private Haushalte“ im System Neodym in Österreich (2011)

Hybridautos	Neodym [t]
Input-Fluss 2011	$1,2 \pm 0,15$
Lager 2011	$(4,3 \pm 0,53) + (0,79 \pm 0,18)$
Output-Fluss als Abfall	$0,39 \pm 0,11$

## Elektrofahrräder

Die am Anfang des Kapitels angeführten Daten ergeben einen durchschnittlichen Neodym-Eisen-Bor-Magnetgehalt von  $0,40 \pm 0,05$  kg pro Elektrofahrrad. Der Neodym-Anteil der Magnete wird auf  $30 \pm 3$  % geschätzt. Der Input-Fluss im Jahr 2011 lässt sich mit 35.000 Elektrofahrrädern beziffern, das Lager Ende 2011 mit 78.500 Stück. Der Schätzwert für die Lebensdauer beträgt – wie für die Elektro- und Hybridautos – 14 Jahre, da keine alternativen Daten dazu auffindbar waren. Diese Lebensdauer erscheint allerdings etwas zu hoch und ist hier mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Die Tabelle 83 zeigt die berechneten Neodym-Mengen der Flüsse und Lager der Elektrofahrräder in Österreich im Jahr 2011.

Tabelle 83: Quantifizierte Flüsse und Lager der Elektrofahrräder im Prozess „Private Haushalte“ im System Neodym in Österreich (2011)

Elektrofahrräder	Neodym [t]
Input-Fluss 2011	$4,01 \pm 0,71$
Lager 2011	$(4,98 \pm 0,88) + (3,36 \pm 0,73)$
Output-Fluss als Abfall	$0,64 \pm 0,20$

### 2.1.4.2 Elektronik und Elektrotechnik

Bezüglich der Elektrotechnik und Elektronik gibt es unterschiedliche Bauteile, wie beispielsweise Festplatten, Mobiltelefone und Lautsprecher, welche Neodym enthalten.

## Festplatten (HDD)

In Festplatten („Hard Disk Drives“, HDD), die sich in Computern befinden, werden Neodym-Eisen-Bor-Magnete verbaut. Shin-Etsu (zitiert in [Oakdene Hollins 2010]) nimmt an, dass für diese ein Drittel der Neodym-Permanentmagneten Einsatz findet. In Laptops werden Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnete im Gegensatz zu den Stand-PCs auch in Lautsprechern eingesetzt [Buchert et al. 2012]. Die Tabelle 84 zeigt die der Literatur entnommenen Gehalte an Permanentmagneten in Computer-Festplatten.

Tabelle 84: Magnetgehalte von 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

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 den Daten zu Desktop-PCs und Laptops gearbeitet.

Du und Graedel (2011) gaben die Lebensdauer eines Computers mit 10 Jahren an. Hausmann (2005) nannte dafür 5–8 Jahre. Buchert et al. (2012) bezifferten die Lebensdauer eines Laptops mit 5,6 Jahre und schätzten, dass in Deutschland 50 % der Alt-Laptops gesammelt werden. Über den Verbleib der 2. Hälfte der Laptops gibt es keine Daten. Es lässt sich jedoch vermuten, dass es wie auch bei anderen elektronischen Geräten mehrere Möglichkeiten des Verbleibs gibt:

- Die nicht mehr in Nutzung befindlichen Geräte lagern zu Hause.
- Kleinere Geräte gelangen teilweise mit dem Restmüll in die Entsorgung.
- 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 geschreddert (mechanische

Vorbehandlung) und in mehrere Fraktionen sortiert. Bei diesem Vorgang kommt es zu einem großen Verlust an wertvollen Rohstoffen, da die Zuordnung in die einzelnen Fraktionen zu ungenau ist und manche Rohstoffe dadurch in Fraktionen gelangen, aus denen sie nicht extrahiert werden können. Festplatten finden ein größeres Augenmerk, da sie teilweise wertvolle Daten enthalten. Diese lassen sich entweder durch eine Software, durch Anlegen eines starken Magnetfelds oder durch einen separaten Schredder-Prozess löschen. Daraus resultiert die Vermutung, dass zumindest ein Teil der Festplatten eine separate Behandlung erfährt, welche Potenzial als Recycling-Möglichkeit bietet.

Ein weiterer zu beachtender Aspekt im Zusammenhang mit dem Recycling von Festplatten ist die schwierige Trennung der einzelnen Fraktionen, die wertvolle Rohstoffe enthalten. Dies hängt vor allem mit dem komplexen Design des Produkts zusammen, welches unter anderem verschiedene Schrauben enthält, die wiederum ein automatisiertes Zerlegen schwierig machen. Daher werden die Festplatten geschreddert und ergeben ein Gemisch an wertvollen Rohstoffen, die größtenteils verloren gehen. Die Verluste der Edelmetalle liegen bei 70 %, jene der Seltenen Erden sogar bei 100 %, da sie sich in der Stahlfraktion befinden und sich somit nicht mehr rückgewinnen lassen.

Buchert et al. (2012) geben in ihrem Bericht einige Punkte vor, welche die Rückgewinnung der kritischen Rohstoffe aus Festplatten möglich macht. Es wird unter anderem vorgeschlagen, die Laptops/PCs soweit wie möglich manuell zu zerlegen, um die einzelnen Komponenten einem separaten Recycling zuzuführen. Da ein Großteil der NdFeB-Magneten sich in Festplatten befindet, ist es von großer Bedeutung, diese auch als sekundäre Ressourcen zu nutzen. Ein Recycling der Festplatten sollte prinzipiell rentabel sein, da Laptops und PCs eine kürzere Lebensdauer besitzen als Windkraftanlagen und Elektro- bzw. Hybridautos.

Aus den bereits dargestellten Daten ergibt sich, dass die Festplatte in einem PC  $19 \pm 2,4$  g Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnet enthält. Erneut wird mit einer Neodym-Konzentration von  $30 \pm 3$  % gerechnet. Laut Statistik Austria (2011 b) besitzen 78,1 % der österreichischen Haushalte einen Computer. Da eigene Abschätzungen davon ausgehen, dass sich in vielen Haushalten mehr als ein Computer befindet (inklusive Laptops und Tablet-PCs) basiert diese Stoffflussanalyse auf der Annahme, dass 78,1 % der österreichischen Bevölkerung einen Computer besitzen. Folglich resultieren aus einer Einwohnerzahl von 8,4 Millionen etwa 6,56 Millionen Computer ( $\pm 820.000$ ) in den österreichischen Haushalten.

Da keine Computer-Verkaufszahlen für Österreich im Jahr 2011 auffindbar waren, 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 ist aus diesem Grund ein Input-Fluss von 1,3 Millionen Computern ( $\pm 325.000$ ) anzunehmen.

Die Abschätzung des Output-Flusses erfolgte aufgrund fehlender Daten über das Anfallpotenzial mit Hilfe der mittleren Lebensdauer ( $8 \pm 1$  Jahre). Die Tabelle 85 zeigt die berechneten Neodym-Flüsse und -Lager für Festplatten im Subprozess „Private Haushalte“.

Tabelle 85: Quantifizierte Flüsse und Lager für Festplatten im Prozess „Private Haushalte“ im System Neodym in Österreich (2011)

<b>Festplatten</b>	<b>Neodym [t]</b>
Input-Fluss 2011	$7,3 \pm 1,3$
Lager 2011	$(37 \pm 7,0) + (2,7 \pm 1,5)$
Output-Fluss als Abfall	$4,6 \pm 0,82$

### **Mobiltelefone bzw. Smartphones**

Die so genannten Smartphones haben in den letzten Jahren das klassische Mobiltelefon abgelöst. Diese neue Generation 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: Cobalt, Gallium, Indium, Niob, Tantal, Wolfram, Platingruppenmetalle und Seltene Erden, wie das hier näher betrachtete Neodym [Buchert et al. 2012]. Vergleichbar zu den meisten Flüssen dieses Stoffflusssystem wird Neodym auch in diesem Fall als Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnet verbaut.

Buchert et al. (2012) berichteten, dass keine quantitativen Informationen zur Neodym-Konzentration in Mobiltelefonen existieren, daher wurde folgende Näherung gewählt: Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnete finden in den kleinen Lautsprechern der Mobiltelefone Einsatz. Laut Buchert et al. (2012) wiegen diese 190 mg. Unter der Annahme, dass die Zusammensetzung dieser Magneten ähnlich denen in Laptop-Lautsprechern sein müsste, lassen sich folgende in Tabelle 86 dargestellte Neodym-Gehalte festlegen.

Tabelle 86: Geschätzte Neodym-Mengen eines Smartphones [Buchert et al. 2012]

<b>Metall</b>	<b>Metall pro Smartphone [g]</b>	<b>Komponente</b>
Neodym	0,050	Lautsprecher Magnet
Praseodym	0,010	Lautsprecher Magnet

Liu et al. (2011) gaben an, dass pro Mobiltelefon 5 g Permanentmagnete enthalten sind. 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 laut Mobile Marketing Association 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 und auch Konsument.at (2012) nennt dieselbe Verkaufszahl für das Jahr 2011. Gemäß Buchert et al. (2012) ist im Fall eines Smartphones bzw. Handys mit einer Lebensdauer von 3–4 Jahre zu rechnen. Hausmann (2005) gibt eine Lebensdauer der Mobiltelefone von 2,2–5 Jahre an. Dies bedeutet, dass diese Produkte relativ kurzfristig einem möglichen Recycling zugänglich werden, sofern dieses Potenzial auch genutzt wird. Des Weiteren geben Buchert et al. (2012) an, dass in Deutschland nur 5 % aller Mobiltelefone kontrollierte Recycling-Einrichtungen erreichen. Den verbleibenden 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.

Buchert et al. (2012) weisen darauf hin, dass beim Recycling von Mobiltelefonen im ersten Schritt die Entnahme der Co-hältigen Lithium-Ionen-Batterien erfolgt, welche in einen separaten Recycling-Prozess gelangen. Das Mobiltelefon wird im Anschluss ohne Akku in einer pyrometallurgischen Anlage ohne weitere Zerlegung verarbeitet. In diesem Vorgang lassen sich Metalle wie Kupfer, Blei, Nickel, Zinn und Edelmetalle wie Gold, Silber und Palladium zurückgewinnen.

Die niedrige Sammelrate in Deutschland (5 %) offenbart, dass diese zu erhöhen ist, 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, lagern in den privaten Haushalten. Auf die Bevölkerungszahl Österreichs heruntergebrochen ergeben sich daraus 8,3 Millionen Alt-Handys. Nach einer Umfrage von BITKOM (2011b) wird mit diesen unterschiedlich verfahren: So heben 30 % der Deutschen ihre Telefone auf, 23 % verschenken sie, 13 % geben diese bei den Händlern oder Mobilfunkanbietern ab, 8 % spenden die Mobiltelefone für einen guten Zweck, 7 % geben sie bei einer kommunalen Sammelstelle ab, 2 % werfen diese in den Hausmüll und 17 % wollten dazu keine Angabe machen. In Österreich ließen sich im Rahmen der „Ö3-Wundertüte“-Spendenaktion 467.000 Alt-Handys sammeln [ORF 2012]. Diese Mobiltelefone wurden auf ihre Funktionstüchtigkeit hin untersucht und dann entweder in europäischen Recyclinganlagen aufgearbeitet oder, wenn sie noch funktionierten, als Second-Hand-Mobiltelefone in Schwellen- und Entwicklungsländer geliefert.

Die bereits angeführten Daten ergeben eine durchschnittliche Neodym-Menge von  $0,05 \pm 0,0125$  g pro Mobiltelefon. Da 91 % der Österreicher ein Mobiltelefon besitzen, resultiert daraus bei 8,4 Millionen Einwohnern eine Stückzahl von 7,6 Millionen  $\pm$  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  $\pm$  830.000 Handys in Österreich verkauft, die den Input-

Fluss in das Nutzlager darstellen. Ausgehend von der Schätzung des ungenutzten Handy-lagers für Deutschland lässt sich für Österreich schätzen, dass 8,3 Millionen  $\pm$  2.100.000 Mobiltelefone ungenutzt in den Schubladen und Kästen der österreichischen Haushalte liegen. Anhand der angenommenen mittleren Lebensdauer von  $2 \pm 0,25$  Jahren wird das Anfallpotenzial berechnet, das dem Output-Fluss ins ungenutzte Lager entspricht. Zuzufolge der 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. Die Tabelle 87 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 sich davon ausgehen lässt, dass das Lager für Mobiltelefone in den privaten Haushalten konstant ist.

Tabelle 87: Quantifizierte Flüsse und Lager der Mobiltelefone im Prozess „Private Haushalte“ im System Neodym in Österreich (2011)

<b>Mobiltelefone</b>	<b>Neodym [t]</b>
Input-Fluss 2011	$0,17 \pm 0,06$
Lager 2011	$0,38 \pm 0,11$
Output-Fluss ins ungenutzte Lager	$0,17 \pm 0,06$
Output-Fluss kontrolliertes Recycling zur Abfallwirtschaft	$0,01 \pm 0$
Ungenutztes Lager 2011	$(0,41 \pm 0,15) + (0,16 \pm 0,06)$

### **Lautsprecher**

Auch in Lautsprechern finden Neodym-Eisen-Bor-Magneten Verwendung. Mengenmäßige Angaben liegen nur für jene von HiFi-Anlagen vor, nicht jedoch für sogenannten In-ear-Headphones, die zu Smartphones und MP3-Playern verkauft werden. Daher lassen sich diese Flüsse hier leider nicht berücksichtigen. 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 pro Haushalt nur ein derartiges Gerät vorhanden ist – mindestens 2,3 Millionen HiFi-Anlagen. Für eine grobe Schätzung wurden zwei Lautsprecher mit je 0,75 kg pro HiFi-Anlage angenommen. Du und Graedel (2011) geben die Lebensdauer von Audiosystemen mit 10 Jahren an, während Hausmann (2005) diese mit 8–15 Jahren beziffert.

Im Falle der Lautsprecher für HiFi-Anlagen ließen sich nur das Lager und der Output-Fluss abschätzen, nicht jedoch der Input-Fluss im Jahr 2011. Da zu Letzterem keine Daten vorliegen, wurde dieser 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  $50 \pm 13$  g bei einer neuerlichen Neodym-Konzentration von  $30 \pm 3$  %. Des Weiteren wird von einer Lautsprecher-Stückzahl im Lager 2011 von  $4.600.000 \pm 1.160.000$  ausgegangen. Zur Abschätzung des Output-Flusses zur Abfallwirtschaft fand die Annahme einer durchschnittlichen Lebensdauer von  $12 \pm 1,5$  Jahren Verwendung. Die Tabelle 88 stellt das berechnete Neodym-Lager und den Output-Fluss zum Prozess „Abfallwirtschaft“ dar.

Tabelle 88: Quantifizierte Flüsse und Lager für Lautsprecher im Prozess „Private Haushalte“ im System Neodym in Österreich (2011)

Lautsprecher für HiFi-Anlagen	Neodym [t]
Input-Fluss 2011	$5,6 \pm 2,2$
Lager 2011	$67 \pm 25$
Output-Fluss zum Prozess Abfallwirtschaft	$5,6 \pm 2,2$

### DVD-Player

Wie in Festplatten sind auch in DVD-Laufwerken und -Playern Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnete verbaut. Liu et al. (2011) geben an, dass diese im Durchschnitt 5 g NdFeB-Permanentmagnete enthalten. Die Menge an Magneten lässt sich abschätzen, indem die Anzahl an DVD-Playern in Österreich bestimmt und angenommen wird, dass in jedem PC ein Laufwerk eingebaut ist. Laut Statistik Austria (2011 c) besitzen 77 % der österreichischen Haushalte einen derartigen Player oder Videorecorder. In dieser Stoffflussanalyse fand die Annahme Verwendung, dass es sich nur um DVD-Player handelt. Bei 3,605 Millionen Haushalten ergibt dies 2,8 Millionen Geräte. Laut BITKOM (2010) wurden im Jahr 2009 in Deutschland ungefähr 3 Millionen DVD Player verkauft. Da keine aktuelleren Daten vorliegen, fand die Annahme Verwendung, dass sich in Österreich 2011 ungefähr 300.000 DVD-Player verkaufen ließen. Hausmann (2005) gab deren Lebensdauer mit 6,5 Jahren an. Im Fall der DVD-Player bzw. -Laufwerke bezieht die Rechnung sämtliche DVD-Player und Computer (Annahme: alle mit DVD-Laufwerk) ein.

Wie bereits erörtert, wird angenommen, dass in jedem DVD-Player/Laufwerk  $5 \pm 1,3$  g Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnet verbaut sind sowie dass die Neodym-Konzentration bei  $30 \pm 3$  % liegt. Deren Lager (in DVD-Playern und Computern) belief sich 2011 auf insgesamt  $9.340.000 \pm 1.070.000$  Stück. Der Input-Fluss für das Jahr 2011 ließ sich anhand der deutschen Verkaufszahlen für DVD-Player schätzen und mit den angenommenen Verkaufszahlen der Computer für 2011 vereinen. Dies ergibt insgesamt einen Input-Fluss von  $1.600.000 \pm 334.000$  Stück. Für DVD-Player fand zur Abschätzung des Abfallstroms die Annahme einer durchschnittlichen Lebensdauer von  $6,5 \pm 0,8$  Jahren Verwendung. Die Tabelle

89 zeigt die berechneten Flüsse und Lager für Neodym in DVD-Playern und -Laufwerken im Subprozess „Private Haushalte“.

Tabelle 89: Flüsse und Lager DVD-Player und -Laufwerke im Prozess „Private Haushalte“ im System Neodym in Österreich (2011)

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

## 2.1.5 Verarbeitende Industrie

Der Prozess „Verarbeitende Industrie“ bildet ab, wie und wo metallisches Neodym bzw. Neodymoxid nach dem Import in Österreich zu weiterführenden Produkten bzw. chemischen Verbindungen verarbeitet wird. Der Prozess lässt sich durch Subprozesse näher darstellen, da die aus Neodym-Metall hergestellten Verbindungen weiter industriell genutzt werden und nicht direkt in Verbindung mit den Prozessen „Private Haushalte“, „Medizin und Forschung“ und „Abfallwirtschaft“ stehen.

Österreich ist maßgeblich an der Seltenen-Erden-Verarbeitung in der Europäischen Union beteiligt: 24 % der EU-Importe gehen nach Österreich (Eurostat 2010). Das Unternehmen, welches für diesen überaus hohen Importanteil im Vergleich zu anderen EU-Staaten verantwortlich ist, stellt die Treibacher Industrie AG (TIAG) mit Stammsitz in Althofen und weiteren weltweiten Niederlassungen dar. Die TIAG beschäftigt sich neben der Verarbeitung von Seltenen Erden unter anderem 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]. Das Unternehmen wurde 1898 von Carl Auer von Welsbach gegründet, der erstmals Didym in die Elemente Neodym und Praseodym auftrennen konnte [Treibacher Industrie AG 2012]. Weil das Unternehmen mit seinem Produktangebot in Österreich Alleinstellungsmerkmal besitzt, ist es schwierig, zuverlässige Daten zu erhalten. Metallisches Neodym wird primär zu Hochleistungspermanentmagneten NdFeB verarbeitet. Des Weiteren findet es zur Herstellung spezieller Legierungen und Sputtertargets Verwendung [MREL 2012]. Die Treibacher Industrie AG stellt keine Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagnete her, weshalb sich eher auf die anderen Anwendungsbereiche schließen lässt.

- Neodymchlorid findet hauptsächlich in Gläser und Kondensatoren Einsatz. Als Beimengung zu Glas färbt es dieses je nach Dotierung von violett, rot bis grau. Fällt Licht durch diese Spezialgläser, so zeigt es scharfe Absorptionsbanden [MREL 2012].
- Neodymfluorid wird wie auch Neodymchlorid hauptsächlich für Gläser und Kondensatoren eingesetzt. Des Weiteren ist es ein Rohstoff für die Weiterverarbeitung zu Nd-Metall und Nd-Legierungen [MREL 2012].
- Neodymoxid, welches ebenso die Bezeichnung Neodymia trägt, 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 findet auch zur Dotierung von Lasermaterial (Nd:YAG) Verwendung [MREL 2012].
- Neodymkarbonat kommt wie Neodymchlorid, Neodymfluorid und Neodymoxid in Gläsern und Kondensatoren zum Einsatz [MREL 2012].
- Neodymnitrat lässt sich wie die anderen Neodymsalze in Gläsern und Kondensatoren nutzen [MREL 2012].
- Neodymacetat dient wie die anderen Neodymsalze zur Herstellung von Gläsern und Kondensatoren [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 bei der Treibacher Industrie AG, in welchen Mengen sie die geführten Neodym-Verbindungen herstellen und wie hoch deren Exportanteil liege, konnte von der entsprechenden Ansprechperson aufgrund der Vertraulichkeit dieser Informationen keine Auskunft gegeben werden. Das Unternehmen selbst klassifiziert sich allerdings betreffend der Neodym-Mengen als nicht sehr bedeutend, da es keine NdFeB-Permanentmagnete erzeugt (Anfrage Treibacher). Diese Information der TIAG lässt darauf schließen, dass dieses Unternehmen relativ geringe Mengen an Neodym-Verbindungen produziert.

Der im System geschaffene Subprozess soll die nachgelagerte Industrie widerspiegeln, welche die durch die Treibacher Industrie AG hergestellten Neodym-Verbindungen in ihren Produkten weiterverarbeitet. Leider konnte hierzu keine weitere Information gefunden werden, jedoch ist angesichts der Exportquote der TIAG von 88 % und der eigens titulierten geringen Bedeutung der Firma bezüglich der Herstellung von Neodym-Verbindungen zu vermuten, dass die Flüsse und Lager der nachgelagerten Industrie relativ gering ausfallen. 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 liefert.

Obwohl die Werte der einzelnen Flüsse und Lager 0 gesetzt wurden, da keine Daten vorhanden waren und die Firma Treibacher Industrie AG über sich selbst äußerte, in diesem Bereich keine große Rolle zu spielen, lassen sich dennoch Schlüsse aus der qualitativen Betrachtung des Prozesses ziehen. Im erstellten System fand die Annahme Verwendung, dass ein Import der Rohstoffe (Neodym oder Neodymoxid) nach Österreich erfolgt und dort in der verarbeitenden Industrie die Umwandlung zu verschiedenen Neodym-Verbindungen stattfindet. Diese Produkte, 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“ dienen die Neodym-Verbindungen zur Herstellung von Produkten, welche vermutlich auch als Fluss in die privaten Haushalte gelangen. Da sich diese nicht qualifizieren ließen, findet für diesen Fluss die Bezeichnung „unbekannte Produkte“ Verwendung. 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 Industrie AG hergestellten Verbindungen um Spezial-Chemikalien handelt und diese auch nur in kleinem Maßstab hergestellt werden (Auskunft TIAG), fallen hier auch keine großen Mengen an Produktionsabfällen an. Würden in Österreich – wie z.B. in der Firma Vacuumschmelze in Deutschland – NdFeB-Permanentmagnete hergestellt, wäre das Ergebnis hier vermutlich ein anderes. Bei der Erzeugung der Permanentmagnete fallen – wie in am Anfang von Kapitel 2.1 „Neodym“ bereits dargelegt – 20–30 % an Produktionsabfällen an, welche ein Recycling wirtschaftlich notwendig machen. Ebenso fand bereits Erwähnung, dass die TIAG 88 % der produzierten Verbindungen ins Ausland exportiert, weshalb sich vermuten lässt, dass dies auch für den Großteil der hergestellten Neodym-Verbindungen gilt.

### **2.1.6 Abfallwirtschaft**

Momentan gibt es weltweit kaum Recycling für Seltene Erden [Schüler et al. 2011]. Einzig und allein Abfälle aus der Herstellung der Permanentmagneten (pre-consumer origin) gelangen derzeit in einen Recyclingprozess, nicht hingegen Produkte, die sich bereits in Verwendung befanden (post-consumer origin). Als Ursachen für das kaum betriebene Recycling werden laut Schüler et al. (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 dem Aufschmelzung der Güter in der Schlacke zu befinden, genannt. Schüler et al. (2011) betonten 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, fanden im Jahr 2010 76 % des produzierten Neodym für die Verarbeitung zu Neodym-Eisen-Bor-Permanentmagneten Verwendung [Buchert et al. 2011]. Diese Zahl veranschaulicht sehr deutlich, dass sich diese Magnete durch gezieltes Recycling als anthropogenes Lager nutzen lassen. Alleine 20–30 % der hergestellten Neodym-Eisen-Bor-Permanentwerkstoffe fallen während der Magnet-Produktion als Abfall an [Schüler et al. 2011]. Dessen Recycling hat für Österreich keine Relevanz, da NdFeB-Magnete hier nicht erzeugt werden. Obwohl noch kein effizientes Recycling erfolgt, existieren bereits Lösungsansätze, wie die Seltenen Erden aus dem magnetischen Material zurückgewonnen werden könnten [Schüler et al. 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, welche die NdFeB-Magnete aus Festplatten entfernt, um den Recyclingprozess zu automatisieren. Diese Maschine könnte 100 Magnete pro Stunde entfernen, acht Mal mehr als in Handarbeit. Der kommerzielle Einsatz soll im Jahr 2013 beginnen.

An zweiter Stelle der Neodym-Anwendungen liegt der Einsatz in NiMeH-Batterien mit 12 % der Neodym-Produktion [Buchert et al. 2011]. Möglichkeiten für ein Recycling dieser Batterien sind [Schüler et al. 2011]:

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

Auch wenn das Recycling der Seltenen Erden noch nicht weit verbreitet ist, so wird dennoch intensiv daran geforscht. Vor allem Japan tätigt große Anstrengungen, um Recyclingprozesse im eigenen Land zu etablieren [Oakdene Hollins 2010]. Jedoch sind die Ausbeuten aus den Techniken noch zu gering und der finanzielle Aufwand zum jetzigen Zeitpunkt zu groß, als dass sich sekundäre Rohstoffquellen wirklich rentieren würden [Schüler et al. 2011]. Oakdene Hollins (2010) berichteten 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 arbeitsaufwändig ist und oft manuell geschehen muss [Schüler et al. 2011]. Im Zusammenhang mit dem Recycling der NdFeB-Magnete, die aufgrund der großen Nachfrage am ehesten Versorgungsengpässe erleiden werden, sind einige besondere Herausforderungen zu bewältigen [Schüler et al. 2011]:

- Die starken Magnetfelder dieses Materials machen den Transport über große Entfernungen schwierig, da sie den Flugbetrieb gefährden können. Das Material wäre entweder zu entmagnetisiert oder direkt vor Ort zu verarbeiten.
- Ein großer Teil der Magnete findet in Festplatten und Motoren Verwendung. Wie bereits erwähnt, ist das Zerlegen dieser Güter, um die Magneten zu erhalten, aufwändig und dadurch kostspielig.
- Elektronikschrott wird häufig in pyro-metallurgischen Anlagen verarbeitet. Viele Metalle können dadurch rückgewonnen werden. Die Metalle der Seltenen gelangen aufgrund ihres unedlen Charakters jedoch in die Schlacke, die momentan noch nicht zur Rückgewinnung Verwendung findet.

Allgemein gilt als Voraussetzung für die Entwicklung eines Recyclingsystems für Seltene Erden die Schaffung effizienter Sammelsysteme, welche die Nutzung der anthropogenen Lager ermöglichen. Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt ist, dass große Teile der Konsumgüter am Ende ihrer Lebensdauer in Entwicklungsländer exportiert werden und so als Recyclingpotenzial verloren gehen [Schüler et al. 2011].

Zur Berechnung des Abfallflusses vom Prozess „Private Haushalte“ zum Prozess „Abfallwirtschaft“ wurden die Anfallpotenziale der einzelnen Produkte über deren Lebensdauer geschätzt. Im Fall der Mobiltelefone fand zusätzlich die Sammelrate von 5 % Eingang in die Rechnung. Es ließ sich kein Recycling von Neodym in Österreich feststellen, da dies momentan noch nicht wirtschaftlich rentabel und teilweise auch technisch noch nicht umsetzbar ist. Deshalb lässt sich hier vorerst davon ausgehen, 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 gelangen. Zu dieser Thematik konnten jedoch keine quantitativen Daten gefunden werden. Die Tabelle 90 zeigt die einzelnen Abfallflüsse der Produkte des Prozesses „Private Haushalte“. Insgesamt fielen im Jahr 2011 aus diesem Prozess  $13 \pm 14$  % Tonnen Neodym an, die sich wiederverwenden ließen.

Tabelle 90: Geschätzte Abfallmengen pro Produktgruppe im Prozess „Abfallwirtschaft“, geschätzt über das Anfallpotenzial im System Neodym in Österreich (2011)

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

## 2.2 Niob

Bezüglich der Stoffflüsse von Niob sind in Österreich vor allem die Bereiche „Industrie und Gewerbe“, Private Haushalte und Infrastruktur“, sowie die „Abfallwirtschaft“ relevant, welche im Nachfolgenden nähere Erläuterung finden.

### 2.2.1 Industrie und Gewerbe

Die Bedeutung von Niob für die Industrie und das Gewerbe in Österreich lässt sich anhand der Produktgruppen Stahl, Supraleiter, Münzen und Superlegierungen näher beschreiben.

#### 2.2.1.1 Stahl

Seine Hauptanwendung findet Niob eindeutig als Veredler 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 USGS (2012) schätzt den Wert, 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 („high strength low alloy“).

Diese Gruppe stellt hochfeste, niedrig legierte Stähle (kein Legierungselement überschreitet einen mittleren Gehalt von 5 %) dar, die bessere mechanischen Eigenschaften oder Korrosionsbeständigkeit als unlegierte Stähle zeigen. Der Kohlenstoffgehalt liegt bei 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, Kalzium, Elemente der Seltenen Erden oder Zirkonium. 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](http://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 aufwändigen Baukonstruktionen wie Hochhäusern, Brücken, Sportstadien usw. oder im Pipeline-Bau, nachdem sich damit immer größere Rohrdurchmesser und Wandstärken erzielen lassen. In rost- und säurebeständigen Stählen wird Niob vor allem in der chemischen Industrie, z.B. in der Molkerei- und Nahrungsmittelindustrie, eingesetzt. Ein weiterer Grund, warum Niob als Zusatz für Edelstähle, Sonderedelstähle und Nickelbasislegierungen Verwendung findet, ist die Erhöhung der Schweißbarkeit. Diese Eigenschaft nutzen auch Nb-stabilisierte 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, Voestalpine Gießerei Traisen GmbH, Voestalpine Krems GmbH, Voestalpine Schienen GmbH, Voestalpine Stahl Donawitz GmbH, Voestalpine Stahl GmbH, Voestalpine Tubulars GmbH&CoKG

Leider stehen von keinem dieser Unternehmen verwertbare Daten über den Niobverbrauch in der Stahlerzeugung zur Verfügung. 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 91), hatte aber ebenso keine Informationen über die verbrauchten bzw. produzierten Mengen dieser Nb-hältigen Stähle.

Tabelle 91: Niobgehalte von Nb-hältigen Stahlsorten nach ihrer Verwendung nach Auskünften von Isildo Vargas vom Tantalum-Niobium International Study Center (TIC)

Verwendung	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

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 betrug deren Rohstahlproduktion 5.239.924 Tonnen (Auskunft von Martina Poppenwimmer aus der F&E-Abteilung der Voestalpine) im Jahr 2011. 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, welche einer Niobmenge von ca. 540 t entspricht. Aus der Hochrechnung des Anteils der Rohstahlproduktion der Voestalpine auf ganz Österreich resultiert einen Niobbedarf von etwa 770 Tonnen für das Jahr 2011.

Tabelle 92: Rohstahlproduktion, Ferroniob- und Niob-Bedarf in der Voestalpine und in ganz Österreich im Jahr 2011

	Voestalpine	Österreich gesamt
Rohstahlproduktion 2011	5,240 Mio. t	7,474 Mio. t
Ferroniob-Bedarf 2011	900 t	1.284 t
Niob-Bedarf 2011	540 t	770 t

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 Verwendung, wobei die Datenlage aufgrund fehlender Informationen sehr schlecht ist. Auf der Homepage der Voestalpine findet sich ihr nach Regionen aufgeteilter Umsatz. Demnach erzielt die Voestalpine 90 % des Umsatzes durch Exporte – 62 % in die EU, jeweils 8 % nach Asien und Nordamerika und jeweils 4 % nach Brasilien, ins übrige Europa und in die restliche Welt. Im Bericht der Voestalpine vom Geschäftsjahr 2011/2012 [Voestalpine 2012] sind die Märkte heruntergebrochen auf die Division Stahl 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 resultieren daraus folgende Ergebnisse (Tabelle 93).

Tabelle 93: Zahlen zu Rohstahlproduktion, Ferroniob und Niob in der Stahlindustrie in ganz Österreich im Jahr 2011

	<b>Österreich gesamt</b>
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

Entsprechend den Hauptanwendungen von HSLA- bzw. Nb-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] finden die mikrolegierten, Nb-hältigen HSLA-Stähle zu 25 % als Pipelinestähle, zu 24 % als Baustähle und zu 23 % in der Automobilindustrie Einsatz. Die anderen Nb-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:

- 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 Bereiche aufgeteilt, woraus sich folgende prozentuelle Verteilung ergibt:

- 33 % Automobilindustrie, welche 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 findet vereinfachend die Annahme Verwendung, dass zur Gänze ein Export ins Ausland erfolgt (und zum Teil zur Montage von Autos in Österreich diese wieder importiert werden). Die Prozesse „Bauwerke“ (entspricht dem Output der Bauindustrie) und „Pipelines“ lassen sich als Infrastruktur dem Prozess „Private Haushalte und Infrastruktur“ zuordnen.

Tabelle 94: Quantifizierte Flüsse und Lager der Nb-hältigen Stähle im Prozess „Industrie und Gewerbe“ im System Niob in Österreich (2011)

		Niob [t]
Ferro-Niob	Input-Fluss	770 ± 121
Stähle (Export)	Output-Fluss	616 ± 121
Stähle Ö. Industrie	Fluss innerhalb „Industrie und Gewerbe“	154 ± 16
Stähle für Infrastruktur	Output zu „Private Haushalte und Infrastruktur“	81 ± 11
Stähle für Autoteile	Fluss innerhalb „Industrie und Gewerbe“	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

### 2.2.1.2 Supraleiter

Eine weitere, sehr bedeutende Anwendung von Niob begründet sich in seiner Eigenschaft, unterhalb von 9,25 K (-263,9 °C) als Supraleiter zu fungieren. Dies sind Materialien, deren elektrischer Widerstand beim Unterschreiten der sogenannten Sprungtemperatur auf 0 abfällt. In diesem Zustand werden äußere Magnetfelder verdrängt, wodurch das Innere des Materials feldfrei bleibt. Dieser sogenannte Meißner-Ochsenfeld-Effekt lässt sich nur quantenmechanisch erklären. 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 zwei kritische Feldstärken, eine niedrigere für beginnendes Eindringen des Feldes, eine höhere für das Zusammenbrechen der Supraleitung.

Ein wichtiger Anwendungsbereich von Supraleitern ist die Erzeugung starker, konstanter oder nur langsam variierender Magnetfelder. Der ohmsche Widerstand der Spulenkwicklungen 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 tolerieren. Die Herstellung starker, supraleitender Spulen erfordert die Fabrikation von kilometerlangen, nur wenige Mikrometer dünnen Leiterfäden.

Die Sprungtemperatur von Niob ist von allen chemischen 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 als Supraleiter findet Niob (vor allem als intermetallische Verbindung  $Nb_3Sn$  oder der Legierung NbTi) zur Erzeugung hoher Magnetfelder in Kernspintomographen im medizinischen (MRT) oder im chemisch-pharmazeutischen Bereich (NMR) sowie in Teilchenbeschleunigern (z.B. LHC am CERN in Genf) oder Fusionsreaktoren. Darüber hinaus weist auch  $Nb_3Ge$  eine hohe Sprungtemperatur (23,2 K) auf.

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 bleibt. Zum Laden der in sich geschlossenen Spule wird ein kurzes Teilstück der Spule über die Sprungtemperatur aufgeheizt, wodurch sich die Spule öffnet und über Zuleitungen geladen werden kann. Wenn die gewünschte Stromstärke erreicht ist, erfolgt das Abschalten des Heizers und damit das Schließen der Spule. Bei dauerhaftem Betrieb lassen sich die elektrischen Anschlüsse nach dem Laden mechanisch entfernen und der Behälter der Spule verschließen. Zur Erhaltung des Feldes ist dann nur ein regelmäßiges Nachfüllen der Kühlmedien Flüssighelium oder -stickstoff erforderlich.

Nach Angaben von Dr. Wolfram Knabl, Leiter der Forschungsabteilung bei Plansee SE, setzte diese im Jahr 2011 10–20 Tonnen reines Niob im Rahmen von Forschungsprojekten um. Die verbrauchte Menge schwankt jedoch stark – je nachdem, ob gerade an Supraleitern geforscht wird. Außerdem verwendet Plansee ca. 70 % des außerhalb der Supraleiterforschung eingesetzten Niobs in Form von schmelzmetallurgisch hergestellten Ingots hoher Reinheit (> 99 %). Daraus werden Bleche gewalzt und finalisiert. Weitere rund 20 % des Nb-Bedarfs, jedoch mit normaler Reinheit, dienen ebenso zur Herstellung von Flachhalbzeugen. Die restlichen ca. 10 % Niob finden Gebrauch als Drähte mit 1 % Zirkonium für den Licht-

bereich oder für eine Mischung aus 3–10 % Nb-Pulver mit Mo-Pulver, aus welcher durch Pressen, Sintern und Umformung Halbzeuge entstehen, woraus letztendlich die in Tabelle 95 angeführten Nb-Ströme resultieren.

Tabelle 95: Quantifizierte Flüsse der Niob-Verarbeitung bei der Firma Plansee im Prozess „Industrie und Gewerbe“ im System Niob in Österreich (2011)

<b>Niob bei Plansee</b>		<b>Niob [t]</b>
Reines Niob	Input-Fluss	15,42 ± 3,5
(Flach-)Halbzeuge und Drähte; Supraleiter	Input-Fluss	15 ± 3,5
Münzkerne	Output-Fluss	0,42

### **NMR-Geräte**

Die Kernspinresonanzspektroskopie (NMR = „nuclear magnetic resonance“) ist eine Methode zur Untersuchung der elektronischen Umgebung einzelner Atome und ihrer 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.  $^1\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{17}\text{O}$  usw.

Zur Messung wird die Probe in ein homogenes magnetisches Feld gebracht, das sogenannte Hauptmagnetfeld. Zusätzlich umgibt diese eine Induktionsspule, welche ein hochfrequentes elektromagnetisches Wechselfeld senkrecht zum Hauptmagnetfeld erzeugt. Dann variiert man die Stärke des Hauptmagnetfeldes bis Resonanz eintritt („continuous wave“, veraltet). Alternativ lässt sich die magnetische Feldstärke konstant halten und die Frequenz des eingestrahlten Wechselfeldes verändern („continuous field“, veraltet). Der Resonanzfall, in welchem die Probe Energie aus dem Wechselfeld aufnimmt, führt zu einer messbaren Veränderung der Stromstärke, welche zum Aufbau des Wechselfeldes benötigt wird. 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. Laut diesem sind an den Universitäten folgende Geräte:

- Universität Wien, Chemie: 600 MHz, 2 · 500 MHz, 2 · 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 · 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 · 300 MHz, 2 · 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 · 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) 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.

Die Ermittlung des Niobgehalts in NMR-Geräten gestaltete 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 Anwender derartiger Anlagen sind organische Chemiker, Pharmazeuten 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 erfolgen kann, war bei der Ermittlung des Niobgehaltes der supraleitenden Magneten in NMR-Geräten auf eine Expertenschätzung zurückzugreifen. 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 an: „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 enthalten größtenteils NbTi-, für Feldstärken über 9 T finden zusätzlich auch Nb<sub>3</sub>Sn-Leiter Verwendung. Der Niob-Anteil an diesen Legierungen variiert zwischen 5 und 20 Gew.-%. Aus einer Mischrechnung über alle Spektrometer, von den kleinsten (300 MHz) bis zu den größten (1.000 MHz), resultiert ein jährlicher Bedarf von 8–9 t Nb für NMR-Magnete, im Durchschnitt also etwa 15 kg pro Magnet.“ Aus diesem Wert und den mindestens 49 NMR-Geräten in Österreich ergibt sich so ein Nioblager von rund 735 kg Nb in NMR-Geräten.

Laut Dr. Brecker liegt zur durchschnittlichen Lebensdauer von NMR-Magneten keine gute Statistik vor. Einige Geräte machen gleich zu Beginn Probleme, andere (viele) halten bereits 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 langfristigen Haltbarkeit. 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 der NMR-Spektrometer von etwa 25 Jahren ausgegangen, woraus sich ein errechneter Zuwachs von zwei Geräten im Jahr 2011 ergibt. Von einem statischen Lager (Tabelle 96) ausgehend (Input = Output) kann man über das Anfallpotenzial errechnen, dass statistisch pro Jahr zwei NMR-Geräte ausgetauscht werden, woraus ein In- und Output von jeweils zwei NMR-Anlagen resultiert. Einen Fluss in die Abfallwirtschaft gibt es – wie auch bei den MR-Tomographen – jedenfalls keinen, da die

Hersteller die Altgeräte wieder zurücknehmen. Mangels Informationen ließ sich der Fluss „Alt-NMR“ daher nicht quantifizieren.

Tabelle 96: Quantifiziertes Lager der NMR-Geräte im Prozess „Industrie und Gewerbe“ im System Niob in Österreich (2011)

NMR-Geräte		Niob [t]
NMR	Lager	0,74 ± 0,18

### MRT-Geräte

Auch hier findet Niob als Supraleiter zur Erzeugung starker, konstanter, nur langsam variierender Magnetfelder Verwendung. 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 dient. Es basiert physikalisch auf den Prinzipien der Kernspinresonanz (NMR), insbesondere der Feldgradienten-NMR, und wird daher auch als Kernspintomographie bezeichnet. 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 sich bestimmte Atomkerne (meist die Wasserstoffkerne bzw. Protonen) im Körper resonant anregen lassen, wodurch in einem Empfängerstromkreis ein elektrisches Signal induziert wird. Eine wesentliche Grundlage für den Bildkontrast sind unterschiedliche Relaxationszeiten verschiedener Gewebearten. Daneben trägt auch der variierende Gehalt an Wasserstoff-Atomen in den jeweiligen Geweben (z.B. Muskel, Knochen) zum Bildkontrast bei.

Der Bericht von Angerer et al. (2009) bezeichnet Siemens Healthcare und Philips Healthcare als die wesentlichen europäischen Hersteller von 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 ≥ 1 T (Tesla) und 17 MRT-Geräte < 1 T (siehe Tabelle 97). Deren Anzahl im Raum Wien findet sich auch im Regionalen Strukturplan Gesundheit (RSG) Wien.

Tabelle 97: MR-Geräte > 1 Tesla und < 1 Tesla in Österreich aufgeschlüsselt nach Bundesländern

Gerätetyp	B	K	NÖ	OÖ	S	St	T	V	W	Österreich gesamt
MRT ≥ 1 T	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 T	1	0	1	1	2	0	7	2	3	17

Ende 2010 gab es in Österreich laut Auskunft von Dr. Ulrike Schermann-Richter 158 MRT-Geräte  $\geq 1$  T – 156 Geräte, die im Strukturplan erfasst wurden plus zwei 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 T schätzt sie auf rund 20 in Österreich – diese Daten sind im Strukturplan für 2010 noch nicht enthalten. Es gab also bei den Geräten  $> 1$  T im Jahr 2011 zwei MRT-Geräte mehr als im Jahr 2010, die Geräte  $< 1$  T dürften in etwa gleich geblieben sein.

Wie schon bei den NMR-Geräten stellt der Niobgehalt auch bei den supraleitenden Magneten der MRT-Geräte ein Betriebsgeheimnis dar, weil dies direkten Einfluss auf die Homogenität des Magnetfeldes, Strombedarf, Kühlung usw. hat, wie ein Mitarbeiter der Firma Philips mitteilte. So dient auch hier eine Expertenschätzung zur Ermittlung des Niobgehaltes in MRT-Geräten. 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: „Jene der MRI-Geräte sind wesentlich größer als die von NMR-Anlagen, da erstere eine Öffnung von 80–90 cm aufweisen (NMR: 5–14 cm), in welche die Patienten für die klinische Untersuchung eingeschoben werden. Sie benötigen 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 erfolgt die Installation von weltweit über 2.000 MRI-Systeme pro Jahr, welche einer Menge von über 100 Tonnen Nb entspricht.“

Wertet man nur die 160 leistungsstarken MRT-Geräte mit einer magnetischen Flussdichte von größer oder gleich 1 T in Österreich aus, so ist darin eine Niobmenge von ca. 8.000 kg enthalten (davon sind im Jahr 2011 zwei MRT-Geräte, also ca. 100 kg Nb, hinzugekommen), nimmt man auch die 17 schwächeren MRT-Geräte kleiner 1 T dazu, erhält man eine Niobmenge von insgesamt ca. 8.850 kg (Tabelle 98).

Tabelle 98: Quantifizierter Fluss und Lager der NMR-Geräte im Prozess „Industrie und Gewerbe“ im System Niob in Österreich (2011)

MRT-Geräte		Niob [t]
MRT	Input-Fluss	$0,1 \pm 0,03$
MRT	Lager	$8,75 \pm 2,19$

Laut Du und Graedel (2011) liegt die Einsatzdauer eines MRT-Geräts bei 10 Jahren. Das ergibt mit den vorliegenden Zahlen und unter der Annahme eines statischen Lagers (Input = Output) ein errechnetes Anfallpotenzial von 18 MRT-Geräten pro Jahr und damit auch einen entsprechenden gleich großen jährlichen Inputfluss (plus die zwei MRT-Geräte, die tatsächlich 2011 dazugekommen sind). Da vom Bundesministerium für Gesundheit jährlich die Anzahl der betriebenen Geräte erhoben wird, nicht aber, ob ein Geräte-Austausch

erfolgte, liegen dazu bezogen auf Österreich keine Informationen vor. Dieser eventuelle Austausch von 18 MRT-Geräten im Jahr 2011 findet hier keine Berücksichtigung, da dieser einerseits in keiner Weise bestätigt ist, andererseits es auch keine Auswirkungen hat, weil die eventuell anfallenden Alt-MRTs in der Regel zum Erzeuger zurückgehen. Bei einem möglichen Austausch von MRTs heben sich der Import der neuen Geräte und der Export der alten Geräte (zum Hersteller) in Bezug auf die Niob-Bilanz Österreichs auf. Zusätzlich lässt sich anmerken, 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.

### 2.2.1.3 Münzen

Eine speziell in Österreich auftretende Verwendung von Niob ist die Herstellung von 25-Euro-Bimetallmünzen (Tabelle 99) aus Silber und Niob, deren Prägung seit 2003 von der Münze Österreich erfolgt. Der Niobkern der Münze wird bei jeder Auflage, also jedes Jahr, durch anodische Oxidation gefärbt, wobei durch unterschiedliche Oxidschichtdicken verschiedene Lichtbrechungen und damit andere Farbreflexe zustande kommen. Das Technologiezentrum Plansee der Planseewerke in Reutte in Tirol entwickelte diese Methode der Anodisierung, welche die Niobkerne auch nach wie vor hergestellt.

Tabelle 99: Darstellung der Mengen von 25-Euro-Bimetallmünzen

Thema	Erscheinungsjahr	Auflage	Farbe des Niobkerns	Gewicht des Nb-Kerns [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
Tunnelbau	2013	65.000	eisblau	6,5

Der Ring der Bimetallmünzen 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.

Tabelle 100: Quantifizierte Flüsse und Lager der NMR-Geräte im Prozess „Industrie und Gewerbe“ im System Niob in Österreich (2011)

Münzen		Niob [t]
Reines Niob	Input-Fluss	15,42 ± 3,5 davon 0,4225 (± 0) für Münzen
Münzkerne	Fluss innerhalb „Industrie und Gewerbe“	3,757
Münzen	Output-Fluss zu „Private Haushalte“	0,4225

#### 2.2.1.4 Superlegierungen

Auch zur Herstellung von Superlegierungen findet Ferroniob – aber auch Nickelniob – in der metallurgischen Industrie Verwendung. Dies sind hochwarmfeste Werkstoffe komplexer Zusammensetzung (Nickel-, Cobalt- und Eisenbasislegierungen mit Zusätzen anderer Elemente wie z.B. Niob). Der Name Superlegierung deutet darauf hin, dass ihre Einsatztemperaturen höher liegen als jene von Stählen, weil sie mit steigender Temperatur nicht so rasch an Festigkeit verlieren (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 der Luft- und Raumfahrt.

In diesem Bereich ist die Datenlage im Vergleich zu Niob in der Stahlindustrie, wo 90–95 % des Niobs 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.

### 2.2.2 Private Haushalte und Infrastruktur

Für die Erfassung und Darstellung der Niobmengen und -flüsse in diesem Prozess fanden die Untersysteme „Stahl“, „Münzen“, „Schmuck“ und „Elektrolytkondensatoren“ nähere Betrachtung.

#### 2.2.2.1 Stahl

Da sich Nb-hältige Stähle in allen Prozessen der SFA für Niob in Österreich finden, wird das gesamte System dieser Stähle im Kapitel 2.2.1.1 „Stahl“ im Prozess „Industrie und Gewerbe“ beschrieben. Dort finden sich auch die quantifizierten Flüsse und Lager und deren Herleitungen.

Der Prozess „Bauwerke und Pipelines“ liegt im Subsystem „Private Haushalte und Infrastruktur“. Niob ist in Stählen in großer Menge in zahlreichen Bauwerken „gespeichert“, das heißt diese 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 und Infrastruktur“ hinein als auch aus ihm heraus.

Baustähle und Nb-hältige Stähle für die Infrastruktur (vor allem für Pipelines, aber 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 machte, ließen sich diese Flüsse hier allesamt nicht quantifizieren. Allein der Fluss der Stähle für die Infrastruktur von Industrie und Gewerbe (von den Stahlwerken) zu den privaten Haushalten war anhand der Umsatzzahlen der Voestalpine aus deren Geschäftsbericht abschätzbar (vgl. Kapitel 2.2.1.1 „Stahl“ im „Prozess Industrie und Gewerbe“).

Sowohl die Niob-Lager in Bauwerken als auch jene in Pipelines ließen sich nicht quantifizieren, da der Nb-Gehalt stark schwankt und dazu keine konkreten Informationen öffentlich vorliegen. Die hier in Tabelle 101 angeführten Lagerzuwächse für Bauwerke und Pipelines stammen aus den Nb-hältigen Stählen, die in Österreich als Baustähle produziert und nicht exportiert und wie oben beschrieben abgeschätzt wurden. Diese sind nicht als endgültige Daten anzusehen, da die gesamten Lagerzuwächse inklusive importierter Baustähle (die sich nicht quantitativ abschätzen ließen) höher sein dürften. Ähnlich verhält es sich mit den Output-Flüssen von Bauwerken (Baurestmassen) und Pipelines: Mangels Informationen über den tatsächlichen Nb-Gehalt waren diese Flüsse nicht quantifizierbar.

Tabelle 101: Quantifizierte Flüsse und Lager der Nb-hältigen Stähle im Prozess „Private Haushalte und Infrastruktur“ im System Niob in Österreich (2011)

<b>Stahl</b>		<b>Niob [t]</b>
Stähle für Infrastruktur	Fluss von „Industrie und Gewerbe“	81 ± 11
Baustähle	Fluss innerhalb von „Private Haushalte und Infrastruktur“	40 ± 9
Pipelinestähle	Fluss innerhalb von „Private Haushalte und Infrastruktur“	41 ± 9
Bauwerke	Lager	+ 40 ± 9
Pipeline	Lager	+ 41 ± 9

### 2.2.2.2 Münzen

Die im Kapitel 2.2.1.3 „Münzen“ beschriebenen 25-Euro-Bimetallmünzen aus Silber und Niob stellen einen Importfluss in die privaten Haushalte vom Prozess „Industrie und 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 in Umlauf gelangen, findet sich im Kapitel 2.2.1.3 „Münzen“. Ähnlich wie beim Schmuck lässt sich auch bei diesen davon ausgehen, dass ihre Lebensdauer praktisch unlimitiert ist und sie nur aus Versehen und vereinzelt in der Abfallwirtschaft landen. Ob bzw. wie viele Münzen ins Ausland gehen und wie viele im Inland verbleiben, ist nicht angebar.

Tabelle 102: Quantifizierter Fluss und Lager der Nb-hältigen Münzen im Prozess „Private Haushalte und Infrastruktur“ im System Niob in Österreich (2011)

Münzen		Niob [t]
Münzen	Input-Fluss von "Industrie und Gewerbe"	0,42
Münzen	Lager	3,33 + 0,42

### 2.2.2.3 Schmuck

In der Schmuckherstellung findet Niob als Legierungszusatz in kleinsten Mengen Verwendung. Wegen seines bläulichen Schimmers eignet sich Niob in diesem Segment auch als Hauptmetall, vor allem 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 Ressourcenpotenzial 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 lässt sich daher nur bedingt als Sekundärrohstoffquelle ansehen. Hinzu kommt, dass nicht abschätzbar ist, wie viel von diesem von Verbrauchern selber aus dem Ausland importiert wird.

### 2.2.2.4 Elektrolytkondensatoren

Ein Elektrolytkondensator ist ein gepolter Kondensator, dessen Anoden aus einem Metall (Ventilmetall) besteht, die Kathode wird durch einen Elektrolyten gebildet. Eine dünne Oxidschicht auf der metallischen Anode bildet das Dielektrikum des Kondensators, die durch Elektrolyse (anodische Oxidation) entsteht. 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) gibt es Forschungsarbeiten zur Möglichkeit, Niob auch für Kondensatoren zu nutzen. Dafür muss die Reinheit von Niob in Verbindung mit der notwendigen großen Oberfläche noch

verbessert werden. Keramik- und Aluminium-Kondensatoren stellen bereits eine Konkurrenz zu Tantal-Kondensatoren dar.

Niob- und industrielle Tantal-Elektrolytkondensatoren können sich im direkten Wettbewerb messen, da ihre Eigenschaften – allen voran die Leistungsfähigkeit – vergleichbar sind. So besitzen sie z.B. ähnlich hohe Speicherdichten wie jene aus Tantal. Jedoch ist der angebotene Kapazitätsbereich bei Niob-Kondensatoren mit einem Nennspannungsbereich von max. 10–25 V vergleichsweise klein, wodurch sie sich für Bauteile, die besonders zuverlässig arbeiten müssen (wie Flugzeuge, Autos, Medizintechnik etc.), weniger eignen als Tantal-Kondensatoren, die bei Betriebsspannungen von bis zu 60 V stabil bleiben. 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 ersetzen, solange der Schwerpunkt auf dem Preis der Rohstoffe liegt.

### **2.2.3 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 2.2.2.1 „Stahl“ dargelegt, ist die in Baurestmassen enthaltene Menge an Niob-hältigen Stählen nicht quantifizierbar. Qualitativ lässt sich angeben, 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, Nb-hältige Stähle aus den gemischten Schrotten zu separieren, getrennt einzuschmelzen und wieder zu Nb-hältigen Stählen zu verarbeiten. Die dissipative Methode, alle Schrotte gemeinsam einzuschmelzen macht eine spätere Rückgewinnung oder gezielte Wiederverwertung von Niob unmöglich. Durch diese Nutzung und die gemischt anfallenden Schrotte spielt Niob derzeit in der Abfallwirtschaft keine wirtschaftliche Rolle, woraus auch resultiert, 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, wie es auch praktiziert wird – allerdings nicht von der Abfallwirtschaft, sondern in geschlossenen 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. Dabei lässt sich anmerken, dass die hier umgesetzten Mengen an Niob im Vergleich zu denen in der Stahlindustrie sehr gering sind (vgl. Abbildung 64).

Selbst bei einem Deponierückbau wäre eine Abtrennung von Niob-Stählen praktisch ausgeschlossen, da sich diese wiederum nur durch chemische Analysen identifizieren lassen. Das Niob-Lager in Deponien ließe sich abschätzen, indem man die aus Landfill-

Mining erhaltenen Daten zu Stahlmengen auf Deponien mit einem geschätzten durchschnittlichen Niob-Anteil in Stählen verknüpft.

## 2.3 Palladium

Für die Stoffflussanalyse des Edelmetalls Palladium in Österreich sind vor allem die Bereiche „Private Haushalte“, „Industrie und Gewerbe“ sowie „Abfallwirtschaft“ von Bedeutung und werden daher nachfolgende näher erläutert.

### 2.3.1 Private Haushalte

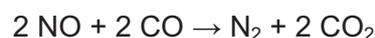
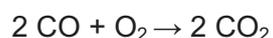
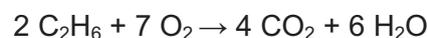
In den Gegenständen und Produkten der privaten Haushalte befindet sich Palladium in nennenswerten Mengen in KFZ-Abgaskatalysatoren, elektrischen bzw. elektronischen Geräten, Münzen, Schmuck und wird darüber hinaus auch in der Dentaltechnik verwendet.

#### 2.3.1.1 KFZ-Abgaskatalysatoren

Die Erfindung des KFZ-Katalysators erfolgte bereits in den 1950er-Jahren. Ab den 1970er-Jahren wurde er zunächst in den USA und in Japan aufgrund der dort herrschenden Smog-Problematik eingeführt. Die Katalysatoren für die Abgasreinigung von Kraftfahrzeugen enthalten die Platingruppenmetalle Platin (Pt), Palladium (Pd) und Rhodium (Rh), wobei zunehmend Palladium das teurere Platin ersetzt. Durch die Abgasgesetzgebung stieg ab ca. 1980 der jährliche Gesamtbedarf an Platingruppenmetallen (PGM) für Autokatalysatoren kontinuierlich an. In Österreich besteht seit 01.01.1987 für alle Neuwagen über 1.500 cm<sup>3</sup>, seit 01.01.1988 auch für alle übrigen neuen Kraftfahrzeuge mit Benzinmotor eine Katalysatorpflicht. Seit 01.01.1995 werden Kraftfahrzeuge ohne Katalysator mit einer höheren Kfz-Steuer belegt. Laut ÖAMTC verwendeten Ende 2011 95 % aller in Österreich zugelassenen Benzinfahrzeuge einen Katalysator.

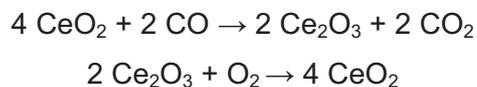
Über die Hälfte der primär produzierten Menge an Palladium (auch bei Pt sind es über 40 %) geht in die Produktion von Kfz-Katalysatoren [Angerer et al. 2009, Kristof et al. 2010]. Da Pd auch als Elektrodenwerkstoff für Zündkerzen und in Lamda-Sonden zum Einsatz kommt, stellt die Fahrzeugbranche eindeutig den Hauptabnehmer für Palladium dar.

Fahrzeugkatalysatoren sollen durch Oxidation bzw. Reduktion die schädlichen Substanzen Kohlenwasserstoffe (C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>), Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxide (NO<sub>x</sub>) in die ungiftigen Gase Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Wasser (H<sub>2</sub>O) und Stickstoff (N<sub>2</sub>) umwandeln.



Die 3-Wege-Katalysatoren bei Benzinmotoren reduzieren hierzu gleichzeitig die Stickoxide und die Kohlenwasserstoffe und oxidieren das Kohlenmonoxid, während die Oxidationskatalysatoren bei Dieselmotoren die Kohlenwasserstoffanteile an den Russpartikeln mit Hilfe des Luftsauerstoffes im Dieselabgas reduzieren.

Die 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 seine hohe Rauigkeit zur Oberflächenvergrößerung beiträgt und aus Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und Sauerstoffspeicherkomponenten, wie z.B. Cer(IV)-oxid ( $\text{CeO}_2$ ), besteht. Cer(IV)-oxid reagiert mit CO zu Cer(III)-oxid ( $\text{Ce}_2\text{O}_3$ ) und  $\text{CO}_2$ , bei Sauerstoffüberschuss im Abgas wird das Cer(III)-oxid wieder regeneriert:



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

Laut Hagelüken (2008) ist in der Fahrzeugflotte ein Vielfaches der Weltminenproduktion an Platingruppenmetallen 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. (2010) einen Palladium-Bedarf von ca. 2,3 g pro Auto an, wobei sich dieser Wert nicht nur auf den Katalysator, sondern auch auf das Palladium in Zündkerzen, Lambda-Sonden, 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.

Die Menge der einzelnen PGMs in Kfz-Katalysatoren unterliegt einem ständigen Wandel: Bei den ersten Katalysatoren wurde vor allem Platin in Kombination mit Rhodium als katalytisch aktive Substanzen eingesetzt. Durch weitere Entwicklungen ließ sich Platin in Katalysatoren für Benzinmotoren zum Teil durch das billigere Palladium ersetzen. 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 der Abbildung 93 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 Dieselmotoren gebaut wurden.

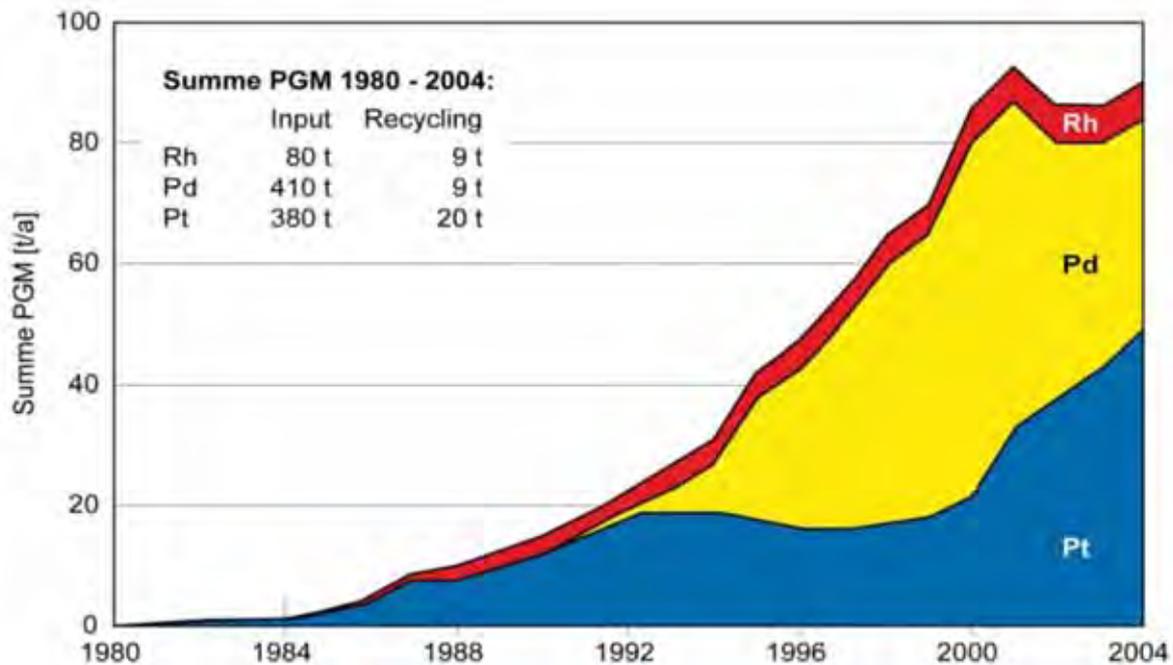


Abbildung 93: Bruttobedarf an Platin, Palladium und Rhodium für Autokatalysatoren in Europa  
[Hagelüken et al. 2005]

Da die genaue Zusammensetzung der einzelnen Katalysatoren der PKWs, die 2011 als Alt-Fahrzeuge anfielen, nicht bekannt ist, wird hier versucht, sich dem wahren Wert folgendermaßen anzunähern: Es fand der Durchschnitt der Angaben aus der Literatur und von Experten zum Gehalt an Platingruppenmetallen eines Katalysators (2 g, 5 g bzw. 2–4 g) sowie die Annahme, dass in etwa die Hälfte der enthaltenen Platingruppenmetalle Palladium darstellt, Verwendung. So resultierte ein Palladiumgehalt von  $1,7 \pm 0,4$  g pro Katalysator.

Mag. Michael Schiller von der Wirtschaftskammer Wien gab folgende österreichische Unternehmen als Katalysatorenhersteller an, welche 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, etc. und Spezialist für Katalysatoren)

Auch auf die 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 erfolgt aber auch der Zusammenbau einiger weniger Autotypen in Österreich. 2011 waren dies vier Pkw-Typen:

- 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 exportiert wurden. Von den 750 in Österreich verbliebenen Pkw erfolgte 2011 für 108 PKWs eine Anmeldung. Bei der Statistik Austria finden sich „online“ in der Rubrik Energie, Umwelt, Innovation, Mobilität – Verkehr – Straße zahlreiche Daten zu den Kraftfahrzeugen aus den Jahren 2007–2011. Hier sind die Statistiken zum KFZ-Bestand und den Neu- und Gebrauchtzulassungen (Tabelle 103) besonders relevant.

Tabelle 103: Daten zum PKW-Bestand und den Neu- und Gebrauchtzulassungen von der Statistik Austria, PKW-Abmeldungen wurden daraus berechnet

Typ	PKW-Bestand 2010	Neuzulassungen 2011	Gebrauchtzulassungen 2011	PKW-Bestand 2011	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

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

Die Alt-PKW-Abmeldungen bezeichnen hier die „endgültig“ abgemeldeten PKWs. Es handelt sich also um PKWs, die danach nicht mehr in Österreich angemeldet waren. Ihre Anzahl

belief sich 2011 auf 283.751 (Tabelle 104) und lässt sich wie folgt aus obigen Daten der Statistik Austria berechnen: Alt-PKW-Abmeldungen 2011 = PKW-Abmeldungen 2011 – PKW-Gebrauchtzulassungen 2011

Tabelle 104: Daten zu den „endgültigen“ PKW-Abmeldungen, berechnet aus Daten von der Statistik Austria

Typ	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

Eine mögliche Erklärung für die negativen Zahlen, welche in Tabelle 104 bei den Antriebsarten Benzin/Flüssiggas, Benzin/Erdgas und Elektro + Flüssiggas + Erdgas auftreten, könnte sein, dass vielleicht Besitzer ihre Autos mit „konventionellen“ Antrieben (Diesel oder Benzin) mit Umrüstsätzen auf Flüssig- oder Erdgas umbauen. Weiters gibt es ein „Statistikjahrbuch des Fachverbandes der Fahrzeugindustrie Österreichs“ [WKO 2012], in dem eine große Menge an Daten zur Verfügung gestellt wird, unter anderen Rahmendaten zur Fahrzeugindustrie und zur Struktur der österreichischen Fahrzeugindustrie. Dieser Fachverband ist ein Teil der Wirtschaftskammer Österreich (WKO) und beschreibt sich selbst als die gesetzliche Interessenvertretung jener Betriebe, welche 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, welcher aber über die „online“ zur Verfügung stehenden Daten hinaus keine weiteren hier verwertbaren Daten lieferte. Die Abteilung für Außenhandel bietet die Möglichkeit, 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 (Tabelle 105) aus der Außenhandelsstatistik über die Jahre 2008–2011 zur Verfügung gestellt, welcher die Import- und Exportzahlen von neuen als auch gebrauchten Personenkraftwagen einschließlich Kombis abbildet.

Tabelle 105: Daten zum österreichischen Import und Export von neuen PKWs im Jahr 2011 vom Fachverband der Fahrzeugindustrie Österreichs aus deren Außenhandelsdatenbank

	<b>Personenkraftwagen einschl. Kombi 8703 – Gliederung nach HS/KN-Positionen</b>	<b>Einfuhr 2011</b>	<b>Ausfuhr 2011</b>
87031011	Schneespezialfahrzeuge(Motorschlitzen) mit Kolbenverbrennungsmotor	383	286
87031018	Spezialfahrzeuge zur Personenbeförderung mit anderem Motor	2.016	300
87032110	PKWs mit Hubkolbenverbrennungsmotor neu, ≤ 1.000 cm <sup>3</sup> , Rennwagen	9.874	628
87032210	PKWs mit Hubkolbenverbrennungsmotor neu, > 1.000–1.500 cm <sup>3</sup>	114.036	10.833
87032311	Wohnmobile mit Hubkolbenverbrennungsmotor neu, > 1.500–3.000 cm <sup>3</sup>	19	5
87032319	PKWs mit Hubkolbenverbrennungsmotor neu, > 1.500–3.000 cm <sup>3</sup>	59.122	79.571
87032410	PKWs mit Hubkolbenverbrennungsmotor neu, > 3.000 cm <sup>3</sup>	2.516	5.893
87033110	PKWs mit Verbrennungsmotor mit Selbstzündung neu, ≤ 1.500 cm <sup>3</sup>	24.279	3.049
87033211	Wohnmobile mit Verbrennungsmotor mit Selbstzündung neu, > 1.500–2.500 cm <sup>3</sup>	439	17
87033219	PKWs mit Verbrennungsmotor mit Selbstzündung neu, > 1.500–2.500 cm <sup>3</sup>	177.999	53.821
87033311	Wohnmobile mit Verbrennungsmotor mit Selbstzündung neu, > 2.500 cm <sup>3</sup>	187	18
87033319	PKWs mit Kolbenverbrennungsmotor mit Selbstzündung neu, > 2.500 cm <sup>3</sup>	17.649	8.714
	Summe	408.651	163.135

Die Summe der laut Tabelle 105 im Jahr 2011 importierten Neufahrzeuge (408.651 PKWs) unterscheidet sich nur geringfügig von der Anzahl der 2011 importierten Personenkraftwagen inkl. Fahrgestelle und Karosserien für die industrielle PKW-Montage (408.215 PKWs) – ebenfalls vom Fachverband der Fahrzeugindustrie (WKO 2012). Als Quelle wird hier „Der Außenhandel Österreichs“ von der Statistik Austria angegeben – die Differenz beträgt lediglich 436 PKWs. In dieser Stoffflussanalyse findet der Wert 407.901 für die im Jahr 2011 nach Österreich importierten PKWs Verwendung. Er stammt ebenfalls vom Fachverband der Fahrzeugindustrie [WKO 2012] und versteht sich abzüglich der Fahrgestelle und Karosserien für die industrielle PKW-Montage.

Die Summe der laut Tabelle 105 im Jahr 2011 exportierten PKWs beinhaltet mit 163.135 Stück die 129.661 in Österreich produzierten und exportierten PKWs. Zieht man diese ab, kommt man auf 33.474 PKWs, die zwar nicht in Österreich zusammengebaut, aber trotzdem neu exportiert werden. Wer diese neuen PKWs importiert und sie als neue PKWs wieder

exportiert, darüber konnten die Befragten weder beim Fachverband der Fahrzeugindustrie der WKO noch bei der Statistik Austria Auskunft geben.

Vergleicht man nun gemäß Tabelle 106 eingangsseitig die neu importierten (407.901) und die in Österreich produzierten und nicht exportierten PKWs (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 Personenkraftwagen von 19.032, die in Österreich gelagert, aber (noch) nicht angemeldet sind. Dieser Zuwachs im Lager der neuen PKWs ist schwer erklärbar, da sich nach dieser Art der Berechnung auch im Jahr 2010 eine ähnliche Größenordnung ergeben hätte (~ 30.000 PKWs).

Tabelle 106: Bestand an PKWs der Klasse M1 nach Antriebsart [WKO 2012, Statistik Austria 2012]

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

Die Tabelle 107 zeigt die Im- und Exportdaten für gebrauchte PKWs, welche ebenfalls vom Fachverband der Fahrzeugindustrie der WKO stammen.

Tabelle 107: Daten zum österreichischen Import und Export von gebrauchten PKWs im Jahr 2011 vom Fachverband der Fahrzeugindustrie Österreichs aus deren Außenhandelsdatenbank

	<b>Personenkraftwagen einschl. Kombi 8703 – Gliederung nach HS/KN-Positionen</b>	<b>Einfuhr 2011</b>	<b>Ausfuhr 2011</b>
87032190	PKWs mit Hubkolbenverbrennungsmotor gebraucht $\leq 1.000 \text{ cm}^3$ , Rennwagen	205	802
87032290	PKWs mit Hubkolbenverbrennungsmotor gebraucht, $>1.000\text{--}1.500 \text{ cm}^3$	1.192	5.254
87032390	PKWs mit Hubkolbenverbrennungsmotor gebraucht, $> 1.500\text{--}3.000 \text{ cm}^3$	342	5.924
87032490	PKWs mit Hubkolbenverbrennungsmotor gebraucht, $> 3.000 \text{ cm}^3$	623	767
87033190	PKWs mit Verbrennungsmotor mit Selbstzündung gebraucht, $\leq 1.500 \text{ cm}^3$	590	1.089
87033290	PKWs mit Verbrennungsmotor mit Selbstzündung gebraucht, $> 1.500\text{--}2.500 \text{ cm}^3$	11.872	17.138
87033390	PKWs mit Kolbenverbrennungsmot. mit Selbstzündung gebraucht, $> 2.500 \text{ cm}^3$	1.964	2.211
	Summe	16.788	33.185

Die Summe der nach Tabelle 107 im Jahr 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 PKWs). Die importierten PKWs 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 PKWs weniger im Import. Welche Zahl von beiden eher der Wahrheit entspricht, lässt sich hier nicht eindeutig entscheiden. Es wurde der offiziell auf der Homepage des Fachverbandes der Fahrzeugindustrie in deren Statistikjahrbuch publizierte Wert – 20.020 gebrauchte importierte Pkw – verwendet.

Im Bundesabfallwirtschaftsplan [BAWP 2011] des Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft 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, das heißt 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.“

Saurat und Bringezu (2009) gehen 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. Der Leiter eines österreichischen Schredderunternehmens schätzte die Exportrate von in Österreich nicht mehr zugelassenen Autos („Altfahrzeugen“) ebenfalls auf 75 %. Hier geht es vor allem um Fahrzeuge, welche 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 Schredder-Unternehmen selbst ihre Daten ein. Er veröffentlichte im VDI-Vortrag „Aktuelle Situation der SLF- und Altfahrzeugverwertung in Österreich“ im Juni 2012 die in Tabelle 108 angeführten Daten:

Tabelle 108: Veränderungen des PKW-Bestands in Österreich im Jahr 2011

<b>PKW-Bestand Ende 2010</b>	<b>Neuwagen 2011</b>	<b>Gebraucht- Wagen 2011</b>	<b>Verschrottung/ Export 2011</b>	<b>PKW-Bestand Ende 2011</b>
4.441.000	356.000	802.500	284.000	4.513.000 = PKW-Bestand Ende 2010 + 72.000

Die Zahlen in Tabelle 108 stammen von der zentralen Zulassungsstelle, Statistik Austria, WKO (Fahrzeughandel) und eigenen Berechnungen der Importeure. Die Zahl von 284.000 verschrotteten/exportierten KFZs ist bereits von den diversen Tagesanmeldungen etc. bereinigt, denn die Berechnung dafür lautet: Das Kraftfahrzeug ist älter als 10 Jahre, wurde in Österreich abgemeldet und länger als 6 Monate nicht mehr angemeldet. Diese Daten aus Tabelle 108 decken sich mit den Zahlen von der Statistik Austria und den daraus selbst errechneten in Tabelle 103.

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 Schredderbetrieb Thyssen/Dück verwertet. Er schätzte auch, dass jährlich max. 300 Altfahrzeuge (legitim) ins Ausland verbracht werden, um z.B. in einem anderen Land geschreddert zu werden. Diese Anzahl dieser (legitim) exportierten und im Ausland verwerteten Altfahrzeuge käme zu den 80.004 dazu, so resultieren daraus etwa 80.300 Altfahrzeuge, die in Österreich 2011 als solche angefallen sind und einer Verwertung im In- oder Ausland zugeführt wurden. Frau Mag. Pia Kleihns von ÖCAR Automobilrecycling GmbH gibt an, dass im Jahr 2011 österreichweit die Zurücknahme von 79.944 Altfahrzeugen erfolgte, woraus eine gute Übereinstimmung mit der Zahl von Ing. Kletzmayr (80.003 Altfahrzeuge) resultiert. Andere Ergebnisse lieferten 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 eingebracht. Dazu kamen noch 9.924 Altfahrzeuge, welche die Hersteller bzw. Importeure über ihre Rücknahmestellen übernahmen und 268 Altfahrzeuge, die im Wege der Anfallstellenmeldung im EDM gemeldet wurden.“

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

In den 80.004 in „altauto.at“ aufgezeichneten Altfahrzeugen waren 471.856 kg Katalysatoren verbaut, die eine stoffliche Verwertung fanden. Das Durchschnittsalter der 2011 verarbeiteten Altfahrzeuge lag bei 17,4 Jahren. Laut Ing. Kletzmayr finden derartige Altersauswertungen seit 1992 statt, wobei das Durchschnittsalter der verwerteten Altfahrzeuge nie unter 16 Jahren lag. Einerseits ist daraus ableitbar, dass der Fuhrpark Österreichs sich als überaltert bezeichnen lässt (in Österreich hieß die staatliche finanzielle Entschädigung für das Verschrotten eines Kraftfahrzeugs 2009 „Ökoprämie“, in anderen Ländern war das die „Verschrottungsprämie“), andererseits stellt dies natürlich auch eine Folge des Altfahrzeug-Schwundes dar, welcher im Folgenden näher erläutert wird. Dazu kommen Katalysatoren, die beim Einbringen in die Verwertungskette nicht mehr vorhanden waren. Diese „bei Übernahme fehlenden Bauteile“ werden erfasst und sind in Summe in

Abzug zu bringen, 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 zur Verwertung gelangten. Diese Zahl ergibt sich aus einer Stückzahl von 13.110 und dem durchschnittlichen Katalysatorgewicht von 7 kg. Insgesamt ergeben sich also 563.626 kg Katalysatoren (80.518 Stück). Dazu kommen noch die von Ing. Kletzmayr geschätzten max. 300 Altfahrzeuge, die jährlich (legitim) ins Ausland gelangen, um dort einer stofflichen Verwertung zugeführt zu werden. Nimmt man an, dass drei Viertel dieser Fahrzeuge Benzin- und ein Viertel Dieselfahrzeuge (die vor allem im Fall von älteren Baujahren im Allgemeinen nicht mit einem Katalysator ausgerüstet waren) darstellten, lässt sich von ca. 225 Katalysatoren ausgehen. So resultieren insgesamt ca. 80.743 Kats, die (in Österreich oder im Ausland) offiziell und legal verwertet wurden. Die Annahme, dass drei Viertel der Altfahrzeuge Benzin als Treibstoff nutzen, findet im Folgenden noch eine nähere Beschreibung. 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 PKWs gegenüber, fehlen hier rund 203.000 Stück. Diese in Österreich fehlenden Altfahrzeuge gelangten zum Großteil ins Ausland, wo sie allerdings keine gezielte Verwertung, sondern eine anderweitige Verwendung fanden. Diese erhalten aus österreichischer Sicht die Bezeichnung „Altfahrzeug-Schwund“. Bei der Betrachtung der ARGE Schredder fand jedoch allerdings folgende Zahlen (Tabelle 109) der Statistik Austria zum Import und Export gebrauchter Fahrzeuge keine Beachtung.

Tabelle 109: Bestand an PKWs der Kl. M1 nach Antriebsart [WKO 2012, Statistik Austria 2012]

<b>Gebrauchte PKWs</b>	
Fahrzeugimporte	Fahrzeugexporte
20.020	33.267

Da 20.020 gebrauchte Pkw importiert und 33.267 exportiert wurden, ergibt sich daraus eine Differenz von 13.247 Personenkraftwagen. Von den 203.000 „fehlenden“ Pkw lassen sich also noch rund 13.000 abziehen, deren Export offiziell erfolgte, woraus sich ein sogenannter Altfahrzeug-Schwund von rund 190.000 Pkw-Altfahrzeugen ergibt.

Nun ist noch die Aufteilung der Altfahrzeuge in Benzin- und Dieselfahrzeuge genauer zu betrachten. Wie bereits im Vorhergehenden näher ausgeführt, besteht in Österreich seit 01.01.1988 für alle neuen Kraftfahrzeuge mit Benzinmotor eine 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 derartigen Fahrzeuge mit einem Katalysator ausgestattet. Für dieselpetriebene KFZs schreibt der

Gesetzgeber bislang keine Katalysatoren vor. Allerdings sind auch von diesen die Emissionsgrenzwerte nach den jeweils gültigen Euro-Abgasnormen (aktuell ist die Euro 5 in Kraft, welche für Erstzulassungen ab 01.01.2011 gilt) zu erfüllen, weshalb neue Dieselfahrzeuge zur Einhaltung dieser Werte einen (Oxidations-)Katalysator benötigen. Nach Angaben von Frau Mag. Eva-Maria Steinbacher vom Verkehrsclub Österreich (VCÖ) war bis Jahresende 2011 in Österreich nur jeder dritte Diesel-PKW serienmäßig mit einem Partikelfilter ausgerüstet. Da es sich bei den 2011 in Schreddern verwerteten Alt-PKWs aber um Fahrzeuge mit einem Durchschnittsalter von 17,4 Jahren handelte (Angaben der ARGE Schredder, siehe weiter oben), ist davon auszugehen, dass die Benzinfahrzeuge, welche endgültig aus dem Verkehr gezogen wurden, einen Katalysator eingebaut hatten, die Dieselfahrzeuge allerdings mit nichts Vergleichbarem ausgestattet waren. Nun muss noch die Verteilung Benzin-/Dieselfahrzeuge (Abbildung 94) in der Menge der rund 190.000 Altfahrzeuge (Altfahrzeug-Schwund), abgeschätzt werden.

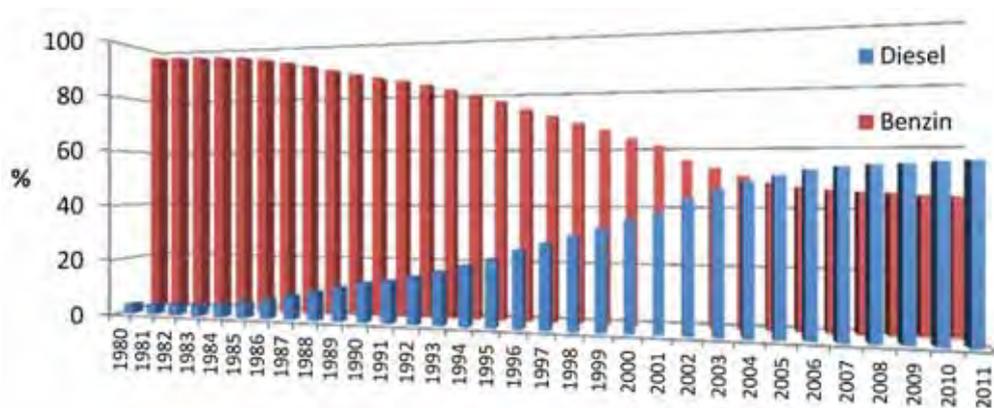


Abbildung 94: Bestand an Personenkraftwagen der Klasse M1 in den Jahren 1980–2011 nach Antriebsart [WKO 2012]

Fahrzeuge, die das Durchschnittsalter von 17,4 Jahren aufweisen, stammen aus dem Jahr 1995. Zu der Zeit standen sich 2.766.911 Benzin- und 826.540 Diesel-PKWs gegenüber, woraus ein Verhältnis von 3,35 resultiert (siehe Tabelle 110). Nimmt man nun an, dass drei Viertel der Altfahrzeuge benzinbetrieben sind, und weiter, dass diese alle einen Katalysator eingebaut haben bzw. hatten, ergeben sich aus den rund 190.000 Altfahrzeugen, die als Fahrzeug-Schwund bezeichnet wurden, ca. 142.500 Katalysatoren.

Tabelle 110: Bestand an PKWs der Klasse M1 nach Antriebsart [WKO 2012, Statistik Austria 2012]

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

Vergleicht man eingangsseitig die neu importierten (407.901) und die in Österreich produzierten und nicht exportierten PKWs (750) ausgangsseitig mit den neu exportierten (163.135) und neu zugelassenen Autos (356.145), so ergibt sich daraus für das Jahr 2011 ein Lagerzuwachs von 19.032 neuen Personenkraftwagen. Zusammenfassend fanden sich 2011 rund 80.750 verwertete Katalysatoren. Darüber hinaus gab es ca. 142.500 Katalysatoren in PKWs, die 2011 abgemeldet und nicht mehr angemeldet, aber allerdings keiner Verwertung (im In- oder Ausland) zugeführt wurden. Es ist anzunehmen, dass sich ein kleiner Teil davon im Lager von Privatpersonen befindet, der Großteil ging jedoch

wahrscheinlich in den Export. Weiters traten 2011 noch ca. 19.032 PKW-Neufahrzeuge (die Produktion von 750 dieser Autos erfolgte in Österreich) auf, bei denen es aber 2011 noch zu keiner Neuanmeldung kam. Letztendlich resultierten daraus die in Tabelle 111 zusammengefassten Flüsse und Lager an Palladium in den Autokatalysatoren in Österreich.

Tabelle 111: Quantifizierte Flüsse und Lager der KFZ-Katalysatoren im Prozess „Private Haushalte“ im System Palladium in Österreich (2011)

<b>KFZ-Katalysatoren</b>		<b>Palladium [kg]</b>
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 (Schredder)	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	3.700 + 260 ± 150

### 2.3.1.2 Elektronik und Elektrotechnik

Die wichtigste Anwendung von Palladium im Elektronikbereich sind Vielschichtkondensatoren (MLCC = Multi-Layer Ceramic Capacitor). Mit einer Jahresproduktion von rund einer Billion Stück sind sie die am häufigsten eingesetzten diskreten Kondensatoren in der Elektronik. Diese 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 ist die Zahl der benötigten MLCCs. Sie dienen der Speicherung von elektrischer Ladung und finden unter anderem zur Aufrechterhaltung eines gleichmäßigen Stromes in integrierten Schaltkreisen Verwendung.

Die Herstellung der Keramikkondensatoren erfolgt aus feingemahlenden Granulaten para- (z.B.  $\text{TiO}_2$ ) oder ferroelektrischer (z.B.  $\text{BaTiO}_3$ ) Pulvergemische, welche 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  $\mu\text{m}$  und wird durch die Korngröße des keramischen Stoffes nach unten begrenzt. Durch Metallisierung entstehen auf den Keramikträger die Elektroden des Kondensators. Keramik-Vielschichtkondensatoren bestehen aus einer Vielzahl von übereinander gestapelten, einseitig metallisierten Keramikkondensatoren, deren gemeinsame Kontaktierung in Parallelschaltung über Anschlussflächen geschieht. Bis Ende der 1990er Jahre ließen sich wegen der hohen Sintertemperaturen von 1.200–1.400 °C

ausschließlich die nicht-oxidierbaren Edelmetalle Silber und Palladium zur Metallisierung der Elektroden und Anschlussflächen verwenden. Im Endbericht des Projektes MaRes [Kristof et al. 2010] wurden als typisches Ag/Pd-Verhältnis der 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, findet zum Teil deren Ersatz durch eine BME-Metallisierung (base metal electrode), die vor allem Nickel und in geringerem Maße auch Kupfer enthält, statt. Da aber Edelmetall-Elektroden über besondere Eigenschaften verfügen – sie sind z.B. nichtmagnetisch und weisen ein besseres Impedanzverhalten auf – werden sie vor allem in hochwertigen Produkten auch weiterhin eingesetzt. Klasse-1-Kondensatoren (definierter Temperaturkoeffizient; dienen vor allem für elektrische Schaltkreisen mit hohen Anforderungen an die Frequenzgenauigkeit) nutzen nach wie vor die NME-Metallisierung, da hier die Konstanz der elektrischen Werte entscheidend ist und sich diese nur durch die Verwendung von Palladium gewährleisten lässt.

Obwohl MLCCs immer kleiner werden, überkompensiert der steigende Einsatz in elektronischen Anwendungen diesen Effekt [Bringezu et al. 2011], der Palladium-Bedarf nimmt dadurch insgesamt auch weiter zu. Verwendung finden MLCCs z.B. in Handys mit eingebautem Fotoapparat und in Vielkern-Prozessoren von PCs. Auch in Fernseh- und Computerbildschirmen sowie Laptops wird Palladium auf den Leiterplatten der Steuerungselektronik eingesetzt [Bringezu et al. 2011].

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

- Mobiltelefone
- Notebooks
- PC-Flachbildschirme
- LCD-TV-Flachbildschirme
- 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 2005]. Im Endbericht zum Projekt MaRes [Kristof et al. 2010] wird dieser Sachverhalt jedoch anders dargestellt.

### **Mobiltelefone**

Allgemeines über Mobiltelefone, die Stoffflüsse in Österreich und die durchschnittliche Lebensdauer finden sich im Kapitel 2.1.4.2 „Elektronik und Elektrotechnik“ im Unterkapitel

Mobiltelefone bzw. Smartphones. Im Endbericht zum Projekt MaRes [Kristof et al. 2010] wird folgende Übersicht zu Literaturangaben bezüglich des Gehalts an Palladium in Mobiltelefonen angeführt:

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

Buchert et al. (2012) publizierten folgende Palladiumgehalte pro Gerät:

- Mobiltelefon: 9 mg
- Smartphone: 11 mg

Hier fand die Extrapolation des Ergebnisses für ein 90 g schweres Mobiltelefon (ohne Akku), welches auf Analysen von Umicore basiert, auf ein durchschnittliches Smartphone mit 110 g (ebenfalls ohne Akku) statt. Da die Werte im Maress-Endbericht [Kristof et al. 2010] als Konzentrationen angegeben sind, werden im Folgenden die Zahlen von Buchert et al. (2012) als Durchschnittswert (10 mg pro Gerät) weiter verwendet.

Die Flüsse ungenutzter Handys und Althandys sowie das Nutzlager „Handys“ und das Lager „Althandys“ fanden bereits im Kapitel 2.1.4.2 „Elektronik und Elektrotechnik“ im Unterkapitel „Mobiltelefone bzw. Smartphones“ eine genauere Beschreibung und zahlenmäßige Herleitung.

Da 91 % der Österreicher ein Mobiltelefon besitzen, ergibt das bei 8,4209 Millionen Einwohnern eine Stückzahl von 7,924 Millionen  $\pm$  1,981 Mio. in den österreichischen Haushalten, welche in der SFA dem „Nutzlager“ entspricht. Im Jahr 2011 kamen 3,3 Millionen  $\pm$  825.000 in Österreich verkaufte Mobiltelefone als Input-Fluss ins Nutzlager neu hinzu. Die Zahl der ungenutzten Mobiltelefone im „Lager Althandys“ ließ sich auf (8,540  $\pm$  2,135) Mio. schätzen. Der Output-Fluss ins ungenutzte Lager („ungenutzte Handys“) ergibt sich über die mittlere Lebensdauer von 2  $\pm$  0,25 Jahren anhand des Anfallpotenzials mit 426.993  $\pm$  106.748 Mobiltelefonen. Als Althandys wird hier der Output-Fluss vom ungenutzten Lager zur Abfallwirtschaft bezeichnet. Anhand von Daten aus Deutschland beläuft sich dieser auf 5 %, woraus sich für Österreich 427.000  $\pm$  107.000 Mobiltelefone ergeben. Da 2011 durch die Ö3-Wundertüte 467.000 alte Handys gesammelt wurden (ein kleiner Teil des Erlöses der Ö3-Wundertüte kommt dem Soforthilfefonds von Licht ins Dunkel zugute), fand diese Zahl hier – als Minimum aller entsorgten Mobiltelefone – als Output-Fluss zur Abfallwirtschaft Verwendung. Daraus ergeben sich schließlich die in Tabelle 112 zusammengefassten Werte.

Tabelle 112: Quantifizierte Flüsse und Lager der Mobiltelefone im Prozess „Private Haushalte“ im System Palladium in Österreich (2011)

<b>Mobiltelefone</b>		<b>Palladium [kg]</b>
Mobiltelefone	Input-Fluss	33 ± 8,0
Ungenutzte Handys	Fluss innerhalb der privaten Haushalte	4,3 ± 1,1
Althandys	Fluss innerhalb der privaten Haushalte	4,7 ± 1,2
Elektroaltgeräte	Fluss zur Abfallwirtschaft	14 ± 1,8 davon 4,7 ± 1,2 in Althandys
Nutzlager Handys	Lager	(77 ± 19) + (29 ± 8,1)
Lager Althandys	Lager	85 +/- 21

## Notebooks

Allgemeines über Computer, die Stoffflüsse in Österreich und die durchschnittliche Lebensdauer finden sich im Kapitel 2.1.4.2 „Elektronik und Elektrotechnik“ im Unterkapitel Festplatten (HDD). Buchert et al. (2012) geben folgende Palladiumgehalte in Notebooks an:

Tabelle 113: Palladium in unterschiedlichen Leiterplatten von Notebooks (Buchert et al. 2012)

<b>Bauteil</b>	<b>Pd [mg/kg]</b>	<b>Pd [mg/Gerät]</b>
Hauptplatine	80	25
Speicherkarten	180	4
Kleine Leiterplatten	80	2
HDD	280	3
Optisches Laufwerk	70	2
Display	99	4
Gesamt	-	39

Den Palladiumgehalt einer Festplatte (HDD platter) geben Buchert et al. (2012) als äußerst gering mit < 0,1 mg pro Gerät an. Wie schon im Kapitel 2.1.4.2 „Elektronik und Elektrotechnik“ im Unterkapitel Festplatten (HDD) beschrieben, waren laut Statistik Austria (2011b) 78,1 % der österreichischen Haushalte im Jahr 2011 im Besitz (mind.) eines Computers. Der Endbericht des Projektes MaRess [Kristof et al. 2010] gibt für den Bereich der privaten Anwender einerseits an, dass Anfang 2008 35 % der privaten Haushalte in Deutschland über ein Notebook, Lap- oder Palmtop verfügten, andererseits wird dort auch eine absolute Anzahl von 13,5 Mio. Notebooks (Quelle: Destatis) angeführt. Bricht man diese beiden Angaben auf Österreich herunter, so resultieren im ersten Fall (mit 3.650.400 österreichischen Haushalten im Jahr 2011) rund 1.280.000 Notebooks, im zweiten Fall etwa 1.400.000, woraus ein Unterschied von ca. 110.000 Notebooks oder rund 8 % resultiert. In Ermangelung neuerer Zahlen aus Österreich findet der Mittelwert dieser beiden Ergebnisse weiteren Gebrauch. Da sich die Zahlen aus dem MaRess-Endbericht [Kristof et al. 2010] nur auf privat genutzte Notebooks beziehen (Quelle: Cemix 2011), kann davon ausgegangen

werden, dass der wahre Wert jedenfalls höher liegt. Weil mit den in der Software STAN verwendeten Standardabweichungen keine schiefen Verteilungen mit Abweichungen nur im positiven Bereich abbilden lassen, wurde hier dieser Wert 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. Auch bezüglich der laut Buchert et al. 2012 im Jahr 2010 für den privaten Sektor verkauften 7.097.000 Laptops fand für die Stoffflussanalyse eine Erhöhung um den Faktor 1,25 Verwendung.

Du und Graedel (2011) gaben die Lebensdauer eines Computers mit 10 Jahren an. Hausmann (2005) bezifferte diese mit 5–8 Jahre. Buchert et al. (2012) nannten dafür 5,6 Jahre und schätzten, dass in Deutschland 50 % der Alt-Laptops gesammelt werden. Über den Verbleib der zweiten Hälfte liegen keine Daten vor. Es lässt sich jedoch vermuten, dass es wie auch bei anderen elektronischen Geräten mehrere Möglichkeiten des Verbleibs gibt:

- Lagerung zu Hause
- Entsorgung mit dem Restmüll
- Verkauf ins Ausland (zur Weiterverwendung)

Diesen Daten zufolge belaufen sich die Palladiumflüsse und -lager in den privaten Haushalten auf die in Tabelle 114 dargestellten Werte.

Tabelle 114: Quantifizierte Flüsse und Lager der Notebooks im Prozess „Private Haushalte“ im System Palladium in Österreich (2011)

Typ		Palladium [kg]
Notebooks	Input-Fluss	18 ± 4,6
Ungenutzte Notebooks	Fluss innerhalb der Privathaushalte	6,0 ± 1,5
Alt-Notebooks	Fluss innerhalb der Privathaushalte	3,0 ± 0,070
Elektroaltgeräte	Fluss zur Abfallwirtschaft	14 ± 1,8 davon 3,0 ± 0,070 in Alt-Notebooks
Nutzlager Notebooks	Lager	(33 ± 8,0) + (12 ± 4,8)
Lager Alt-Notebooks	Lager	+ 3,0 ± 1,7

### Flachbildschirme

Flachbildschirme enthalten eine oder mehrere Leiterplatten mit elektronischen Komponenten und Kontakten, welche die Edelmetalle Gold, Silber und Palladium enthalten. Große Flachbildschirme finden vor allem als Fernseher oder Computermonitore Gebrauch, andere Anwendungsgebiete stellen digitale Anzeigen bzw. Fotobilderrahmen, Tablet-PCs, E-Book-Reader, Handys, Smartphones usw. dar. Aufgrund der Größe und dem damit

einhergehenden deutlich größeren Palladiumgehalt werden hier nur die Großgeräte Fernseher und PC-Monitore betrachtet.

Laut Buchert et al. (2012) dienen als PC-Bildschirm im Allgemeinen LCD-Monitore (Liquid Crystal Display), bei Fernsehgeräten kommen sowohl LCD als auch PDP (Plasma Display Panel) zur Anwendung, laut Kristof et al. 2010 dominieren die Verkaufszahlen von LCD-TV-Geräten stark über jene 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 vier Jahren (2005–2008) verfünffacht. Röhrenbildschirmgeräte (CRT = cathode ray tube) treten am Markt – bis auf einige wenige Spezialgeräte – beinahe überhaupt nicht mehr auf und machten im Verkauf 2009 in Deutschland 150 Stück aus, woraus sich auf Österreich heruntergebrochen 15 verkaufte Geräten ergeben. Buchert et al. (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 -PC-Monitore finden sich in Tabelle 115, wobei Buchert et al. (2012) die Verkaufszahlen wieder (wie schon bei Notebooks) jeweils nur für den privaten Sektor angeben (Quelle: Cemix 2011). Bei PC-Bildschirmen 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 vorgegangen und der Wert für den privaten Sektor mit dem Faktor 1,25 multipliziert. 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 et al. 2010] hochgerechneten Wert für PC-Monitore in Österreich im Jahr 2009 vergleichbar.

Tabelle 115: Verkaufszahlen für LCD-Bildschirme in Deutschland und die daraus hochgerechneten Werte für Österreich

	<b>PC-Monitore in D</b>	<b>LCD-TV in D</b>	<b>PC-Monitor in Ö (berechnet)</b>	<b>LCD-TV in Ö (berechnet)</b>
MaRess [Kristof 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. 2012] mit 1,25 multipliziert	-	-	331.306	-

Das deutsche Statistikportal statista.de gibt an, dass im Jahr 2011 in Deutschland 69,91 Mio. Menschen mindestens einen Fernseher besaßen und dass 59 % der deutschen TV-

Haushalte mit Flachbildfernsehern ausgestattet waren. Buchert et al. (2012) nannten, 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 2.1.4.2 „Elektronik und Elektrotechnik“ im Unterkapitel Festplatten (HDD) beschrieben, waren laut Statistik Austria (2011b) im Jahr 2011 78,1 % der österreichischen Haushalte im Besitz (mindestens) eines Computers. Im Rahmen dieser Stoffflussanalyse fand die Annahme Verwendung, dass 78,1 % der österreichischen Bevölkerung einen Computer besitzen. Davon wurde noch die geschätzte Anzahl der Notebooks abgezogen.

Kristof et al. (2010) gingen im Endbericht zum Projekt MaResS davon aus, dass 80 % der Neukäufe ein altes Röhrenbildschirmgerät und 10 % einen alten Flachbildschirm ersetzen (häufig Austausch der Flachbildschirme der ersten Generation gegen HD-ready- oder Full-HD-Geräte). Bei Computerbildschirmen fand an gleicher Stelle wegen des niedrigeren Marktsättigungsgrades eine angenommene Ersatzquote von 80 % mit einer Aufteilung von 80:20 für LCD- zu CRT-Geräten Verwendung.

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 sich die Angaben immer auf Tonnen Bildschirmgeräte und nicht auf deren Anzahl bezieht. Insgesamt stellen sich die Palladiumflüsse und -lager in den österreichischen Privathaushalten somit entsprechend der Tabelle 116 dar.

Tabelle 116: Quantifizierte Flüsse und Lager der Flachbildschirme im Prozess „Private Haushalte“ im System Palladium in Österreich (2011)

Typ		Palladium [kg]
PC-Flatscreens	Input-Fluss	6,7 ± 1,7
LCD-TV-Flatscreens	Input-Fluss	19 ± 4,7
Alt-PC-Flatscreens	Fluss innerhalb der Privathaushalte	4,2 ± 1,1
Alt-LCD-TVPC-Flatscreens	Fluss innerhalb der Privathaushalte	1,9 ± 0,47
Elektroaltgeräte	Fluss zur Abfallwirtschaft	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)

### **2.3.1.3 Münzen**

Es gibt verschiedene Anlage- bzw. Sammlermünzen aus Palladium (z.B. Ballerina, Cook Islands, Palladium Maple Leaf, Panda und Emu), deren bekannteste wohl die kanadische Maple Leaf ist. Ab 1979 bestand sie aus Gold, ab 1988 auch aus Silber und Platin und seit 2005 in geringer Auflage (2005: 40.000 Stück) ebenfalls aus Palladium. Die chinesische Panda-Münze wurde 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) aufgelegt. Da es keine offizielle Deklarierungspflicht für den Kauf oder Verkauf von Sammlermünzen gibt, lässt sich nicht erheben, wie viele davon in Österreich existieren.

### **2.3.1.4 Schmuck**

Palladium dient in der Schmuckindustrie als Legierungsbestandteil zum Entfärben von Weißgold. Letzteres 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 Pd-Weißgold 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 2.2.2.3 „Schmuck“ bei der SFA für Niob näher erläutert, lässt sich auch hier nicht abschätzen, 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 Ressourcenpotenzial dar.

### **2.3.1.5 Dentaltechnik**

Palladium findet auch im Bereich des Zahnersatzes Verwendung. Wie viel davon in diesem Gebiet zum Einsatz kommt, ließ sich keiner verwertbaren Statistik entnehmen. Zusätzlich ist eine Abgrenzung der im In- oder Ausland stattgefundenen zahnärztlichen Eingriffe nicht möglich. Eine wissenschaftlichen Stellungnahme der deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde aus dem Jahr 2000 bietet folgende Definition der Verwendung von Pd als Legierungsbestandteil in diesem Bereich: „Palladium ist ein Bestandteil [...] von mehr als 90 % der zahnärztlich verwendeten Edelmetall-Legierungen. Seit den 30iger 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 fünf 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.“

### **2.3.1.6 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 unter anderem festgehalten ist, dass neben Platin auch die Gehalte von Palladium in Umweltmatrizes ansteigen. Diese Erhöhung sei entlang den Straßen aber auch im Eis und Schnee Grönlands zu messen. Verglichen mit Platin weist Palladium eine deutlich höhere Mobilität in der Umwelt und auch Bioverfügbarkeit auf. Auch eine Publikation von Limbeck et al. (2004) befasst sich mit den saisonalen Unterschieden, unter anderem von Pd-Konzentration in der Luft, genauer in der Aerosolfraction kleiner 10 µm. Da es sich hier um regional abgegrenzte Messungen handelt (z.B. Klagenfurt und Salzburg), kann keine allgemeine Quantifizierung von Palladium-Emissionen in die Umwelt gemacht werden.

Eine Publikation des Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit in der Helmholtz-Gemeinschaft [Koller 2004] über Katalysatoren in Kraftfahrzeugen beziffert die Platinemissionen pro Kubikmeter Abgas oder pro gefahrenen Kilometer mit 10–100 ng. Bei vollständigem Ersatz von Platin durch Palladium betragen die angenommenen Emissionsraten 150–400 ng/km. Bei Limbeck et al. (2004) wird festgehalten, dass die wichtigsten Parameter, welche 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.

### **2.3.2 Industrie und Gewerbe**

Im Sektor Industrie und Gewerbe stellen vor allem die Katalysatoren für KFZs bzw. die chemische Industrie, Schmuck und die Dentaltechnik wesentliche Anwendungen dar, welche aus diesem Grund nachfolgend Betrachtung finden.

### 2.3.2.1 KFZ-Katalysatoren

Da sich diese in allen Prozessen der SFA für Palladium in Österreich finden, wird deren gesamtes System im Kapitel 2.3.1.1 "KFZ-Abgaskatalysatoren" beschrieben. Dort sind auch die quantifizierten Flüsse und Lager und deren Herleitungen vorhanden. Der Großteil der Neu-Kraftfahrzeuge stammt aus dem Import nach Österreich, es werden aber auch einige wenige Autotypen in Österreich zusammengebaut. 2011 waren dies vier PKW-Typen:

- 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 ein Export von 129.661 Stück erfolgte. Von den 750 in Österreich verbliebenen Pkw wurden 2011 108 Pkw angemeldet. Daraus ergeben sich bezüglich KFZ-Katalysatoren im Prozess „Industrie und Gewerbe“ die in Tabelle 117 aufgelisteten Pd-Flüsse und -lager.

Tabelle 117: Quantifizierte Flüsse der Kfz-Katalysatoren im Prozess „Industrie und Gewerbe“ im System Palladium in Österreich (2011)

Kfz-Katalysatoren		Palladium [kg]
Autoteile	Input-Fluss	32 ± 7,1
Autos aus Ö neu	Fluss zu den privaten Haushalten	1,3 ± 0,31
Autos aus Ö neu (Export)	Output-Fluss	31 ± 7,1

### 2.3.2.2 Katalysatoren für die chemische Industrie

Generell lässt sich zwischen homogener und heterogener Katalyse unterscheiden, je nachdem, ob Katalysator und Reaktanten in der gleichen Phase vorliegen oder nicht. Typisch für heterogene Katalysen sind gasförmige Edukte und feste Katalysatoren, für homogene Katalysen, 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 dient als Katalysator zur Beschleunigung von chemischen Reaktionen wie z.B. Hydrierungen, Dehydrierungen oder das Spalten von Kohlenwasserstoffen. Metallorganische Komplexkatalysatoren sind Übergangsmetallverbindungen mit definierter Struktur und Stöchiometrie. Palladiumkomplexe werden z.B. für C-C-Ver-

knüpfungsreaktionen eingesetzt, wobei der Pd-Komplex in situ aus stabilen und kommerziell erhältlichen Ausgangssalzen wie Pd(OAc)<sub>2</sub> oder PdCl<sub>2</sub> hergestellt wird.

Die in Österreich jährlich in der chemischen Industrie eingesetzte Menge an Palladiumkatalysatoren ließ sich nicht quantifizieren. 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 Wiederverwendung finden.

### **2.3.2.3 Schmuck**

Da Schmuck sich sowohl im Prozess „Private Haushalte“ als auch im Prozess „Industrie und Gewerbe“ der SFA für Palladium in Österreich wiederfindet, wird Palladium in der Schmuckindustrie im Kapitel 2.3.1.4 „Schmuck“ 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 lassen sich daher nicht näher abgrenzen. 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 Ressourcenpotenzial dar.

### **2.3.2.4 Dentaltechnik**

Wie schon bei Pd-hältigem Schmuck kommt auch Zahnersatz mit Palladium sowohl im Prozess „Private Haushalte“ als auch bei „Industrie und Gewerbe“ der SFA für Palladium in Österreich vor. Die Dentaltechnik wird im Kapitel 2.3.1.5 "Dentaltechnik" 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 inkludiert unter anderem Zahnersatzprodukte, Zahnfüllungen, Zahnimplantate und Implantatprothetik.

Auf der Homepage von DeguDent Deutschland ([www.degudent.de](http://www.degudent.de)) finden sich verschiedene Palladium-Basis- und Silber-Palladium-Dentallegierungen, die zwischen 1,0 und 77,3 % Pd enthalten. Es wird hier zwischen aufbrennfähigen Legierungen mit konventionellen Keramiken, solchen mit hochexpandierenden Keramiken und Gusslegierungen unterschieden. Von DeguDent Austria konnten keine Daten über die im Jahr 2011 verarbeiteten Mengen an Palladium erhalten werden.

### 2.3.3 Abfallwirtschaft

Der Prozess Abfallwirtschaft wurde auch hier als einziger nicht in einem Subsystem dargestellt, da die vorliegenden Informationen nicht ausreichen, um den Bereich im Detail abzubilden. Der größte rezyklierbare Palladium-Anteil ist in den Katalysatoren der Alt-KFZs enthalten. Das gesamte System der KFZ-Katalysatoren fand im Kapitel 2.3.1.1 „KFZ-Abgaskatalysatoren“ eine detaillierte Beschreibung.

Im Jahr 2011 wurden rund 80.750 Katalysatoren bei Schredderbetrieben aus Alt-KFZs ausgebaut und exportiert. Diesen verwerteten Katalysatoren stehen allerdings ca. 142.500 Katalysatoren gegenüber (das entspricht der 1,8-fachen Menge der verwerteten Kats), welche sich zwar in Alt-KFZs befanden, aber keiner Verwertung (im In- oder Ausland) zugeführt wurden. Es ist anzunehmen, dass sich ein kleiner Teil davon im Lager von Privatpersonen befindet, der Großteil wahrscheinlich jedoch ins Ausland gelangte. Diese exportierten Alt-Kraftfahrzeuge stellen aus österreichischer Sicht einen „Altfahrzeugschwund“ dar. Einerseits ist eine Weiterverwendung im Ausland (Exporte finden laut Hagelüken (2008) vor allem nach Afrika und Osteuropa statt) einer direkten Verwertung durchaus vorzuziehen, andererseits besteht das Problem, dass eine Verwertung am Ende der Lebensdauer der KFZs in den entsprechenden Zielländern nicht oder nur zu einem sehr geringen Prozentsatz stattfindet, da dort im Allgemeinen keine – bzw. keine mit der österreichischen/mittel-europäischen vergleichbare – Recyclinginfrastruktur besteht. Somit kann das Palladium in den exportierten Alt-Kraftfahrzeugen für das Palladium-Recycling größtenteils als verloren angesehen werden.

Das Recycling der Platingruppenmetalle ist laut Hagelüken (2008) technisch gelöst, Umicore erzielt bei der Scheidung von Platin/Palladium aus Autokatalysatoren Metallausbeuten von 98 %. Als Hauptproblem des Palladium- 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 liegt vor allem 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 Institutionen (wie z.B. bei Prozess-Katalysatoren in der chemischen Industrie oder Öl-raffination) zu PGM-Rückgewinnungsraten von über 90 % über den gesamten Produktlebenszyklus.

Den zweiten Fluss in die Abfallwirtschaft stellen die Pd-hältigen Elektroaltgeräte (EAG) dar, zu denen Althandys, Alt-Notebooks, 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 Hagelücken (2009) in Belgien, Kanada, Deutschland, Japan und Schweden. Das Einsatzmaterial stamme aus weltweiten Quellen.

Die Sammlung von Flachbildschirmgeräten sieht in Österreich derzeit laut Tesar und Öhlinger (2012) folgendermaßen aus: Sie werden meist gemeinsam mit anderen Bildschirmgeräten in Gitterboxen oder auf Paletten mit Folienummwicklung, aber auch in loser Schüttung in Großcontainern gesammelt bzw. zu Behandlern transportiert. Bei größeren Sammelstellen erfolgt auch die separate Erfassung von Flachbildschirmgeräten, zum Teil aber auch als EAG-Gemisch (Kleingeräte, Bildschirmgeräte, Großgeräte), woraus sich in der Regel höhere Beschädigungsraten der Flachbildschirmgeräte ergeben. LCD-Fernseher und -Monitore enthalten eine Hg-hältige Hintergrundbeleuchtung, die folglich bei beschädigten Geräten zu Problemen führt. Außerdem macht der Hg-Gehalt ein Schreddern unmöglich und zwingt zur manuellen Demontage, um unter anderem an die enthaltenen Leiterplatten gelangen zu können.

Basierend auf den Angaben von Tesar und Öhlinger (2012) erfolgt in Österreich in 15 Anlagen die Behandlung von Bildschirmgeräten. Vier von diesen (die 2010 zusammen 37 % der Bildschirmgeräte übernahmen) gaben jedoch an, keine Behandlung durchzuführen. Die anschließende mechanische Aufbereitung erfolgt laut Tesar und Öhlinger (2012) in Unternehmen 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 Probetrieb. Die Leiterplattenfraktion geht im Allgemeinen zu NE-Hütten zur weiteren Verwertung. Letztendlich lassen sich die Pd-Flüsse und -lager in der österreichischen Abfallwirtschaft gemäß Tabelle 118 zusammenfassen.

Tabelle 118: Quantifizierte Flüsse und Lager im Prozess „Abfallwirtschaft“ im System Palladium in Österreich (2011)

		Palladium [kg]
Alt-Autos (Schredder)	Input-Fluss von den privaten Haushalten	130 ± 34
Elektroaltgeräte	Input-Fluss von den privaten Haushalten	14 ± 1,8
Lager Abfallwirtschaft		+ 140 ± 34

## 2.4 Literatur

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

- Angerer, G. et al., 2009: Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Fraunhofer-ISI „Innovationspotenziale“. Stuttgart, Deutschland: Fraunhofer Verlag.
- Artelt, S. et al., 1999: Engine dynamometer experiments: platinum emissions from differently aged three-way catalytic converters. *Atmospheric Environment*, 33, 3559–3567.
- BAWP, 2011: Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2011 (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft).
- BITKOM, 2010: Die Zukunft der digitalen Consumer Electronics – 2010. Internet: <http://www.bitkom.org>.
- BITKOM, 2011a: Presseinformation – Tablet Computer erobern den Massenmarkt. Internet: <http://www.bitkom.org>.
- BITKOM, 2011b: Presseinformation – 83 Millionen Alt-Handys. Internet: <http://www.bitkom.org>.
- Bringezu, S. et al., 2011: Metallische Rohstoffe, weltweite Wiedergewinnung von PGM und Materialien für Infrastrukturen, Abschlussbericht des Arbeitspakets 2 des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRess). Internet: [http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/abschlussberichte\\_der\\_aps/index.html](http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/abschlussberichte_der_aps/index.html).
- Brown, T. J. et al., 2012a: European Mineral Statistics 2006–2010 (A product of the World Mineral Statistics Database), British Geological Survey. Keyworth, Nottingham. Internet: <http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/europeanStatistics.html>.
- Brown, T. J. et al., 2012b: World Mineral Production 2006–2010, British Geological Survey. Internet: <http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldStatistics.html>.
- Bryce, R. 2010: The Lanthanides, China, and High-Tech Autos. (Actually High-Tech Everything). Internet: [http://www.toyota.com/esq/pdf/Robert\\_Bryce\\_Toyota\\_ESQ.pdf](http://www.toyota.com/esq/pdf/Robert_Bryce_Toyota_ESQ.pdf).
- Buchert, M. et al., 2011: Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität.
- Buchert, M. et al., 2012: Recycling critical raw materials from waste electronic equipment. Öko-Institut e.V., Darmstadt.
- Bundesministerium für Gesundheit, 2009: Gesundheit und Krankheit in Österreich. Gesundheitsbericht Österreich 2009.
- D'Souza et al. (2011): Life Cycle Assessment of Electricity Production from a Vestas V112 Turbine Wind Plant. Report commissioned by Vestas Wind Systems A/S, Randers, Denmark.
- Du, X. und Graedel, T. E., 2011: Global Rare Earth In-Use Stocks in NdFeB Permanent Magnets. *Journal of Industrial Ecology*, 15, 836–843.

- Eggert, P., 2012: Niob - ein junges Legierungsmetall hat sich auf dem Weltmarkt etabliert, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung DIW Berlin. Internet: [http://www.diw.de/deutsch/99\\_45\\_2/30967.html](http://www.diw.de/deutsch/99_45_2/30967.html).
- Eurostat, 2010: External Trade. Internet: [epp.eurostat.ec.europa.eu](http://epp.eurostat.ec.europa.eu).
- Gille, G. und A. Meier, 2012: Recycling von Refraktärmetallen, Vortrag auf der Recycling- und Rohstoffkonferenz 2012 in Berlin (Band 5 der Recycling- und Rohstoffkonferenz 2012).
- Greve, B. und C. Raulin, 2011: Der Nd:YAG-Laser im Wandel der (Impuls-) Zeiten – Einsatzgebiete in der Dermatologie. Internet: [http://www.laserklinik.de/fileadmin/user\\_upload/laserklinik/pubpub/html\\_pdf/ndover.pdf](http://www.laserklinik.de/fileadmin/user_upload/laserklinik/pubpub/html_pdf/ndover.pdf).
- Gutfleisch, O. et al., 2011: Magnetic Materials and Devices for the 21<sup>st</sup> Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient. *Adv. Mater*, 23, 821–842.
- Hagelüken, C. et al., 2005: Der Kreislauf der Platinmetalle – Recycling aus Katalysatoren. Sonderdruck aus: Hagelüken et al., *Autoabgaskatalysatoren*, Expert Verlag. Internet: [http://www.preciousmetals.umicore.com/PMR/Media/spentAutocats/show\\_derKreislaufDerPlatinmetalle.pdf](http://www.preciousmetals.umicore.com/PMR/Media/spentAutocats/show_derKreislaufDerPlatinmetalle.pdf).
- Hagelüken, C., 2008: Recycling von Autoabgaskatalysatoren, Metallurgisches Seminar Schriftenreihe der GDMB, Heft 115, 69–85.
- Hagelüken, C. und M. Buchert: The mine above ground – opportunities & challenges to recover scarce and valuable metals from EOL electronic devices. Presentation at the IERC, Salzburg, 17.01.2008.
- Hagelüken, C., 2009: Recycling von Autoabgaskatalysatoren, Metallurgisches Seminar Schriftenreihe der GDMB, Heft 121.
- Haring, T. et al., 2003: Direct drive – Opening a new era in many applications. In: *Pulp and Paper Industry Technical Conference*, 171–179.
- Hausmann, M., 2005: Potential thermischer Verfahren zur stofflichen Abfallverwertung. Diplomarbeit am Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, Technische Universität Wien.
- Hornak, J., 2011: The Basics of MRI. Internet: <http://www.cis.rit.edu/htbooks/mri/>.
- Huisman, J., 2004: QWERTY and Eco-Efficiency analysis on cellular phone treatment in Sweden. Project report 2004. Internet: <http://www.basel.int/industry/qwerty-sweeden.pdf>.
- IG Windkraft, 2011: Windkraft in Österreich. Die Energie des 21. Jahrhunderts. Informationsbroschüre der Austrian Wind Energy Association. Internet: <http://www.igwindkraft.at/redsystem/mmedia/2011.03.15/1300196402.pdf>.
- Koller, U., 2004: Katalysatoren in Kraftfahrzeugen – Freund oder Feind für Umwelt und Gesundheit? Informationspapier des Hlemholtz Forschungszentrum für Umwelt und

- Gesundheit, München. Internet: <http://www.helmholtz-muenchen.de/fileadmin/FLUGS/PDF/Infopapiere/Katalysatoren.pdf>
- Konsument.at, 2012: Handys – Schlacht der Giganten. Testbericht. Internet: [http://www.arbeiterkammer.com/bilder/d165/Handys\\_2012.pdf](http://www.arbeiterkammer.com/bilder/d165/Handys_2012.pdf).
- Kristof, K. et al., 2010: Endbericht des Projekts „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ (MaRes). Internet: <http://ressourcen.wupperinst.org/downloads/index.html>.
- Kuriki, S. et al., 2010: Recycling Potential of Platinum Group Metals in Japan, J. Japan Inst. Metals, 74, 801–805.
- Laner, D. et al., 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.
- Leoni, 2005: Leoni in Team. Automotive & Standard Cables (4). Internet: <http://www.leoni.com/>.
- Limbeck, A. et al., 2003: Seasonal variation of palladium, elemental carbon and aerosol mass concentrations in airborne particulate matter. Atmospheric Environment, 38, 1979–1987.
- Liu, R. et al., 2011: Application of rare earths in consumer electronics and challenges for recycling. Internet: <http://www.oeko.de/oekodoc/1295/2011-420-en.pdf>.
- Luo, Y., 2007: Current Status and Future Development of the Magnetic Materials Industry in China. Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials. Hrsg.: Kronmüller H. und S. Parkin. Volume 4: Novel Materials. 2007 John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-02217-7.
- MMA, 2011: Mobile Werbung wird zunehmend beliebter. MMA Austria publiziert den Leitfaden mobiler Trends im „Mobile Communications Report 2011“.
- Moss, R. L. et al., 2011: Critical Metals in Strategic Energy Technologies. Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies. Report JRC65592 published by Publications Office of the European Union. Internet: [http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/111111111/22726/2/reqno\\_jrc65592\\_critical%20metals%20in%20strategic%20energy%20technologies%20%28print%29.pdf](http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/111111111/22726/2/reqno_jrc65592_critical%20metals%20in%20strategic%20energy%20technologies%20%28print%29.pdf).
- MREL, 2012: Metall Rare Earth Limited. Internet: <http://www.metall.com.cn/>.
- MRT open, 2012. Internet: <http://www.mrt-open.at/>.
- Murphy&Spitz Research, 2011: Position zu Neodym und Windkraftanlagen. Internet: [http://www.murphyandspitz.de/fileadmin/user\\_upload/Dateien/Murphy%26SpitzResearchNeodym062011.pdf](http://www.murphyandspitz.de/fileadmin/user_upload/Dateien/Murphy%26SpitzResearchNeodym062011.pdf).

- Oakdene Hollins, 2010: Lanthanide Resources and Alternatives. Internet: [http://www.oakdenehollins.co.uk/pdf/lanthanide\\_resources\\_and\\_alternatives\\_may\\_2010.pdf](http://www.oakdenehollins.co.uk/pdf/lanthanide_resources_and_alternatives_may_2010.pdf).
- ORF, 2012: Die Ö3-Wundertüte: Rekordbilanz 2011. Internet: <http://oe3.orf.at/aktionen/stories/wundertuete>.
- Rauch, S. et al., 2001: Heterogeneity of Platinum group metals in airborne particles. *Environmental Science and Technology*, 35, 595–599.
- Reischl, G., 2012: 3,3 Millionen Handys in einem Jahr. *futurzone.at*. Internet: <http://futurezone.at/b2b/7664-3-3-millionen-handys-in-einem-jahr.php>.
- Rodewald, W. et al., 2002: Fortschritte bei pulvermetallurgisch hergestellten Neodym-Eisen-Bor-Magneten. In: *Hagener Symposium Pulvermetallurgie*, Band 18, 225–245.
- Roskill (2005): *The Economics of Platinum Group Metals. Outline*. Roskill Information Services, London. Internet: <http://www.roskill.com/reports/cobalt>.
- Saurat, M. und S. Bringezu, 2009: Platinum Group Metal Flows of Europe, Part II. *Journal of Industrial Ecology*, 13, 406–421.
- Schittl, G., 2012: *Recyclingpotenzial von kritischen Rohstoffen in Technologien zur Energieumwandlung*. Diplomarbeit am Institut für Abfallwirtschaft, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Schüler, D. et al., 2011: *Study on Rare Earths and Their Recycling*. Öko-Institut e.V., Darmstadt (Final Report for the Greens/EFA Group in the European Parliament).
- Statistik Austria, 2011a: *Fahrzeug-Bestand am 31.12.2011*. Internet: <http://www.statistik.at/>.
- Statistik Austria, 2011b: *Haushalte mit Computer 2011*. Internet: <http://www.statistik.at/>.
- Statistik Austria, 2011c: *Ausstattungsgrad der privaten Haushalte - Zeitvergleich*. Internet: <http://www.statistik.at/>.
- Statistik Austria, 2012: *Statistiken – Straße – Kraftfahrzeuge*. Internet: [http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/verkehr/strasse/index.html](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/verkehr/strasse/index.html).
- Sullivan, D. E., 2006: *Recycled Cell Phones – A Treasure Trove of Valuable Materials*. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey Fact Sheet 2006 – 3097.
- Tesar, M. und A. Öhlinger, 2012: *Flachbildschirmaltgeräte – Anforderungen an die Behandlung und Status in Österreich*, Umweltbundesamt.
- Treibacher Industrie AG, 2012. Internet: [www.treibacher.com](http://www.treibacher.com).
- USGS, 2012: *Mineral Commodity Summaries 2012*. Internet: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>.
- VCÖ, 2011: *Boom bei Elektrofahrrädern und Elektro-Mopeds in Österreich (2011-051)*. Internet: <http://www.vcoe.at/de/presse/aussendungen-archiv/details/items/2011-051>.
- Voestalpine, 2012: *Geschäftsbericht 2011/2012*. <http://reports.voestalpine.com/1112/gb>.

- Weinhold, N., 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? Internet: [http://78.47.31.10/fileadmin/ne/ne\\_inhalte/dokumente/NE\\_09\\_10\\_S.42\\_Titel-Getriebe.pdf](http://78.47.31.10/fileadmin/ne/ne_inhalte/dokumente/NE_09_10_S.42_Titel-Getriebe.pdf).
- Wimmer, H., 2012: Einflussfaktoren auf die Akzeptanz von Hybridautos. Zusammenfassung. Dissertation am Institut für Marketing-Management und Institut für Werbewissenschaft & Marktforschung, Wirtschaftsuniversität Wien.
- WKO, 2012: Statistikjahrbuch des Fachverbandes der Fahrzeugindustrie Österreichs. Internet: [http://wko.at/fahrzeuge/main\\_frame/statistik/JB/einstiegsseite.htm](http://wko.at/fahrzeuge/main_frame/statistik/JB/einstiegsseite.htm).
- Zereini, F. und F. Alt, 2006: Palladium Emissions in the Environment – Analytical Methods, Environmental Assessment and Health Effects. ISBN 978-3-540-29219-7, Springer Berlin Heidelberg.
- ZVEI, 2003: Umbrella Specification Tantalum Capacitor. Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e.V. Internet: <https://www.zvei.org/?id=1475>.