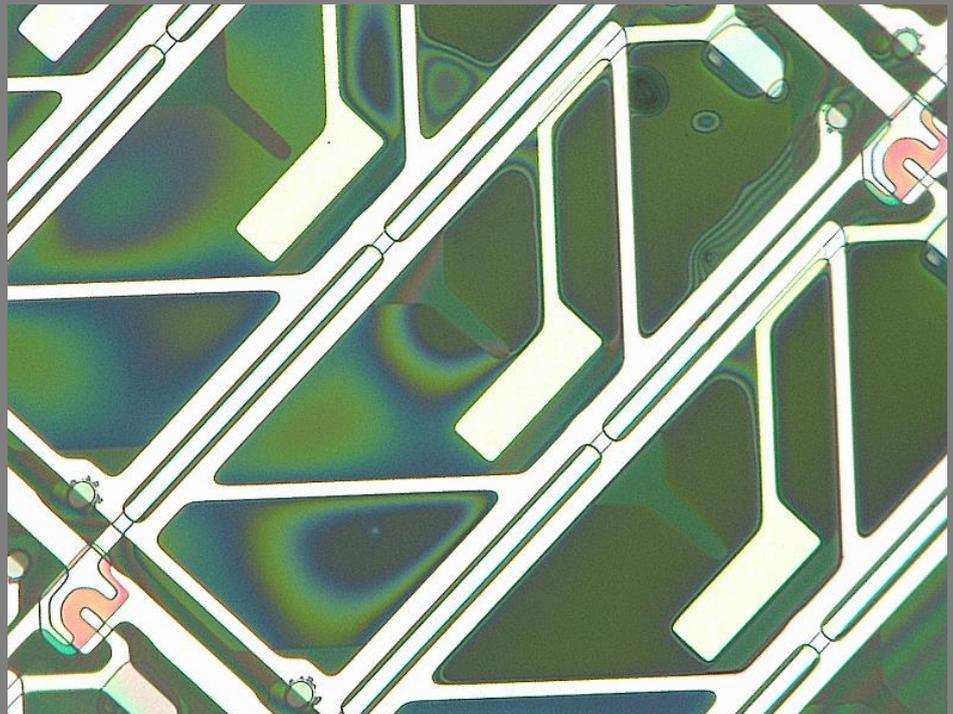


2015

Projekt e-Recmet

Rückgewinnung von kritischen Metallen aus Elektronikschrott am Beispiel von Indium und Neodym

Schlussbericht



 **Empa**
Materials Science and Technology

 **UMTEC**
Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik

Ernst **Basler+Partner**

 **B**
Berr Fachhochschule
Haute école spécialisée bernoise
Berr University of Applied Sciences

Mit Unterstützung der Umwelttechnologieförderung
des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

8/31/2015



Finanzierung

- Umwelttechnologieförderung des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), 3003 Bern
- Swico, Schweizerischer Verband der Anbieter von Informations- und Kommunikationstechnologien sowie weiterer verwandter Branchen, 8005 Zürich

Begleitung BAFU

Michael Hügi, Isabelle Baudin

Bearbeitung

Empa, Technology and Society Lab, St. Gallen¹

Empa, Advanced Analytical Technologies Lab, Dübendorf²

Hochschule Rapperswil, Umtec - Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik³

Ernst Basler + Partner AG, Zürich⁴

Berner Fachhochschule, Fachbereich Wirtschaft & Strategy Simulation Lab, Bern⁵

AutorInnen

¹ Heinz Böni, Patrick Wäger, Esther Thiébaud, Xiaoyue Du

² Renato Figi, Oliver Nagel

³ Rainer Bunge, Ariane Stäubli

⁴ Andy Spörry, Maya Wolfensberger-Malo

⁵ Marie Brechbühler-Peskova, Stefan Grösser

Hinweis:

Diese Studie wurde mit finanzieller Unterstützung des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und von Swico verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Verdankung

Das Projekt e-Recmet wurde vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) und von Swico, dem schweizerischen Verband der Anbieter von Informations- und Kommunikationstechnologien und verwandter Branchen, finanziert.

Die Resultate zur technischen Machbarkeit beruhen auf Untersuchungen, zu welchen folgende Firmen und Personen wichtige Beiträge geliefert haben:

- **RDS-Bird;** Bureau d'investigation sur le recyclage et la durabilité und RDS Technique et conseils en environnement SA in Prilly und Zerlegebetrieb Logitronic, Penthalaz;
zuständig: Sébastien Piguet
- **SOREC AG,** Gossau und **Zerlegebetrieb DOCK AG St. Gallen;**
zuständig: Markus Stengele
- **Blubox Trading AG,** Birrwil;
zuständig: Andreas Krebs

Wir danken dem BAFU und Swico für die Finanzierung und RDS-Bird, SOREC AG, DOCK AG und Blubox Trading AG sowie ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für ihre wertvollen Beiträge zum Gelingen dieses Projektes.

St. Gallen, 31. August 2015

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen.....	III
Verzeichnis der Tabellen	IV
Abkürzungen	IV
Begriffe	VI
Zusammenfassung	IX
Abstract	XIII
Résumé	XVII
Riassunto	XXI
1 Einleitung.....	1
2 Zielsetzungen.....	1
3 Methodisches Vorgehen	2
4 Screening und Priorisierung.....	4
4.1 Vorgehen	4
4.2 Kritikalität.....	4
4.3 Relevanz.....	5
4.4 Potential	5
4.5 Priorisierung	6
4.6 Auswahl der Zielmetalle	6
5 Grundlagen	7
5.1 Indium.....	7
5.1.1 Vorkommen in Elektronikprodukten.....	7
5.1.2 Mengen in Elektronikprodukten	8
5.1.3 Konzentration im Vergleich zu Primärminen	8
5.1.4 Indium in anderen Anwendungen.....	9
5.1.5 Probenaufbereitung und chemische Analytik	9
5.2 Neodym	10
5.2.1 Vorkommen in Elektronikprodukten.....	10
5.2.2 Mengen in Elektronikprodukten	11
5.2.3 Konzentration im Vergleich zu Primärminen	12

Schlussbericht

5.2.4	Neodym in anderen Anwendungen	12
5.2.5	Probenaufbereitung und chemische Analytik.....	13
5.3	<i>Vergleich Elektronik-Produkte mit anderen Anwendungen</i>	14
6	Technische Machbarkeit und Recyclingkosten	15
6.1	<i>Indium</i>	15
6.1.1	Behandlungsschritte	15
6.1.2	Resultate der Versuche zur Vorbehandlung	17
6.1.3	Kosten	22
6.1.4	Stand der Technik der Rückgewinnung.....	24
6.2	<i>Neodym</i>	24
6.2.1	Behandlungsschritte	24
6.2.2	Resultate der Versuche zur Vorbehandlung	25
6.2.3	Kosten	30
6.2.4	Stand der Technik der Rückgewinnung.....	30
7	Ökologischer Nutzen	32
7.1	<i>Fragestellung</i>	32
7.2	<i>Methodisches Vorgehen</i>	32
7.2.1	Untersuchungsrahmen	32
7.2.2	Sachbilanz	34
7.2.3	Wirkungsabschätzung	35
7.3	<i>Indium</i>	36
7.3.1	Gesamtbild.....	36
7.3.2	Sensitivitätsanalyse.....	36
7.3.3	Fazit.....	38
7.4	<i>Neodym</i>	39
7.4.1	Gesamtbild.....	39
7.4.2	Fazit.....	41
8	Wirtschaftliche Tragbarkeit	42
8.1	<i>Fragestellung</i>	42
8.2	<i>Methodisches Vorgehen</i>	42
8.2.1	Modell.....	42
8.2.2	Modellgrenze	43
8.2.3	Modellstruktur	43
8.2.4	Modellannahmen und Modellparameter	44
8.2.5	Modellvalidierung	44
8.3	<i>Szenarien</i>	45
8.4	<i>Resultate</i>	47
8.4.1	Veränderung des VRB	47
8.4.2	Menge des zurückgewonnenen Indiums	49
8.4.3	Schlussfolgerungen	52

9	Umsetzungsmodell	54
9.1	Rechtlicher Rahmen.....	54
9.2	Systemoptimierung durch Anreize.....	54
9.2.1	Aktuelles Entschädigungsmodell „push“.....	55
9.2.2	Entschädigungsmodell „pull“	56
10	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	58
	Literaturverzeichnis.....	59

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 3-1:	Ablauf des Projektes e-Recmet	3
Abbildung 4-1:	Schema und Kriterien für die Auswahl seltener technischer Metalle in Elektronikschrott	4
Abbildung 5-1:	LCD-Panels aus der Zerlegung von Flachbildschirmen (Fotos: Empa).....	7
Abbildung 5-2:	Harddisk mit Neodym-Eisen-Bor Magneten (Fotos: Umtec)	11
Abbildung 5-3:	Indium in Elektronik-Produkten (links) und übrigen Anwendungen (rechts)	14
Abbildung 5-4:	Neodym in Elektronik-Produkten (links) und übrigen Anwendungen (rechts).....	14
Abbildung 6-1:	Behandlungskette Indiumhaltiger Produkte	16
Abbildung 6-2:	Zerlegeschritte und Komponenten bei der manuellen Zerlegung von Flachbildschirmen (Quelle: Bird-RDS SA)	17
Abbildung 6-3:	Manuelle Zerlegung von Flachbildschirmen (Fotos: Bird-RDS SA)	18
Abbildung 6-4:	Fraktionen und Indiumgehalte aus der mechanischen Verarbeitung (Quelle: Blubox Trading AG)	19
Abbildung 6-5:	Mechanische Verarbeitung von Flachbildschirmen (Fotos: Empa).....	20
Abbildung 6-6:	Behandlungskette neodymhaltiger Produkte	25
Abbildung 6-7:	Zerlegeschritte beim Ausbau von Magneten aus Laufwerken.....	26
Abbildung 6-8:	Zerlegeschritte beim Ausbau von Magneten aus Mobiltelefonen, Kopfhörern, Lautsprecherboxen, Dockingstations und Tablets	26
Abbildung 6-9:	Ausgangsmaterial für die Zerlegeversuche von Mobiltelefonen, Kopfhörern, Lautsprecherboxen, Dockingstations und Tablets (Fotos: Empa)	27
Abbildung 6-10:	Zeitaufwand für die Freilegung der Magnete pro g freigelegte Magnete.	29
Abbildung 7-1:	Umweltbelastung der Prozesse für die vier untersuchten Varianten der Sekundärproduktion und der Primärproduktion von Indium für alle vier Bewertungsmethoden	37
Abbildung 7-2:	Umweltbelastung der Hauptprozesse für die verschiedenen Produktionswege von Neodymoxid (für alle vier Bewertungsmethoden)	40
Abbildung 8-1:	Modellstruktur	43
Abbildung 8-2:	Modellvalidierung	45
Abbildung 8-3:	Resultate Gesamtmenge zurückgewonnenes Indium (Szenarien 1 und 2).....	50
Abbildung 8-4:	Resultate Gesamtmenge zurückgewonnenes Indium (Szenarien 4 bis 7)	51
Abbildung 9-1:	Bestimmungen zum Stand der Technik und zur Rückgewinnung seltener technischer Metalle gemäss Anhörungsentwurf zur VREG vom 3. Juni 2013	54
Abbildung 9-2:	Material- und Geldflüsse im heutigen Swico-System („push“)	55
Abbildung 9-3:	Material- und Geldflüsse in einem fiktiven System „pull“	57

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 3-1: Berichte des Projektes e-Recmet	3
Tabelle 5-1: Verkaufte, gelagerte und entsorgte Indium-Mengen in Elektronik-Produkten	8
Tabelle 5-2: Indium in Elektronikaltgeräten.....	9
Tabelle 5-3: Indium-Mengen in anderen Anwendungen	9
Tabelle 5-4: Verkaufte, gelagerte und entsorgte Neodym-Mengen in Elektronik-Produkten.....	11
Tabelle 5-5: Neodym im Elektronikaltgeräte-Recycling	12
Tabelle 5-6: Neodym-Mengen in anderen Anwendungen.....	12
Tabelle 6-1: Zerlegezeiten und Zerlegeleistung bei der manuellen Demontage (Quelle: Bird-RDS SA)	17
Tabelle 6-2: Indium Gehalte von LCD-Panels	18
Tabelle 6-3: Fraktionen aus der mechanischen Verarbeitung von Flachbildschirmen und Indiumgehalte	20
Tabelle 6-4: Effizienzvergleich der manuellen und der mechanischen Vorbehandlung Indium haltiger Produkte (grobe Abschätzung)	21
Tabelle 6-5: Kosten der manuellen Vorbehandlung von Flachbildschirmen (Stand April 2014)	23
Tabelle 6-6: Gesamtkosten der Rückgewinnung von Indium aus Flachbildschirmen (Stand April 2014)	23
Tabelle 6-7: Anzahl und Massen der Zielkomponenten, Massen der ausgebauten Magnete sowie durchschnittlicher, maximaler und minimaler Zeitaufwand für die Freilegung der Magnete	28
Tabelle 6-8: Ergebnisse der orientierenden sowie der quantitativen chemischen Analysen von Neodym	29
Tabelle 6-9: Kosten für die Freilegung von Magneten (Stand April 2014)	30
Tabelle 7-1: Untersuchungsrahmen der vergleichenden Ökobilanz	33
Tabelle 7-2: Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen für Indium.....	38
Tabelle 8-1: Szenarien 1-5 für die Modellierung der wirtschaftlichen Tragbarkeit	46
Tabelle 8-2: Szenarien 6-7 für die Modellierung der wirtschaftlichen Tragbarkeit	47
Tabelle 8-3: Veränderung VRB (in CHF) Szenario 1	47
Tabelle 8-4: Veränderung VRB (in CHF) Szenario 2 im Vergleich zum Szenario 1a	48
Tabelle 8-5: Veränderung VRB (in CHF) Szenario 3 im Vergleich zu Szenario 1a	49
Tabelle 8-6: Ergebnisse Output-Menge reines Indium in 2026 (kg Indium)	52

Abkürzungen

BAFU	Bundesamt für Umwelt, Bern
BFH	Berner Fachhochschule
DST	Decision Support Tool
EBP	Ernst Basler+Partner AG, Zürich
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf/St. Gallen/Thun
EoL	End of Life
GWP	Treibhauspotenzial (engl.: Global Warming Potential)
HDD	Festplattenlaufwerk (engl.: Hard Disc Drive)
HP	Hauptprodukt
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien

In	Indium
ISO	International Organization for Standardization
ITO	Indium-Zinn-Oxid (engl.: Indium-Tin-Oxide)
IX	Ionenaustauschverfahren (engl.: Ion Exchange)
J	Joule
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KS	Kunststoffe
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
kWh	Kilowattstunde
LCA	Life Cycle Assessment
LCD	Flüssigkristall-Flachbildschirm (engl.: Liquid Cristal Display)
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
LED	Leuchtdiode (engl.: Light Emitting Diode)
MAN	Manuell
MECH	Mechanisch
NdO	Neodymoxid
PC	Personal Computer
PMMA	Polymethylmethacrylat (auch: Acrylglas oder Plexiglas)
ppm	10 ⁻⁶ (engl.: parts per million)
PWB	Leiterplatte (engl.: Printed Wiring Board)
RE	Seltene Erden (engl.: Rare Earths)
SCEA	Swiss Consumer Electronics Association, Bern
SSD	Solid-State-Drive
Sens	Stiftung Entsorgung Schweiz, Zürich
STM	Seltene Technische Metalle
Suva	Schweizerische Unfallversicherungsanstalt, Luzern
Swico	Schweizerischer Verband der Anbieter von Informations- und Kommunikationstechnologien sowie weiterer verwandter Branchen
SX	Lösungsmittelextraktion (engl.: solvent extraction)
UBP	Umweltbelastungspunkt
UCTE	Europäischer Netzverbund (engl.: Union for the Coordination of Transmission of Electricity)
UE	Unterhaltungselektronik (engl.: Consumer Electronics - CE)
µm	Mikrometer
UMTEC	Institut für Umwelt- und Verfahrenstechnik, Rapperswil
VRB	vorgezogener Recyclingbeitrag

Begriffe

Abfall	→Output eines Prozesses, das unter Kostenfolge einer Entsorgungsanlage (Kehrichtverbrennungsanlage, Deponie, Untertagedeponie) zugeführt werden (Frischknecht 2013).
Allokation	Zuordnung der Input- und Outputflüsse eines →Koppelprozesses auf die →Koppelprodukte .
Allokationsfaktor	Dimensionsloser Faktor, der angibt, welcher Anteil der Inputs und Outputs (bzw. einzelner Inputs und Outputs) eines Koppelprozesses den Koppelprodukten zugeordnet wird (Frischknecht 2013).
Edelmetalle	Edelmetalle sind Metalle, die besonders korrosionsbeständig sind. Zu den Edelmetallen im klassischen Sinn gehören die Platinmetalle sowie Gold und Silber. Teilweise wird auch noch Quecksilber zu den Edelmetallen gezählt, obwohl es in vieler Hinsicht reaktiver als die übrigen Edelmetalle ist. (Quelle: Wikipedia)
Endpoint	Die Umweltauswirkungen werden mit Hilfe von Schadenskategorien, wie die menschliche Gesundheit, Ökosystemqualität oder Ressourcenknappheit beschrieben. Wird auch als schadensorientierter Ansatz bezeichnet. Die Analyse auf Endpoint Ebene, setzt voraus, dass die impliziten Gewichtungen und Annahmen bekannt sind und kommuniziert werden.
Funktionelle Einheit	Bezugsgrösse, auf die sich die gesamten betrachteten Umweltwirkungen beziehen (Frischknecht 2013).
Input	Stoff oder Energie, der bzw. die einem Prozess zugeführt wird (Frischknecht 2013).
Koppelprodukt	Jedes von zwei oder mehreren Produkten/Dienstleistungen, das von einem →Multi-Output erzeugt wird und einen positiven ökonomischen Wert aufweist (Frischknecht 2013).
Kritische Metalle	Ein Technologiemetall wird als kritisch bezeichnet, wenn das Versorgungsrisiko und dessen Auswirkung auf die Wirtschaft hoch sind im Vergleich zu übrigen Metallen. (siehe z.B. (European Commission 2014).
Metalle	Metalle (von griechisch μέταλλον metallon) bilden diejenigen chemischen Elemente, die sich im Periodensystem der Elemente links und unterhalb einer Trennungslinie von Bor bis Astat befinden. (Quelle: Wikipedia)
Midpoint	Die Umweltauswirkungen werden mit Hilfe von Wirkungskategorien wie beispielsweise Klimawandel, Versauerung oder humantoxische Effekte beschrieben. Wird auch als Problem-orientierter Ansatz bezeichnet. Die Analyse auf Midpoint Ebene, reduziert die Komplexität und vereinfacht die Kommunikation von Ergebnissen.
Mineralischer Rohstoff	Durch zumeist natürliche Vorgänge entstandener Rohstoff, der - von wenigen Ausnahmen abgesehen - anorganisch und kristallin vorliegt. Hierzu zählen Gesteine, Salze und Erze (UBA 2012).
Multi Output Prozess	Prozess, welcher gleichzeitig mehrere Produkte/Dienstleistungen erzeugt (Frischknecht 2013).

Natürliche Ressource	Ressource, die Bestandteil der Natur ist: Primärrohstoffe, physischer Raum (Fläche), Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft), strömende Ressourcen (z.B. Erdwärme, Wind-, Gezeiten- und Sonnenenergie) und Biodiversität (UBA 2012).
Nebenprodukt	Produkt, das von einem Prozess erzeugt wird aber nicht bzw. nur marginal zu dessen Wertschöpfung beiträgt. (Vgl. →Abfall) (Frischknecht 2013).
Ökobilanz	Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines →Produktsystems im Verlauf seines Lebenswegs (Frischknecht 2013).
Output	Stoff oder Energie, der bzw. die von einem Prozess abgegeben wird. Anmerkung: Stoffe können Ausgangsmaterialien, Zwischenprodukte, Produkte/Dienstleistungen, Emissionen und Abfall einschliessen (Frischknecht 2013).
Platinmetalle	Als Platinmetalle oder Platinoide, im Englischen auch „Platinum Group Metals (PGM)“ genannt, werden die Elemente der Gruppen 8 bis 10 der 5. Periode (die „leichten Platinmetalle“: Ruthenium, Rhodium, Palladium) und der 6. Periode (die „schweren Platinmetalle“: Osmium, Iridium, Platin) bezeichnet. (Quelle: Wikipedia)
Ressource	Mittel, das in einem Prozess genutzt wird oder genutzt werden kann. Eine Ressource kann materieller oder immaterieller Art sein (UBA 2012).
Rohstoff	Stoff oder Stoffgemisch in un- oder gering bearbeitetem Zustand, der / das in einen Produktionsprozess eingehen kann. Man unterscheidet Primärrohstoffe (Rohstoffe, die durch Entnahme aus der Natur gewonnen werden) und Sekundärrohstoffe (Rohstoffe, die aus Abfällen oder Produktionsrückständen gewonnen werden). Weitere Unterscheidungen, wie in erneuerbare und nicht erneuerbare, biotische und abiotische Rohstoffe, sind gängig (UBA 2012).
Seltene Metalle	Ein Technologiemetall wird als geochemisch knapp bezeichnet, wenn es im Durchschnitt in Konzentrationen geringer als 0.01% Gew-% in der Erdkruste vorkommt (Skinner, B.J. 1979)
Seltene Technische Metalle	Seltene Technische Metalle (STM), zu denen auch die «seltenen Erden» wie Neodym, Lanthan, Europium oder Thulium gehören, sind für die Herstellung von Magneten, Motoren, Monitoren und weiteren Anwendungen der Elektrotechnik und Elektronik unentbehrlich. BAFU: http://www.bafu.admin.ch/abfall/10743/13016/index.html?lang=de <i>Im vorliegenden Bericht werden seltene Technische Metalle und kritische Metalle als synonyme Begriffe verwendet.</i>
Technologiemetalle	Der Begriff "Technologiemetall" bezeichnet ein Metall, welches für die Herstellung von "high-tech" und "clean-tech" Produkten benötigt wird, denen für die Entwicklung der Gesellschaft eine wichtige Rolle zugesprochen wird (Hagelüken and Meskers 2010)

Zusammenfassung

Kritische Metalle in Elektronikprodukten

Ein Technologiemetall wird dann als kritisch bezeichnet, wenn das Versorgungsrisiko und dessen Auswirkung auf die Wirtschaft im Vergleich zu übrigen Metallen hoch sind. Im Bericht (European Commission 2014) wurden aus einer Liste von ursprünglich 45 Rohstoffen 20 als kritisch bezeichnet, darunter befinden sich u.a. die Metalle Antimon, Beryllium, Gallium, Germanium, Indium, die Platingruppenmetalle, die Metalle der seltenen Erden, Kobalt, Magnesium, Niob und Wolfram.

Am Beispiel von **Indium und Neodym** wurde im Rahmen des Projektes e-Recmet die Rückgewinnung seltener technischer Metalle (STM) resp. kritischer Metalle¹ aus Elektronikschrott untersucht. Die Auswahl dieser Metalle erfolgte basierend auf einem mehrstufigen Auswahl- und Bewertungsverfahren. Die Resultate für Indium und Neodym können nicht 1:1 auf andere kritische Metalle übertragen werden. Die Situation ist bei den meisten Metallen jedoch sehr ähnlich. Die Metalle sind in den Elektrogeräten gut lokalisierbar und sie sind in geringen Mengen vorhanden. Für die Rückgewinnung werden mehrstufige Prozesse benötigt, die in einem ersten Schritt auf eine Optimierung der Freilegung der Komponenten, welche diese Metalle enthalten, ausgerichtet sind. Aus diesen Komponenten lassen sich die Metalle anschliessend in mehrstufigen physikalisch-chemischen und metallurgischen Prozessen zurückgewinnen.

Die stoffliche Zusammensetzung der Geräte ist einem stetigen Wandel unterworfen. Die Aussagen sind in ihrer zeitlichen Dimension deshalb zu relativieren. So wird Neodym als kritisches Metall in Elektronikprodukten in den nächsten Jahren gegenüber anderen Anwendungen aufgrund der technischen Veränderung von Hard-Disk-Drives (HDD) zu Solid-State-Drives (SSD) an Bedeutung verlieren. Bei Indium ist ein ähnlicher Trend gegenwärtig nicht feststellbar. Auch wenn Indium zunehmend auch in anderen dünnflächigen Anwendungen, z.B. in PV Modulen, Anwendung findet, dürfte wegen der langen Nutzungszeit der PV Module der Hauptanteil weiterhin in Elektronikgeräten zu finden sein.

Vergleicht man die potentiellen Indium- und Neodym Mengen mit den heute aus Elektro- und Elektronikschrott zurückgewonnenen kritischen Metallen Gold und Palladium so wird ersichtlich, dass sowohl die Indium Menge (ca. 104 kg, vgl. Tabelle 5-1) wie auch die Neodym Menge (6'825 kg, vgl. Tabelle 5-4) im entsorgten Elektronikschrott die mutmasslich zurückgewonnenen Gold und Palladiummengen erreichen, resp. sogar um übersteigen. So enthalten Leiterplatten aus den Kategorien ICT und Unterhaltungselektronik insgesamt ca. 540 kg Gold, resp. 140 kg Palladium, siehe (Blaser et al. 2011)). Aus Überlegungen zur Ressourcenschonung ist es deshalb wichtig, sich der Frage der Rückgewinnung von Indium und Neodym aus Elektronikschrott anzunehmen.

Technische Machbarkeit und Kosten

Vor-, Zwischen- und Endbehandlung

In Bezug auf die Rückgewinnung der Metalle Indium und Neodym aus Elektronikschrott standen im Projekt e-Recmet zwei Aspekte im Vordergrund:

- Untersuchungen zu geeigneten **Vorbehandlungsverfahren**

¹ Im vorliegenden Bericht werden Seltene Technische Metalle (STM) und kritische Metalle als synonyme Begriffe verwendet.

Zusammenfassung

- Abklärungen zum Stand der **Technik der Rückgewinnung** von Indium und Neodym.

Da die Rückgewinnungsverfahren für Indium und Neodym eine möglichst hoch angereicherte und mit wenig Fremdanteilen verschmutzte Fraktion voraussetzen, kommt den Vorbehandlungsketten eine entscheidende Bedeutung zu. Im Recyclingsystem in der Schweiz werden vorwiegend die Vorstufen der Behandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten durchgeführt. Die Rückgewinnung von Basis- und Edelmetallen erfolgt praktisch zu 100% im Ausland. Deshalb wurde im Projekt e-Recmet der Hauptfokus auf die Vorbehandlung gelegt, während für die Rückgewinnung der heutige Stand der Technik aufgrund der Resultate anderer Projekte ermittelt wurde.

Bei der Vorbehandlung besteht ein gewisser Zielkonflikt zwischen der Erzeugung möglichst reiner und mit wenig Fremdanteilen durchsetzten Fraktionen und einer möglichst kostengünstigen Vorbehandlung. Während bei einer manuellen Demontage die Komponenten, welche die Zielmetalle enthalten, freigelegt werden und somit zu höher konzentrierten Zielfraktionen führen, ist es unvermeidlich, dass sich bei einer mechanische Verarbeitung die Materialien vermischen und sich die Zielmetalle auf mehrere Fraktionen verteilen. Demgegenüber stehen unter Umständen geringere Kosten und höhere Durchsätze der mechanischen Vorbehandlung.

Nach der Stufe der Vorbehandlung sind verschiedene Schritte der Zwischenbehandlung notwendig, um aus den Komponenten, resp. Fraktionen, welche die Zielmetalle enthalten, eine angereicherte Fraktion herstellen, die für die nachfolgende physikalisch-chemische Endbehandlung verwendet werden kann.

Indium

Vorbehandlung

Im Falle von *Indium* konnte gezeigt werden, dass eine manuelle Demontage der Flachbildschirmgeräte insgesamt zu einer um Grössenordnungen besseren Indium Ausbeute und letztlich auch zu deutlich geringeren Gesamtkosten führt, als eine mechanische Vorbehandlung. Inzwischen sind Verfahren in Entwicklung, mit welchen mit teilmechanischen Prozessschritten die relativ langen Zerlegezeiten der manuellen Demontage deutlich reduziert werden können.

Die Rückgewinnungskosten von Indium ohne Berücksichtigung der Kosten für eine manuelle Demontage der Geräte betragen ca. 11 Fr pro t Flachbildschirmgeräte, resp. ca. Fr. 684/kg Indium. Die Gewinnungskosten ohne Vorbehandlung liegen somit in etwa in der Grössenordnung des aktuellen Indium Preises (ca. Fr. 750 pro kg)². Werden die Kosten der manuellen Demontage mitberücksichtigt, betragen die Gesamtkosten schätzungsweise rund Fr. 279 pro t Flachbildschirm. Dabei wird ersichtlich, dass die Kosten der Vorbehandlung in jedem Fall deutlich stärker in die Gesamtkosten eingehen, als die Kosten der nachfolgenden Prozessschritte.

Stand der Technik der Rückgewinnung

Für die Rückgewinnung von Indium aus LCD Panels stehen Rückgewinnungsverfahren auf der Basis einer Lösungsmittelextraktion im Vordergrund. Diese befinden sich jedoch noch im Labor- resp. Technikums Massstab. Die Resultate

² Eine Nichtberücksichtigung der Vorbehandlungskosten kann deshalb vorgenommen werden, weil die Kosten der manuellen Demontage als „ohnehin-Kosten“ betrachtet werden können. Die manuelle Demontage erfolgt bereits heute, um aus den Flachbildschirmgeräten die quecksilberhaltigen Hintergrundbeleuchtungen zu entnehmen.

aus laufenden Projekten in Deutschland lassen jedoch darauf schliessen, dass es verfahrenstechnisch gelingen sollte, ein Indium Konzentrat herzustellen, welches in bestehende, industriell verfügbare Rückgewinnungsprozesse eingeschleust werden könnte. Es dürften jedoch von einige Jahre vergehen, bis ein industriell umsetzbare Rückgewinnung von Indium aus Elektronikgeräten verfügbar sein wird.

Neodym

Vorbehandlung

Eine vergleichende Kostenaussage zwischen manueller und mechanischer Vorbehandlung war bei Neodym nicht möglich. Es wurden lediglich Versuche zur manuellen Demontage durchgeführt. Versuche zur mechanischen Behandlung waren aus Kosten- und Zeitgründen nicht möglich.

Eine Bedingung für die mechanische Aufbereitung von Hard-Disks ist die Entmagnetisierung der Neodym Magnete weil diese ansonsten an den eisenhaltigen Teilen der mechanischen Behandlung haften bleiben. Die meisten der heute angedachten Verfahren beinhalten daher eine Erhitzung und eine anschliessende Zerkleinerung der Hard-Disk. Die Herausforderung wird deshalb sein, das Optimum zwischen einer rein manuellen Zerlegung der Hard-Disks und einer mechanischen Aufarbeitung zu finden, welche gewährleistet, dass eine Fraktion mit Magneten als möglichst als ganze Stücke erzeugt werden kann. Eine Zerkleinerung mittels Smasher befindet sich gegenwärtig in Rahmen des Projektes Neorec (durch Umtec) in Prüfung.

Stand der Technik der Rückgewinnung

Bereits heute besteht die Möglichkeit, die gewonnene, neodymreiche Fraktion mittels eines hydrometallurgisch/nasschemischen Prozesses zu hochreinen Seltenerdoxid-Rezyklaten weiterzuverarbeiten.

Die Anforderungen der Industrie an die Recyclingfraktionen sind hoch. So müssen beispielsweise die Hard-Disk Schredderfraktionen einen Nd Gehalt von mindestens 25% aufweisen. Einige Schmelzen wie z.B. die MS Schramberg Sinter GmbH & Co. KG verkaufen heute ihre Produktionsabfälle nach Vietnam, wo sie wieder zu Legierungen eingeschmolzen werden. Derzeit lohnt sich in der EU aufgrund der tiefen Rohstoffpreisen selbst das Recycling von Produktionsabfällen nicht.

Ökologischer Nutzen

Indium

Die Sekundärproduktion von Indium bei einer manuellen Vorbehandlung ist unabhängig vom Verfahren der Rückgewinnung (Lösungsmittelextraktion oder Ionenaustausch) gegenüber der Primärproduktion als vorteilhaft oder zumindest gleichwertig zu beurteilen.

Die vergleichsweise gute Umweltbilanz der Primärproduktion von Indium liegt in der Tatsache begründet, dass Indium als Nebenprodukt der Zinkgewinnung anfällt.

Zusammenfassung

Neodym

Die Sekundärproduktion von Neodymoxid aus HDD ist der Primärproduktion aus ökologischer Sicht eindeutig vorzuziehen.

Die auf manueller Isolierung der Magnete beruhende Sekundärproduktion ist mit 30% weniger Umweltbelastungen verbunden als die mechanische Sekundärproduktion, in welcher die Vorbehandlung nach der Entmagnetisierung über einen Schredder-Prozess und anschliessende Fraktionierung erfolgt.

Wirtschaftliche Tragbarkeit

Die Ergebnisse der Modellierung für *Indium* haben gezeigt, dass im Falle einer manuellen Vorbehandlung der aktuell erhobene VRB die zusätzlichen Kosten des Indium-Recyclings bereits heute beinahe decken würde. Die vollständige finanzielle Deckung des Indium-Recyclings würde mit einer marginalen Erhöhung des VRB von ca. 0.19 Fr./Produkt bei TV-Monitoren, von ca. 0.07 Fr./Produkt bei PC-Monitoren und von ca. 0.08 Fr./Produkt bei Laptops erreicht. Im Fall einer ausschliesslich mechanischen Verarbeitung müsste der aktuell erhobene VRB zusätzlich um ca. 3.5 Fr./Produkt bei den TV-Monitoren, um ca. 1.4 Fr./Produkt bei den PC-Monitoren und um ca. 1.3 Fr./Produkt bei den Laptops erhöht werden, um die Kosten des Indium-Recyclings vollständig zu decken.

Abstract

Critical metals in electronic products

A technology metal is defined as critical if the supply risk and its effect on the economy are high by comparison with other metals. The report (European Commission 2014) defines 20 out of a list of originally 45 raw materials as critical, including the metals antimony, beryllium, gallium, germanium, indium, the platinum group metals, the rare earth metals, cobalt, magnesium, niobium and tungsten.

Project e-Recmet examined the recovery of critical metals from electronic waste using the examples of indium and neodymium. These metals were chosen on the basis of a multilevel selection and evaluation procedure. The results for indium and neodymium cannot be transferred 1:1 to other rare technical metals. The situation is, however, similar with most of the metals. The metals are locatable and are available in small quantities in certain components within electrical appliances. They necessitate multilevel processes that are geared to optimising exposure of the metals that these components contain. The metals can be recovered from the components in multilevel physical-chemical and metallurgical processes.

The material composition of the appliances is subject to constant change. The conclusions should be seen in relation to their time-frame. For instance, neodymium will become less significant over the course of the next few years as a critical metal in electronics products by comparison with other applications, as a result of the technological change from Hard-Disk Drives (HDD) to Solid-State Drives (SSD). No such trend can currently be detected with indium. Even if indium is also increasingly being used in other thin-surface applications, e.g. in PV Modules, the largest part is probably still found in used electronic products because of the long life of PV Modules.

If potential quantities of indium and neodymium are compared with the critical metals gold and palladium that are currently recovered from electric and electronic waste, then it is clear that the quantities of both indium (approx. 104 kg, cf. Table 5-1) and neodymium (6,825 kg, cf. Table 5-4) in disposed of electronic waste amount to, or even exceed, the probable recovered quantities of gold and palladium. Thus circuit boards from ICT and entertainment product categories contain in total approx. 540 kg gold and 140 kg palladium, see (Blaser et al. 2011)). From the point of view of raw materials conservation, it is therefore important to consider the question of recovering indium and neodymium from electronic waste.

Technical feasibility and costs

Preliminary, intermediate and final treatment

As far as recovery of the metals indium and neodymium from electronic waste is concerned, two aspects were of primary importance in Project e-Recmet:

- Studies of suitable **preliminary treatment techniques**
- Clarification on the status of **recovery technology** for indium and neodymium.

Since the recovery techniques for indium and neodymium require a fraction to be enriched to the greatest possible extent and contaminated by few foreign substances, the preliminary treatment chains are of great significance. The recycling system in Switzerland mainly carries out the preliminary stages in the treatment of used electric and electronic appliances. The recovery of base and noble metals is almost 100% carried out abroad. That is why in Project e-Recmet the primary focus is on preliminary treatment,

Summary

while for recovery the current status of technology was calculated on the basis of results from other projects.

There is a certain conflict of objectives in preliminary treatment between the generation of fractions that are as pure and free from contamination as possible and the most cost-effective preliminary treatment possible. While during the course of manual disassembly the components containing the target metals are exposed and so result in high-concentration target fractions, it is inevitable that with a mechanical process the materials are mixed together and the target metals are distributed across several fractions. On the other hand, costs may be lower and throughput higher with a mechanical preliminary treatment.

After the preliminary treatment stage various levels of intermediate treatment are necessary in order to make from the components, or fractions, containing the target metals an enriched fraction which can be used for the subsequent physical-chemical final treatment.

Indium

Preliminary treatment

It was shown in the case of *indium* that manual disassembly of flatscreen devices on the whole leads to a vastly better exploitation of the indium and ultimately also to considerably lower total costs than mechanical preliminary treatment. Procedures are now being developed with which the relatively long dismantling times of manual disassembly can be significantly reduced using semi-automatic process steps.

The recovery costs of indium when the costs of manual disassembly are not taken into account amount to approx. CHF 11 per tonne of flatscreen devices, or approximately CHF 684/kg indium. The extraction costs without preliminary treatment are therefore in the order of magnitude of the current indium price (approximately CHF 750 per kg)³. If the costs of manual disassembly are taken into account, the total costs amount to roughly CHF 279 per tonne of flatscreens. This clearly shows that preliminary treatment costs definitely weigh heavier in the total costs than the costs of the subsequent process steps.

Status of recovery technology

When indium is being recovered from LCD panels, recovery procedures based on solvent extraction are of prime importance. They are, however, still at the laboratory or technical institute stage. The results from current projects in Germany indicate that it should be technically possible to manufacture an indium concentrate, which could be introduced into existing, industrially available recovery processes. It may though take several years for the recovery of indium from electronic devices to become possible at an industrial level.

³ The preliminary treatment costs can be disregarded because the costs of manual disassembly can be considered unavoidable costs. Manual disassembly is already being carried out in order to extract the mercury-containing background lighting fittings from the flatscreen devices.

Neodymium

Preliminary treatment

It was not possible to carry out a cost comparison between manual and mechanical preliminary treatment methods for neodymium. Only trials of manual disassembly were carried out. Trials of mechanical treatment methods were not possible for reasons of cost and time.

When hard disks are mechanically processed, the neodymium magnets need to be demagnetized, because they would otherwise remain attached to the parts of the mechanical treatment devices containing iron. Most of the procedures currently under consideration therefore include a heating process followed by crushing of the hard disk. The challenge will therefore be to find an optimal middle way between a purely manual breaking down of the hard disks and a mechanical process which ensures that a fraction can be produced which contains magnets in as near to whole pieces as possible. A crushing procedure using smasher technology is currently being tested within Project Neorec (by Umtec).

Status of recovery technology

At this point in time it is already possible to process the recovered neodymium-rich fraction using a hydrometallurgical/wet-chemical procedure and turn it into highly purified rare earth oxide recyclates.

Industry specifications for recycling fractions are high. For example, the hard disk shredder fractions must show Nd content of at least 25%. Some smelting plants, e.g. MS Schramberg Sinter GmbH & Co. KG, sell their production waste to Vietnam, where it is smelted back into alloys. It is currently not worthwhile to recycle even production waste in the EU because of the low prices for raw materials.

Ecological benefit

Indium

The secondary production of indium in the course of manual preliminary treatment can be assessed as favourable to or at least of equal value to primary production, independent of the recovery procedure (solvent extraction or ion exchange).

The relatively good ecological impact associated with the primary production of indium is based on the fact that indium is found as a by-product of zinc extraction.

Neodymium

The secondary production of neodymium oxide from HDD is clearly preferable to primary production from the environmental point of view.

Secondary production that is based on the manual retrieval of magnets is associated with 30% less environmental contamination than mechanical secondary production in which the preliminary treatment is carried out, after demagnetization, via a shredder process and then fractionation.

Economic feasibility

The results of the modelling of *indium* have shown that in the case of manual preliminary treatment the currently valid advanced recycling contribution would even now almost cover the costs of indium recy-

Summary

cling. Indium recycling would be completely covered financially with a marginal increase in the advanced recycling contribution of approximately 0.19 CHF/product with TV monitors, of approximately 0.07 CHF/product with PC monitors and of approximately 0.08 CHF/product with laptops. If exclusively mechanical processing methods were used, the currently valid advanced recycling contribution would have to be increased additionally by approximately 3.5 CHF/product with TV monitors, by approximately 1.4 CHF/product with PC monitors and by approximately 1.3 CHF/product with laptops in order to fully cover the costs of indium recycling.

Résumé

Métaux critiques dans les équipements électroniques

Les métaux utilisés dans la haute technologie sont considérés comme critiques lorsque le risque de pénurie qui leur est lié et l'effet de celui-ci sur l'économie sont supérieurs à ceux des autres métaux. Dans un rapport de la Commission européenne (European Commission 2014), sur une liste initiale de 45 matières premières, 20 ont été qualifiées de « critiques ». On y trouve notamment divers métaux comme l'antimoine, le béryllium, le gallium, le germanium et l'indium, les métaux du groupe du platine, les métaux des terres rares, ainsi que le cobalt, le magnésium, le niobium et le tungstène.

Dans le cadre du projet e-Recmet, on a étudié la récupération des métaux critiques dans les déchets électroniques en prenant pour cas concrets l'indium et le néodyme. Le choix de ces deux métaux s'est fait selon une procédure de sélection et d'évaluation en plusieurs étapes. Les résultats obtenus pour l'indium et le néodyme ne sauraient être transposés tels quels à d'autres métaux rares, mais les problématiques restent similaires dans la plupart des cas. Les métaux peuvent être localisés en petites quantités dans certains composants des appareils électriques. Leur récupération nécessite un processus en plusieurs phases visant à optimiser le retrait des composants qui contiennent ces métaux. Il est ensuite possible d'en extraire les métaux grâce à plusieurs procédés physico-chimiques et métallurgiques successifs.

Les substances contenues dans les appareils ne cessent d'évoluer. Par conséquent, les conclusions tirées doivent être relativisées dans le temps. Ainsi, le néodyme devrait plutôt perdre de son importance ces prochaines années comme métal critique dans les produits électroniques, par rapport à d'autres applications, en raison du remplacement des disques durs à tête de lecture (« hard disk drives », HDD) par des supports de stockage à état solide (« solid-state drives », SSD). Pour l'indium, aucune tendance de ce type ne peut être identifiée actuellement. Bien qu'il soit de plus en plus utilisé pour d'autres applications à couches minces, notamment dans des modules photovoltaïques, la plus grande partie de ce métal devrait continuer à se trouver dans les équipements électroniques en raison de la longue durée de vie des installations photovoltaïques.

Si l'on compare les quantités qui pourraient être récupérées dans les déchets électroniques, on constate qu'aussi bien l'indium (avec environ 104 kg, voir tableau 5-1) que le néodyme (avec 6825 kg, voir tableau 5-4) atteignent ou même dépassent les quantités vraisemblables d'or et de palladium – deux autres métaux critiques – effectivement extraites de ces déchets. Les circuits imprimés issus des domaines de la télématique et de l'électronique de loisirs contiennent au total quelque 540 kg d'or et 140 kg de palladium (voir Blaser et al. 2011). Si l'on se préoccupe de la préservation des ressources, il est donc tout à fait important de se poser la question de la récupération de l'indium et du néodyme contenus dans les déchets électroniques.

Faisabilité technique et coûts

Prétraitement, traitement intermédiaire et traitement final

En ce qui concerne la récupération de l'indium et du néodyme dans les déchets électroniques, deux aspects ont été abordés en priorité dans le cadre du projet e-Recmet :

- Investigations concernant les **procédés appropriés de prétraitement**
- Études concernant les **techniques actuelles de récupération** de l'indium et du néodyme

Résumé

Comme les procédés de récupération de l'indium et du néodyme présupposent une fraction de déchets contenant le plus possible de ces métaux avec peu d'éléments étrangers, les filières de prétraitement jouent un rôle déterminant. En Suisse, le système de recyclage exécute surtout les étapes préliminaires du traitement des appareils électriques et électroniques : la récupération des métaux de base et des métaux nobles se fait presque entièrement à l'étranger. C'est la raison pour laquelle le projet e-Recmet s'est principalement concentré sur le prétraitement, tout en se fondant sur les résultats d'autres projets pour déterminer quelles sont les techniques actuelles de récupération et de recyclage.

Dans une certaine mesure, un conflit d'intérêts complique le prétraitement : il s'agit à la fois d'obtenir des fractions aussi pures que possible, avec peu d'éléments étrangers, et de maintenir les coûts à leur minimum. Alors que le démontage manuel permet d'extraire les composants contenant les métaux ciblés et que la concentration de ceux-ci est plus élevée dans les fractions ainsi produites, le traitement mécanique mélange les matériaux et répartit ces métaux dans plusieurs fractions ; cependant, il génère aussi, à certaines conditions, un débit plus élevé et des coûts plus faibles.

Après le prétraitement, différentes étapes de traitement intermédiaire sont nécessaires pour produire, à partir des composants ou des fractions contenant les métaux visés, une fraction enrichie qui puisse être utilisée pour le traitement physico-chimique final.

Indium

Prétraitement

Pour l'*indium*, on a pu démontrer que le démontage manuel des appareils à écran plat induit dans l'ensemble un rendement en métal très fortement supérieur à celui du prétraitement mécanique, et aussi, en fin de compte, des coûts totaux nettement plus bas. Des procédés en cours de développement devraient par ailleurs permettre de réduire nettement la durée du démontage manuel, actuellement assez importante, grâce à des phases de processus semi-automatiques.

Les coûts de récupération de l'indium se montent à environ 11 francs par tonne d'appareils à écran plat ou à 684 francs par kilogramme d'indium, sans tenir compte du coût du démontage manuel. Les coûts sans prétraitement se situent ainsi dans l'ordre de grandeur du prix actuel de ce métal (environ 750 francs par kg)⁴. En tenant compte du démontage manuel, les coûts totaux peuvent être estimés à 279 francs par tonne d'appareils. On constate ainsi que dans tous les cas les frais liés au prétraitement contribuent de manière nettement plus marquée aux coûts totaux que ceux liés aux étapes de processus ultérieures.

Techniques actuelles de récupération

La récupération de l'indium contenu dans les dalles LCD se fonde avant tout sur des procédés d'extraction utilisant des solvants. Pour l'instant, ces solutions ne sont appliquées qu'à petite échelle, en laboratoire ou dans des écoles techniques. Les résultats obtenus dans le cadre de projets en cours en Allemagne suggèrent cependant qu'il devrait être techniquement possible de produire un concentré susceptible d'être introduit dans des processus de récupération industriels existants. Cela dit, il faudra attendre

⁴ Le fait de ne pas prendre en compte le coût du prétraitement se justifie dans la mesure où on peut considérer que les frais liés au démontage manuel sont inévitables : cette étape de traitement existe déjà, elle permet de retirer des appareils à écran plat les unités de rétroéclairage contenant du mercure.

quelques années pour que la récupération de l'indium contenu dans les appareils électroniques puisse être mise en place à l'échelle industrielle.

Néodyme

Prétraitement

Pour le néodyme, il n'a pas été possible de comparer de manière fiable le coût du prétraitement manuel à celui du procédé mécanique. On s'est contenté d'effectuer des essais de démontage manuel. Pour des raisons de coûts et de temps, on a renoncé à tester le traitement mécanique.

Lors de la préparation mécanique des disques durs, la démagnétisation des aimants de néodyme est indispensable, faute de quoi ceux-ci adhèrent aux éléments ferreux issus du traitement. C'est la raison pour laquelle la plupart des procédés envisagés aujourd'hui prévoient un échauffement de ces supports de données avant le broyage. Le défi consistera ainsi à trouver la solution optimale entre le démontage purement manuel des disques durs et un traitement mécanique, de manière à veiller à ce que soit produite une fraction contenant le plus d'aimants entiers possible. Le projet Neorec (mené par l'Umtec) étudie actuellement une fragmentation des appareils à l'aide d'un smasher.

Techniques actuelles de récupération

Grâce à un procédé hydrométallurgique ou chimique humide, il est déjà possible de nos jours de transformer la fraction riche en néodyme obtenue par prétraitement en un recyclat d'oxyde de terres rares très pur.

L'industrie pose des exigences très élevées pour les fractions recyclées. Celles issues du broyage de disques durs, par exemple, doivent présenter une teneur en néodyme d'au moins 25 %. Certaines fonderies comme MS Schramberg Sinter GmbH & Co. KG exportent actuellement leurs déchets de production vers le Vietnam, où ils sont recyclés en alliages. Au vu du bas prix des matières premières, même le recyclage des déchets de production n'est pas rentable dans l'Union européenne.

Avantages écologiques

Indium

La production secondaire d'indium après prétraitement manuel peut être considérée comme plus respectueuse de l'environnement que la production primaire, ou au moins équivalente, quel que soit le procédé de récupération choisi (extraction à l'aide de solvants ou échange d'ions).

Notons que si le bilan environnemental de la production primaire d'indium est relativement bon, c'est que ce métal constitue un produit secondaire de l'extraction du zinc.

Néodyme

D'un point de vue écologique, la production secondaire d'oxyde de néodyme à partir de disques durs usagés est clairement préférable à la production primaire.

Résumé

La production secondaire reposant sur l'isolation manuelle des aimants engendre 30 % d'atteintes à l'environnement en moins que la production secondaire mécanique dans laquelle le prétraitement qui suit la démagnétisation se fait par broyage puis séparation en fractions.

Viabilité économique

Pour l'*indium*, les résultats de la modélisation ont montré que la CRA (contribution de recyclage anticipée) prélevée actuellement suffirait presque déjà à couvrir les coûts supplémentaires liés au recyclage de l'indium, dans le cas d'un prétraitement manuel. Pour couvrir entièrement ce recyclage, il ne faudrait augmenter la CRA que d'environ 19 centimes par appareil pour les téléviseurs, de quelques 7 centimes par appareil pour les écrans d'ordinateur et de près de 8 centimes par appareil pour les ordinateurs portables. Pour un traitement entièrement mécanique, il faudrait augmenter la taxe d'environ 3,50 francs par appareil pour les téléviseurs, de quelque 1,40 franc par appareil pour les écrans d'ordinateur et de près de 1,30 franc par appareil pour les ordinateurs portables, si l'on souhaite couvrir tous les coûts du recyclage de l'indium.

Riassunto

Metalli critici nei prodotti elettronici

Un metallo tecnologico è definito critico quando il rischio di approvvigionamento e i conseguenti effetti sull'economia sono elevati rispetto agli altri metalli. Da un elenco originariamente composto da 45 materie prime, nel rapporto (European Commission 2014) vengono definite come critiche 20 materie prime, tra cui l'antimonio, il berillio, il gallio, il germanio, l'indio, i metalli del gruppo del platino, i metalli delle terre rare, il cobalto, il magnesio, il niobio e il wolframio.

Prendendo ad esempio l'indio e il neodimio, nel progetto e-Recmet è stato studiato il recupero di metalli tecnici rari (MTR) dai rottami elettronici. La scelta di questi metalli è stata effettuata basandosi su una procedura di selezione e valutazione in più fasi. I risultati ottenuti per l'indio e il neodimio non possono essere trasferiti 1:1 ad altri metalli tecnici rari, tuttavia le problematiche sono simili per la maggior parte di essi. I metalli sono localizzabili e presenti in quantità ridotte in determinati componenti di apparecchi elettrici. Necessitano di processi multifase, che mirano a ottimizzare la separazione dei componenti che contengono questi metalli. Una volta separati i componenti, è possibile recuperare i metalli per mezzo di processi chimico-fisici e metallurgici multifase.

Poiché la composizione materiale degli apparecchi è soggetta a una continua evoluzione, occorre relativizzare le affermazioni nella loro dimensione temporale. Nei prossimi anni, ad esempio, l'importanza del neodimio come metallo critico nei prodotti elettronici tenderà a diminuire rispetto ad altri impieghi, a causa del passaggio dalle unità a disco rigido (hard disk drive, HDD) alle unità a stato solido (solid-state drive, SSD). Per l'indio non si constata al momento una tendenza simile. Sebbene l'indio sia sempre più utilizzato in altre applicazioni a strato sottile, ad esempio nei moduli fotovoltaici, il lungo periodo di utilizzo di questi moduli dovrebbe far sì che la maggior parte del metallo continui a essere presente nei rifiuti degli apparecchi elettronici.

Confrontando le potenziali quantità di indio e neodimio con quelle dei metalli critici oro e palladio recuperate da rottami elettrici ed elettronici, risulta evidente che sia la quantità di indio (ca. 104 kg, cfr. tab. 5-1) che quella di neodimio (6825 kg, cfr. tab. 5-4) nei rottami elettronici smaltiti raggiungono, o superano, le quantità di oro e palladio presumibilmente recuperate. Ad esempio, i circuiti stampati della categoria TIC ed elettronica d'intrattenimento contengono complessivamente circa 540 chilogrammi di oro e 140 chilogrammi di palladio (cfr. Blaser et al. 2011). Nell'ottica della salvaguardia delle risorse è pertanto più che legittimo porsi la questione del recupero dell'indio e del neodimio.

Fattibilità tecnica e costi

Trattamento preliminare, intermedio e finale

Per quanto concerne il recupero dei metalli indio e neodimio da rottami elettronici, nel progetto e-Recmet l'attenzione era focalizzata su due aspetti:

- indagini volte a definire **metodi di pretrattamento** idonei;
- accertamenti relativi allo stato della **tecnica per il recupero** dell'indio e del neodimio.

Poiché i metodi per il recupero dell'indio e del neodimio presuppongono una frazione quanto più possibile arricchita e con poche parti estranee, la catena del pretrattamento assume un'importanza decisiva. Nel sistema di riciclaggio in Svizzera vengono eseguite prevalentemente le fasi preliminari del trattamento

Riassunto

di apparecchi elettrici ed elettronici, mentre il recupero di metalli di base e metalli preziosi viene effettuato praticamente tutto all'estero. Pertanto nel progetto e-Recmet l'accento è stato posto sul pretrattamento, mentre per il recupero è stato determinato l'attuale stato della tecnica sulla base dei risultati di altri progetti.

Per quanto concerne il pretrattamento, sussiste un certo conflitto di obiettivi tra la produzione di frazioni possibilmente pure e con poche parti estranee e un pretrattamento a costi possibilmente ridotti. Mentre con lo smontaggio manuale i componenti che contengono i metalli desiderati vengono separati e consentono in tal modo di ottenere frazioni più concentrate, è inevitabile che con un trattamento meccanico i materiali si mescolino e i metalli desiderati si distribuiscano su più frazioni. Per contro il pretrattamento meccanico garantisce, in determinate circostanze, minori costi e una maggiore produttività.

Dopo la fase di pretrattamento sono necessari vari passaggi di trattamento intermedio, per ottenere dai componenti o dalle frazioni che contengono i metalli desiderati una frazione arricchita utilizzabile per il trattamento chimico-fisico finale.

Indio

Pretrattamento

Per quanto concerne l'*indio*, è stato possibile dimostrare che, a conti fatti, lo smontaggio manuale degli apparecchi a schermo piatto consente di recuperare una maggiore quantità di indio e, in ultima analisi, genera costi nettamente inferiori rispetto al pretrattamento meccanico. Nel frattempo vengono sviluppati procedimenti con i quali si riducono nettamente i tempi di smontaggio manuale relativamente lunghi grazie a fasi di processo semiautomatiche.

Al netto dei costi per lo smontaggio manuale degli apparecchi, i costi per il recupero dell'indio ammontano a circa 11 franchi per tonnellata di apparecchi a schermo piatto o 684 franchi per chilogrammo di indio. I costi di recupero al netto del pretrattamento sono pertanto nell'ordine dell'attuale prezzo dell'indio (ca. 750 franchi/kg)⁵. Considerando i costi dello smontaggio manuale, i costi totali sono stimati a circa 279 franchi per tonnellata di schermi piatti. Risulta quindi evidente che i costi del pretrattamento incidono in ogni caso in misura nettamente maggiore sui costi totali rispetto ai costi delle successive fasi del processo.

Stato della tecnica per il recupero

Per recuperare l'indio dagli schermi a cristalli liquidi (LCD) si punta primariamente su procedimenti che prevedono l'estrazione per mezzo di solventi. Tuttavia lo sviluppo di questi procedimenti è ancora su scala di laboratorio o di impianto pilota. Ma i risultati di alcuni progetti in corso in Germania fanno presumere che si riuscirà a mettere a punto un metodo per ottenere un concentrato di indio, che potrebbe essere immesso in processi industriali di recupero già esistenti. Occorreranno tuttavia ancora alcuni anni prima di poter disporre di un metodo per il recupero dell'indio dagli apparecchi elettronici applicabile su scala industriale.

⁵ È possibile non tenere conto dei costi di pretrattamento, poiché i costi dello smontaggio manuale possono essere considerati come «costi inevitabili». Infatti lo smontaggio manuale viene effettuato già oggi per estrarre le unità di retroilluminazione contenenti mercurio.

Neodimio

Pretrattamento

Per il neodimio non è stato possibile effettuare un raffronto dei costi tra pretrattamento manuale e meccanico. Sono stati effettuati solo test concernenti lo smontaggio manuale, mentre per motivi di costi e di tempo non sono stati effettuati esperimenti per il trattamento manuale.

Una condizione per la preparazione meccanica dei dischi rigidi è la smagnetizzazione dei magneti al neodimio, poiché in caso contrario questi restano attaccati alle parti ferrose del trattamento meccanico. La maggior parte dei procedimenti attualmente presi in considerazione prevede pertanto un riscaldamento e una successiva frantumazione dei dischi rigidi. La sfida sarà quindi trovare l'equilibrio ottimale tra una separazione interamente manuale e una preparazione meccanica dei dischi rigidi, in grado di garantire l'ottenimento di una frazione contenente magneti quanto più possibile in pezzi interi. Nel quadro del progetto Neorec viene attualmente testata dall'istituto Umtec una frantumazione per mezzo di tritiatrici.

Stato della tecnica per il recupero

Già oggi vi è la possibilità di trasformare la frazione ricca di neodimio ottenuta in riciclati di ossido di terre rare molto puri per mezzo di un processo idrometallurgico/di chimica umida.

I requisiti richiesti dall'industria per le frazioni di riciclato sono elevati. Ad esempio, le frazioni di trituratori di dischi rigidi devono avere un contenuto minimo di Nd del 25 per cento. Alcune fonderie, come ad esempio la MS Schramberg Sinter GmbH & Co. KG, vendono oggi i loro rifiuti di produzione al Vietnam, dove vengono nuovamente fusi in leghe. A causa degli attuali bassi prezzi della materia prima, attualmente nell'UE non è redditizio riciclare in proprio i rifiuti di produzione.

Utilità ecologica

Indio

A prescindere dal metodo di recupero, la produzione secondaria di indio con un pretrattamento manuale (estrazione con solventi o scambio ionico) è da considerare vantaggiosa o almeno equivalente rispetto alla produzione primaria.

Il bilancio ambientale comparativamente buono della produzione primaria di indio è motivato dal fatto che l'indio è ottenuto come sottoprodotto nell'estrazione dello zinco.

Neodimio

Dal punto di vista ecologico, la produzione secondaria di ossido di neodimio dai dischi rigidi è da preferire rispetto alla produzione primaria.

La produzione secondaria basata sulla separazione manuale dei magneti comporta una riduzione del 30 per cento del carico inquinante rispetto alla produzione secondaria meccanica, nella quale il pretrattamento dopo la smagnetizzazione è effettuato tramite un processo di triturazione e successivo frazionamento.

Riassunto

Sostenibilità economica

Per quanto concerne l'*indio*, i risultati della modellizzazione hanno dimostrato che con un pretrattamento manuale il contributo di riciclaggio anticipato(CRA) attualmente riscosso coprirebbe già oggi quasi interamente i costi supplementari del riciclaggio dell'*indio*. La copertura finanziaria completa del riciclaggio dell'*indio* verrebbe raggiunta con un aumento marginale del CRA pari a circa 0,19 franchi/prodotto per gli schermi TV, circa 0,07 franchi/prodotto per gli schermi dei PC e circa 0,08 franchi/prodotto per i computer portatili. Con una lavorazione esclusivamente meccanica, per coprire i costi del riciclaggio dell'*indio* occorrerebbe invece aumentare l'attuale CRA di circa 3,5 franchi/prodotto per gli schermi TV, circa 1,4 franchi/prodotto per gli schermi dei PC e circa 1,3 franchi/prodotto per i computer portatili.

2 Einleitung

Elektro- und Elektronikabfälle stellen sekundäre Rohstofflager dar und sind damit von gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Bedeutung. Seit rund zwanzig Jahren werden diese Abfälle in der Schweiz eingesammelt und einer Verwertung zugeführt. Aus jährlich insgesamt über 120.000 Tonnen werden Basis- und Edelmetalle zurückgewonnen. Seltene Technische Metalle (STM) oder kritische Metalle⁶ wie Indium, Gallium, Tantal, Tellur oder die Metalle der seltenen Erden werden nicht in den Stoffkreislauf zurückgeführt. Die Gründe liegen u.a. in den fehlenden Informationen zur Lokalisierung und zu den Mengen dieser Metalle in den elektronischen Komponenten, in der komplexen Struktur der Abfälle, in den geringen Gehalte in den Geräten, in den metallurgischen Grenzen der Rückgewinnung sowie vor allem auch in den fehlenden ökonomischen Anreizen.

Swico, der schweizerische Verband der Anbieter von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) sowie weiterer verwandter Branchen, nimmt im Auftrag von Herstellern, Importeuren und Grossverteiler die erweiterte Produkteverantwortung wahr und betreibt dazu ein kollektives Rücknahme- und Recyclingsystem. Gegenwärtig werden jährlich rund 60.000 Tonnen Elektronikabfälle aus den Kategorien IKT und Unterhaltungselektronik verarbeitet.

Die acht von Swico beauftragten Recyclingunternehmen verarbeiten die zurückgenommenen Elektronikgeräte mit manuellen und mechanischen Prozessen. Die erzeugten Fraktionen werden vorwiegend im Ausland weiterverarbeitet, um daraus Metalle zurückzugewinnen. Bei der dabei erzielten Wertschöpfung ist die Art der Vorbehandlung wesentlich. Dies gilt auch für seltene technische Metalle, welche in den Geräten oft in sehr geringen Konzentrationen vorliegen (weshalb für sie auch die Bezeichnung "Gewürzmetalle" verwendet wird).

3 Zielsetzungen

Bei den *technischen Abklärungen* ging es in erster Linie um Fragen zur optimalen Vorbehandlung der elektronischen Geräte, wobei sich die Untersuchungen auf die derzeit in der Schweiz angewandten Verfahren der manuellen und mechanischen Vorbehandlung von Elektro- und Elektronikabfällen konzentrierten. Eine Evaluierung neuer Verfahren der Vorbehandlung war nicht Gegenstand des Projektes e-Recmet. Für die Abklärungen zur Endbehandlung und Rückgewinnung von kritischen Metallen wurde auf Ergebnisse von abgeschlossenen oder noch laufenden Projekten v.a. aus Deutschland zurückgegriffen.

Die heutige Preis- und Kostensituation ist noch kein ausreichender Treiber für die Rückgewinnung kritischer Metalle. Deshalb stellte sich die Frage, mit welchen Anreizen eine Rückgewin-

⁶ Im vorliegenden Bericht werden Seltene Technische Metalle (STM) und kritische Metalle als synonyme Begriffe verwendet.

nung ermöglicht werden könnte und ob allenfalls Anpassungen in Sammlung und Logistik notwendig wären. Dadurch stellen sich Fragen zur *wirtschaftlichen Tragbarkeit einer Zufinanzierung* und zum *ökologischen Nutzen einer Rückgewinnung*. Beide Bereiche wurden im Projekt e-Recmet abgedeckt.

4 Methodisches Vorgehen

Das Projekt e-Recmet wurde in drei Arbeitsmodule unterteilt (vgl. Abbildung 4-1).

- Im Modul 1 **“Systemanalyse”** wurde die Liste der kritischen Metalle aufgrund verschiedener Auswahlkriterien analysiert, um zwei Metalle für die weiteren Untersuchungen auszuwählen. Um sicherzustellen, dass in den Elektronikabfällen tatsächlich ein Grossteil dieser Metalle vorkommt, wurden die Mengen in Elektronikgeräten und in anderen Anwendungen bestimmt und einander gegenübergestellt. Für die zwei ausgewählten Metalle, welche in unterschiedlicher Weise chemisch eingebunden sind, wurde anschliessend die Probenaufbereitung und die chemische Analytik entwickelt.
- Im Modul 2 **„Fallstudien“** wurden für die zwei ausgewählten seltenen technischen Metalle Fallstudien durchgeführt. Die Fallstudien beinhalteten Abklärungen zum Recycling, zur wirtschaftlichen Tragbarkeit und zu ökologischen Aspekten. Im Rahmen der Abklärungen zum Recycling wurden Versuche zur Vorbehandlung (manuell/mechanisch) durchgeführt und der Stand der Technik der Rückgewinnung ermittelt. Bei den ökonomischen Aspekten wurde anhand eines systemdynamisches Modells am Beispiel des Metalls Indium untersucht, welche Kostenauswirkungen die Rückgewinnung auf die vorgezogene Recyclinggebühr hätte. Zur Beurteilung der ökologischen Aspekte wurde mit Hilfe von Ökobilanzen untersucht, wie sich die Umweltauswirkungen einer Rückgewinnung der Metalle zu den entsprechenden Umweltauswirkungen bei der Gewinnung dieser Metalle aus den jeweiligen Erzen verhalten.
- Im Modul 3 **„Recyclingsystem kritische Metalle“** wurden die Resultate der Arbeiten zusammengeführt und es wurden Ansätze diskutiert, wie ein Umsetzungsmodell aussehen könnte.

Für jedes der innerhalb der Module definierten Arbeitspakete wurde ein Bericht erstellt, welcher das Vorgehen und die Ergebnisse im Detail erläutert. Der Schlussbericht fasst die Resultate dieser Berichte zusammen und ergänzt sie mit ersten Überlegungen zu einer möglichen Umsetzung. Der interessierte Leser findet in den Berichten gemäss Tabelle 3-1 detailliertere Informationen zu den einzelnen Projektphasen.

Das Projekt e-Recmet wurde von einem Konsortium bestehend aus der Empa (Abteilung Technologie und Gesellschaft, Gruppe CARE-Kritische Materialien und Ressourceneffizienz und Abteilung Advanced Analytical Technologies), der Hochschule Rapperswil (Institut für Umwelt und Verfahrenstechnik UMTEC) und der Ingenieurunternehmung Ernst Basler+Partner AG bearbeitet.

Die ökonomischen Aspekte wurden von der Berner Fachhochschule (Strategy Simulation Lab) untersucht.

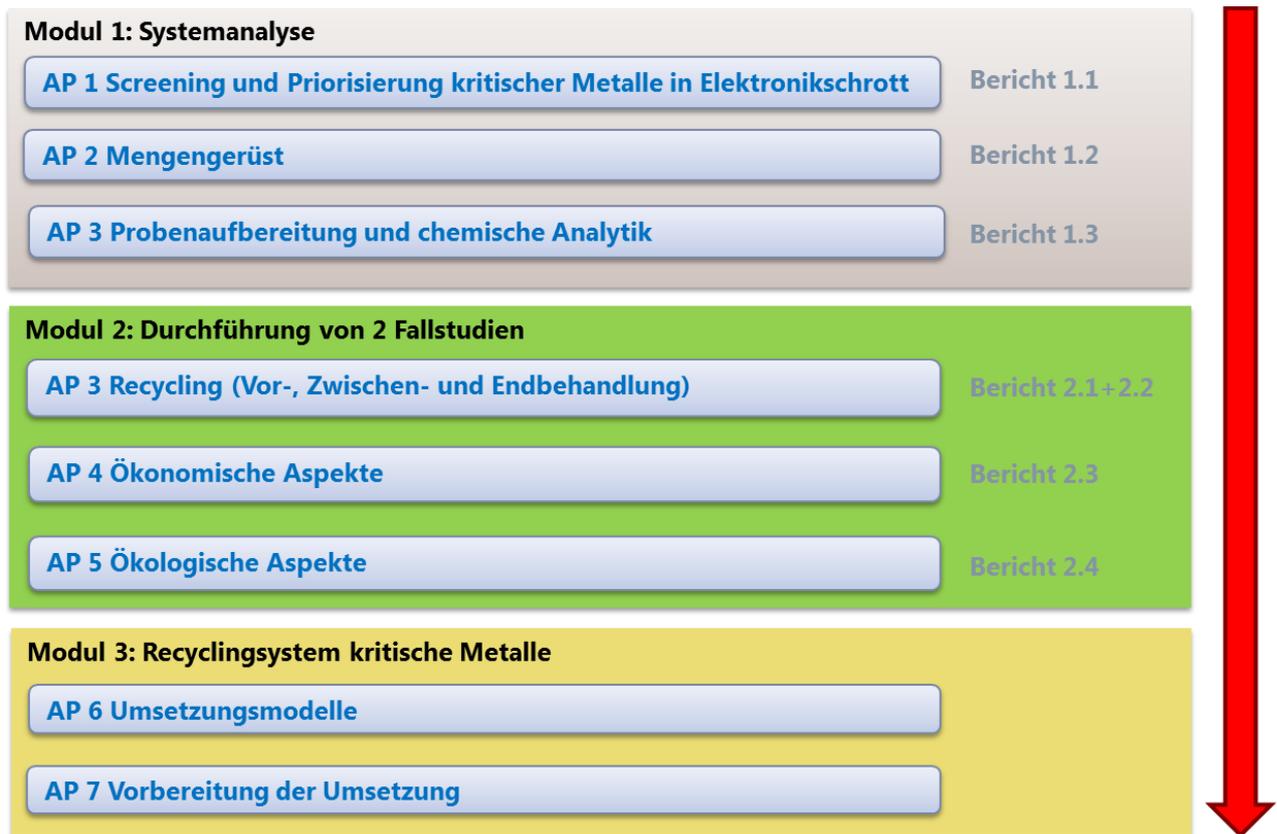


Abbildung 4-1: Ablauf des Projektes e-Recmet

Tabelle 4-1: Berichte des Projektes e-Recmet

Nr.	Bezeichnung	Verfasser
Bericht 1.1	Screening und Priorisierung kritischer Metalle in Elektronikaltgeräten	Empa / Umtec
Bericht 1.2	Indium und Neodym in elektronischen Geräten und anderen Anwendungen	Empa
Bericht 1.3	Probenaufbereitung und chemische Analytik von Indium und Neodym	Empa / Umtec
Bericht 2.1	Vorbehandlung von Elektronikschrott zur Rückgewinnung von Indium und Neodym	Empa
Bericht 2.2	Stand der Technik der Rückgewinnung von Indium und Neodym aus Elektronikschrott	Umtec / Empa
Bericht 2.3	Dynamische Modellierung der Mengen und Kosten des Recyclings von Indium aus Bildschirmgeräten	Berner Fachhochschule / Empa
Bericht 2.4	Vergleichende Ökobilanz der Rückgewinnung von Indium und Neodym aus Elektronikschrott mit der Primärgewinnung	Ernst Basler+Partner AG / Empa

5 Screening und Priorisierung

5.1 Vorgehen

Die Auswahl der seltenen technischen Metalle für die detaillierten Untersuchungen im Rahmen der Fallstudien erfolgte stufenweise basierend auf dem Schema und den Kriterien gemäss Abbildung 5-1.

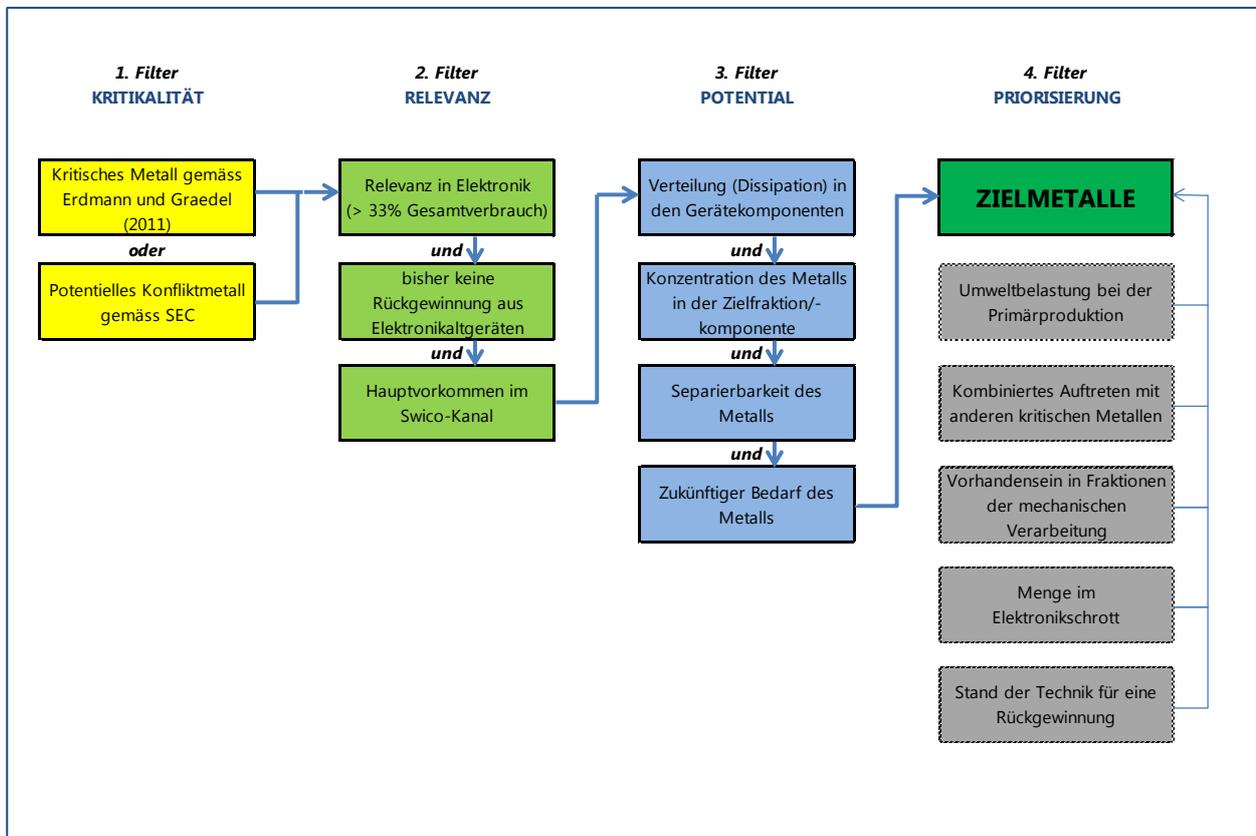


Abbildung 5-1: Schema und Kriterien für die Auswahl seltener technischer Metalle in Elektronikschrott

5.2 Kritikalität

Ein Metall wird dann als kritisch bezeichnet, wenn das Versorgungsrisiko und dessen Auswirkung auf die Wirtschaft im Vergleich zu übrigen Metallen hoch sind. Im Bericht (European Commission 2014) wurden aus einer Liste von ursprünglich 45 Rohstoffen 20 als kritisch bezeichnet, darunter befinden sich u.a. die Metalle Antimon, Beryllium, Gallium, Germanium, Indium, die Platingruppenmetalle, die Metalle der seltenen Erden, Kobalt, Magnesium, Niob und Wolfram.

(Erdmann and Graedel 2011) haben untersucht, wie häufig mineralische Rohstoffe in sieben in einem Zeitraum von 2007 bis 2010 erschienenen Studien als kritisch bezeichnet wurden. Im Pro-

jekt e-Recmet wurden in einem ersten Schritt diejenigen Metalle ausgewählt, welche in mindestens drei dieser Studien erwähnt und mit einer Häufigkeit von einem Drittel der Fälle als kritisch beurteilt wurden.

Zusätzlich wurden diejenigen Metalle berücksichtigt, welche aus "Konfliktmineralien" stammen können. Es handelt sich dabei um Mineralien, welche in Konfliktgebieten wie der Demokratischen Republik Kongo und angrenzenden Ländern abgebaut werden und mit deren Abbau Bürgerkriege mitfinanziert wird (SEC 2012).

5.3 Relevanz

Von Interesse sind in erster Linie kritische Metalle, welche in relevanten Mengen in elektronischen Geräten eingesetzt werden. Als Grenze wurde festgelegt: Mindestens ein Drittel der Weltjahresproduktion des Metalls kommt in elektronischen Anwendungen zum Einsatz.

Kritische Metalle, welche bereits heute aus elektronischen Geräten zurückgewonnen werden (wie z.B. Gold), sind für dieses Projekt nicht weiter von Interesse, auch wenn die Rückgewinnung allenfalls gesteigert werden könnte. Ziel ist es kritische Metall zu identifizieren, welche heute noch nicht zurückgewonnen werden.

Von den relevanten kritischen Metallen, welche heute noch nicht zurückgewonnen werden, sind in diesem Projekt diejenigen von Interesse, welche in den WEEE-Kategorien 3 und 4 (Kategorien 3 „Informations- und Kommunikationstechnologien“ sowie Kategorie 4 „Unterhaltungselektronik“) vorkommen⁷.

5.4 Potential

Die für die weiteren Untersuchungen ausgewählten Metalle sollen sich auf einzelne, wenige Komponenten konzentrieren, d.h. sie sollen nicht dissipativ über verschiedene Komponenten verteilt sein. Die Konzentration in der Komponente soll mindestens der heutigen, resp. absehbaren zukünftigen Konzentration im Erz entsprechen.

Die metallhaltige Komponente(n) ist/sind im Rahmen einer manuellen oder mechanischen Zerlegung separierbar, d.h. die Metalle sind nicht in eine komplexe Matrix eingebunden, z.B. als Additiv etc. Von Interesse sind Metalle, bei denen der zukünftige Bedarf in bestehenden Studien, z.B. (Angerer et al. 2009) (Elsner et al. 2010), als hoch eingeschätzt wird.

⁷ Diese Kategorien entsprechen den zurückgenommenen Gerätekategorien von Swico.

5.5 Priorisierung

Die verbleibenden Metalle wurden anschliessend priorisiert. Folgende Kriterien wurden dabei berücksichtigt:

- a) *Umweltrelevanz bei der Primärproduktion:* Die Umweltrelevanz wurde anhand des Indikators „kumulierter Energieaufwand (KEA)“ von der Entnahme des Rohstoffs bis zur Bereitstellung beurteilt. Bei einer hohen Umweltrelevanz wurde das kritische Metall hoch priorisiert.
- b) *Kombiniertes Auftreten mit anderen kritischen Metallen:* Wenn kritische Metalle in ihren Anwendungen mit andere kritischen Metallen vergesellschaftet sind, resultierte eine erhöhte Priorität.
- c) *Vorhandensein in Fraktionen der mechanischen Verarbeitung:* Bei der Firma Immark AG in Regensdorf/CH, welche Elektro- und Elektronikgeräte mechanisch verarbeitet, wurde 2011 eine Stoffflussanalyse durchgeführt, bei welcher die Outputfraktionen auf den Gehalt an kritischen Metallen untersucht wurden. Das Vorkommen seltener technischer Metalle in den Outputfraktionen weist darauf hin, dass diese Metalle in den Elektrogeräten in messbaren Konzentrationen vorkommen. Metalle, welche in den Outputfraktionen detektiert wurden, wurden deshalb prioritär weiterverfolgt.
- d) *Menge im Elektronikschrott:* Wenn kritische Metalle bei den Swico Gerätekategorien in hohen Mengen vorkommen, wurde deren Priorität ebenfalls erhöht.

5.6 Auswahl der Zielmetalle

Aus der Gesamtbeurteilung resultierten **Indium und Neodym** als am Geeignetsten für die weiteren Untersuchungen.

Die Mengen an Neodym und Indium, welche potentiell im Swico-Kanal zurückgewonnen werden könnten, sind deutlich höher als die Mengen an anderen, noch nicht zurückgewonnenen kritischen Metallen. Beide Metalle sind zudem mit anderen kritischen Metallen vergesellschaftet, was bei einer weitergehenden manuellen Zerlegung bzw. mechanischen Verarbeitung einen möglichen Zusatznutzen ergibt.

Das Kriterium der Umweltbelastung war auf dieser Stufe nicht selektiv genug. Allerdings gilt es zu beachten, dass detaillierte Datengrundlagen fehlen und auf dieser Stufe teilweise Näherungsbetrachtungen notwendig waren (Sander, K. et al 2012).

Sowohl bei Indium wie bei Neodym ist die geeignetste Methode der Endbehandlung noch offen. Es gibt jedoch sowohl beim Indium als auch beim Neodym verschiedene Projekte, u.a. der EU und in Deutschland, in welchen Rückgewinnungslösungen entwickelt werden.

6 Grundlagen

6.1 Indium

6.1.1 Vorkommen in Elektronikprodukten

Die wichtigste Verwendung von Indium in Elektronik-Produkten ist Indium-Zinnoxid (ITO) in Flüssigkristallanzeige-Flachbildschirmen (LCDs). Das Mischoxid besteht üblicherweise aus 90% In_2O_3 und 10% SnO_2 , was einen Massenanteil von 78% Indium im ITO ergibt (Angerer, Erdmann et al. 2009). Gemäss Untersuchungen in (IUTA and fem 2011) kann von ca. 780 mg In pro Quadratmeter Flachbildschirmpanel ausgegangen werden. Abbildung 6-1 zeigt manuell zerlegte LCD-Panels.



Abbildung 6-1: LCD-Panels aus der Zerlegung von Flachbildschirmen (Fotos: Empa)

Indium kann auch in Loten enthalten sein, zum Beispiel um zusammen mit Zinn das giftige Blei zu ersetzen und befindet sich damit auch in den Leiterplatten. Eine Untersuchung der Empa von Leiterplattenbruch nach einer mechanischen Verarbeitung in einem Querstromzerspanner ergab 35.6 mg In/kg Leiterplattenbruch (Wäger et al. 2014). Da von diesen Leiterplatten die meisten Komponenten und teilweise auch das Lot bereits abgetrennt wurden, könnte die Menge an Indium in Leiterplatten eher unterschätzt werden.

Indium ist auch Bestandteil von Leuchtdioden (LED), zum Beispiel als Aluminium-Indium-Gallium-Phosphid und als Indium-Gallium-Nitride mit unterschiedlichen Farbeigenschaften. Da

der Indium-Gehalt mit 0.029 mg/LED sehr klein ist und nur eine geringe Menge an LEDs in den betrachteten Produkten verbaut ist (Buchert et al. 2012), werden diese Komponenten von der weiteren Untersuchung ausgeschlossen. Aktuell werden gemäss (USGS 2013) 670 t Indium jährlich raffiniert, wovon 390 t aus China stammen. Kanada, Japan und Korea raffinierten je ca. 70 t Indium.

6.1.2 Mengen in Elektronikprodukten

Tabelle 6-1 zeigt eine Übersicht der verkauften, genutzten und entsorgten Indium-Mengen in den relevantesten Elektronik-Produkten für das Jahr 2009 bzw. 2012.

Insgesamt ist das Indium-Lager stark am Wachsen, da der Zufluss über die verkauften Produkte rund fünf Mal grösser ist als der Abfluss über die entsorgte Menge. Der Markt an relevanten Produkten, die Indium enthalten, ist also noch nicht gesättigt. Der Anteil an Indium in Displays an der Gesamtmenge macht ca. 61 Gew-% (Rücklauf), resp. 73 Gew-% (Lager) aus.

Tabelle 6-1: Verkaufte, gelagerte und entsorgte Indium-Mengen in Elektronik-Produkten

Produkt	Verkauf 2009 ¹ [kg In/Jahr]	Lager 2009 ¹ [kg In]	Rücklauf 2012 ¹ [kg In/Jahr]
Flachbild PC-Monitor	58	339	39
Desktop PC	25	141	13
Laptop PC	63	197	17
Mobiltelefon/Smartphone	19	65	4
Grosser Multifunktionsdrucker	73	n.b.	7
Navigationsgerät	10	31	n.b.
Flachbild TV	250	612	17
Übrige	13	29	7
Total	510	1'414	104
In-Anteile	[Gew-%]	[Gew-%]	[Gew-%]
Anteil in Displays	65	73	61
Anteil in Leiterplatten	35	27	39

¹ Entspricht jeweils dem letzten Jahr mit dem vollständigsten Datensatz

6.1.3 Konzentration im Vergleich zu Primärminen

Die Indium-Konzentrationen in verschiedenen Elektronikaltgeräten sind in Tabelle 5-2 aufgeführt und mit der Konzentration einer Primärmine verglichen. Gemäss den vorliegenden Daten liegt die Indium-Konzentration von ausgebauten LCD-Modulen mit 155-247 ppm deutlich über der höchsten vorkommenden Indium-Konzentration in einer Primärmine von 1-100 ppm (IUTA and fem 2011; USGS 2013).

Tabelle 6-2: Indium in Elektronikgeräten

Produkte/Komponente	entsorgte Menge 2012 [t]	In-Konzentration [ppm]
Gesamtmenge der betrachteten Elektronik-Produkte	39'172	2.7
Flachbild PC-Monitor	2'525	15.3
Desktop PC/Server	5'096	2.6
Laptop PC	1'275	13.4
Flachbild TV	1'976	8.7
LCD-Panel in Elektronik-Produkten ¹		155-247
Primärmine ²		1-100

¹ Liquid Cristal Display (LCD)-Panel 5-8 Gew-% von Monitor/Laptop/TV, vgl. Tabelle 6-2

² (USGS 2013)

6.1.4 Indium in anderen Anwendungen

In Tabelle 6-3 sind die Indium-Mengen in den relevantesten übrigen Anwendungen für das Jahr 2013 zusammengefasst. Die Indium-Mengen in den verkauften Produkten liegen für alle Anwendungen in einer ähnlichen Grössenordnung. Am meisten Indium ist in Steuerelementen von Kernkraftwerken gelagert. Dieses ist jedoch radioaktiv und eignet sich unter den heutigen technologischen Voraussetzungen nicht für eine Wiederverwertung. Für eine mögliche Rückgewinnung sind Indium in Autoelektronik und Batterien die bedeutendsten Anwendungen.

Tabelle 6-3: Indium-Mengen in anderen Anwendungen

Indium-Anwendung	Verkäufe 2013 [kg In/Jahr]	Lager 2013 [kg In]	Rücklauf 2013 [kg In/Jahr]
Photovoltaik ¹	42	103	n.b.
Autos ²	45	618	35
Steuerelemente (KKWs)	n.b.	1'000	0
Batterien ³	52	52	38
Total	139	1'772	73

¹ Mittelwerte

² Rücklauf: Ausserverkehrsetzungen

³ Rücklauf: gesammelte Mengen

6.1.5 Probenaufbereitung und chemische Analytik

Bei der chemischen Analyse der Indiumgehalte von LCD Panels wurden zur Probenvorbereitung je zehn LCD Panels der gleichen Untersuchungsgruppe übereinandergelegt und mit einem Spezialbohrer durchbohrt. Der dabei anfallende Staub wurde anschliessend zu einer Probe vereint. Die Proben wurden in einem mit 12 Stahlkugeln bestückten 50 ml Stahlbecher 3 Minuten bei -197 °C vorgekühlt und anschliessend 3 Minuten bei -197 °C und einer Frequenz von 25 Schwingungen/s in einer Kryomühle gemahlen.

Bei den gemischten Fraktionen aus der mechanischen Verarbeitung von LCD Geräten wurde zuerst nicht mahlbares Material (Siebrest) von Hand entfernt. Das restliche Material wurde dem Mahlverfahren in einer Ultrazentrifugalmühle mit Flüssig-N₂ bei 18'000 Umdrehungen/Minute unterzogen. Die Proben wurden manuell im Becherglas bei -197 °C während 2 Minuten vorgekühlt. Der 1. Mahldurchgang erfolgte mit einem Sieb mit Maschengrösse <1.5 mm, während im 2. Mahldurchgang mit einem Sieb mit Maschengrösse <0.5 mm gearbeitet wurde.

In beiden Fällen wurden ca. 0.2 g der gemahlten Proben in ein 70 ml Quarzgefäss eingewogen, mit 5 ml HNO₃ 65% p.a. versetzt und im Hochdruckverascher (Paar HPA-S) bei 240 °C und 135 bar Druck 1 Stunde aufgeschlossen. Anschliessend wurden die Lösungen abgekühlt und in einen 50 ml Messkolben überführt.

Die Quantifizierung der zuvor membranfiltrierten (0.45 µm) Lösungen erfolgte beim HPA-Aufschluss mittels Plasma-Emissionsspektrometrie (ICP-OES). Als Qualitätssicherung dienten Blindlösungen und zertifizierte Standardreferenzmaterialien.

Die Resultate der Indium-Analysen von LCD Panels finden sich in Tabelle 7-2.

6.2 Neodym

6.2.1 Vorkommen in Elektronikprodukten

Neodym wird seit den 90er Jahren in Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten in kleinen leistungsfähigen Motoren von IKT-Geräten verwendet. Ca. 31% der Gesamtnachfrage nach Neodym findet Anwendung in Magneten von Festplatten (HDDs) (Sander, K. et al 2012). Gemäss (Rotter, V.S. et al. 2012) befindet sich der überwiegende Teil des Neodyms in den Motoren von HDDs, welche zum Antrieb der Spindel und zum Bewegen des Schreib-Lese-Kopfs verwendet werden (siehe Abbildung 5-2). Durch die Einführung der neuen 'Solid State Drive' (SSD)-Technologie, welche Mikrochips zum Speichern von Daten verwendet und über keine beweglichen Teile verfügt, werden vor allem in Laptops in Zukunft wahrscheinlich weniger Neodym-Magnete verbaut werden (Schüler et al. 2011).

Neodym wird im Weiteren eingesetzt in Magneten von miniaturisierten Lautsprechern, vor allem in Kopfhörern, Handys und Mikrofonen. Der Neodym-Gehalt in Magneten beträgt typischerweise ca. 23-29%. Zum Teil ist Neodym vergesellschaftet mit Praseodym und geringen Anteilen an Dysprosium (Buchert et al. 2012).



Abbildung 6-2: Harddisk mit Neodym-Eisen-Bor Magneten (Fotos: Umtec)

6.2.2 Mengen in Elektronikprodukten

Tabelle 5-4 zeigt eine Übersicht über die Neodym-Flüsse und Lager für das Jahr 2009 bzw. 2012 in Elektronik-Produkten. Das Neodym-Lager wächst momentan weiter an mit einem rund doppelt so grossen Zufluss im Vergleich zum Rücklauf. Das meiste Neodym befindet sich in den Magneten (63-82 Gew-%).

Tabelle 6-4: Verkaufte, gelagerte und entsorgte Neodym-Mengen in Elektronik-Produkten

Produkt	Verkauf 2009 ¹ [kg Nd/Jahr]	Lager 2009 ¹ [kg Nd]	Rücklauf 2012 ¹ [kg Nd/Jahr]
Flachbild PC-Monitor	273	1'604	183
Desktop PC	3'713	20'913	1'986
Laptop PC	4'787	15'059	1'306
Mobiltelefon/Smartphone	366	999	52
Grosse Multifunktionsdrucker	2'251	n.b.	230
Flachbild TV	1'343	3'408	96
Kopfhörer	318	1'016	0.14
Lautsprecher	1'276	14'591	2'682
Übrige	342	1'303	353
Total	14'668	58'894	6'825
Nd-Anteile	[%]	[%]	[%]
Anteil in Magneten	63	82	82
Anteil in Leiterplatten	36	18	18

¹ Entspricht jeweils dem letzten Jahr mit dem vollständigsten Datensatz

6.2.3 Konzentration im Vergleich zu Primärminen

In Tabelle 5-5 sind die Neodym-Konzentrationen verschiedener Produkten im Elektronikaltgeräte-Recycling aufgelistet und mit der Konzentration einer Primärmine verglichen. Lautsprecher und Laptops enthalten bereits ähnlich viel Neodym wie in einer Primärmine. Wenn aber die Magnete mittels neuen Separationstechnologien von den übrigen Materialien getrennt werden können, ist im Vergleich zu einer Primärmine mit bis rund 200 mal höheren Neodym-Konzentration in den Magneten zu rechnen.

Tabelle 6-5: Neodym im Elektronikaltgeräte-Recycling

Produkte/Komponente	entsorgte Menge 2012 [t]	Nd-Konzentration [ppm]
Gesamtmenge der betrachteten Elektronik-Produkten	39'172	174
Desktop PC/Server	5'096	377
Laptop PC	1'275	1'024
Mobiltelefone/Smartphones	70	740
Lautsprecher	1'075	3'325
Magnete in Elektronik-Produkten ²		28'000-250'000
Primärmine ¹		1'200 -17'600

¹ <http://www.goldinvest.de/index.php/quantum-rare-earth-vergibt-option-auf-australische-projekte-an-florella-holdings-22699> (Die absoluten Konzentrationen von Neodym (Nd2O3) reichten von 0.12 bis 1.76 Gew-%)

² vgl. Tabelle 6-8

6.2.4 Neodym in anderen Anwendungen

Neodym in Elektrofahrzeugen machte 2013 bei den Verkäufen Neodymhaltiger Produkte den höchsten Anteil aus – mit noch weiterhin steigender Tendenz. Danach folgen Batterien, Klimaanlagen und Autos.

Tabelle 6-6: Neodym-Mengen in anderen Anwendungen

Neodym-Anwendung	Verkäufe 2013 [kg Nd/Jahr]	Lager 2013 [kg Nd]	Rücklauf 2013 [kg Nd/Jahr]
Autos	749	10'265	582
Elektrofahrräder ¹	1'800	5'780	n.b.
Elektroroller/motorräder	53	528	n.b.
Windkraft	0	25	0
Aufzüge ²	467	4'454	n.b.
Klimaanlagen	891	6'664	n.b.
Batterien ³	1'373	n.b.	1'001
Total	5'335	27'715	1'583

¹Daten von 2012, mittlerer geschätzter Bestand = 170'000 Stück

²Daten nur von Schindler Aufzügen

³Mittelwerte

Das grösste Neodym Lager befindet sich in den Autos gefolgt von Klimaanlage und Aufzügen. Daten über Rückläufe von neodymhaltigen übrigen Anwendungen sind rar, da die entsorgte Mengen oft noch sehr gering sind.

Autos und NiMH-Batterien enthalten gegenwärtig die wichtigsten bekannten Mengen an Neodym im Rücklauf.

6.2.5 *Probenaufbereitung und chemische Analytik*

Vor der chemischen Analyse der Magnete auf Neodym wurden diese entmagnetisiert und zerkleinert. Die Magnete in den Lautsprechern aus Passiv- und Aktivlautsprecherboxen wurden mit einem Backenbrecher, die übrigen mittels Mörser zerkleinert. Für die Entmagnetisierung wurden die Magnete eine Stunde in einem Muffelofen über die jeweilige Curie-Temperatur des Materials erhitzt (Neodym-Magnete 400°C, Ferritmagnete 800°C). Bei Lautsprechern aus Aktiv- und Passivlautsprechern sowie Vibrationsalarmen aus Mobiltelefonen war nach der Entmagnetisierung bei 400°C eine zusätzliche Entmagnetisierung bei 800°C erforderlich.

Die entmagnetisierten Proben wurden jeweils in einem mit 12 Stahlkugeln bestückten 50 ml Stahlbecher 3 Minuten bei -197°C vorgekühlt und anschließend 3 Minuten bei -197°C und einer Frequenz von 25 Schwingungen/s in einer Kryomühle gemahlen. Anschliessend wurden die gemahlene Proben mittels energiedispersiver Röntgenfluoreszenzspektrometrie einer orientierenden chemischen Analyse gemäss Empa SOP 03 850 unterzogen. Dabei kam ein Thermo Scientific NITON XL3t Röntgenfluoreszenz-spektrometer zum Einsatz. Die Bestimmungsgrenze für Nd lag bei <0.05 %.

Diejenigen Proben, bei denen in der orientierenden chemischen Analyse Neodym gefunden werden konnte, wurden einer quantitative Analysen unterzogen. Bei Magneten des Typs $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ wurden dazu ca. 0.1 g der gemahlene Probe mit 10 ml Königswasser 1:1 verdünnt aufgeschlossen. Nach einer Kochzeit von 5 Minuten war das Probenmaterial grösstenteils gelöst. Nach dem Abkühlen wurde die Probe quantitativ in einen 50 ml Messkolben überführt. Die Quantifizierung der zuvor membranfiltrierten (0.45 μm) Lösungen erfolgte, nach Verdünnung mit Reinstwasser 1:50, mittels Plasmaemissionsspektrometrie (ICP-OES). Der Rückstand des membranfiltrierten Anteils wurde der REM-EDX-Analyse zugeleitet, um die Abwesenheit von Nd zu bestätigen. Bei Magneten des Typs $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ bzw. $(\text{Sr}+\text{Ba})\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ wurden ca. 0.1 g der gemahlene Probe wurde mit 5 ml konzentrierter Salzsäure aufgeschlossen. Nach einer Kochzeit von 5 Minuten war das Probenmaterial grösstenteils gelöst. Nach dem Abkühlen wurde die Probe quantitativ in einen 50mL Messkolben überführt. Die Quantifizierung der zuvor membranfiltrierten (0.45 μm) Lösungen erfolgte, nach Verdünnung mit Reinstwasser 1:50, mittels Plasmaemissionsspektrometrie (ICP-OES). Der Rückstand des membranfiltrierten Anteils wurde der REM-EDX-Analyse zugeleitet um die Abwesenheit von Nd festzustellen.

Die Resultate der Neodym-Analysen von Magneten aus Elektronikprodukten Panels finden sich in Tabelle 7-8.

6.3 Vergleich Elektronik-Produkte mit anderen Anwendungen

Werden die Indium-Mengen in Elektronik-Produkten mit übrigen Anwendungen verglichen, so enthalten Elektronik-Produkte mehr Indium im Verkauf, wobei die Menge an Indium in neu zugeführten Steuerstäben nicht ermittelt werden konnte (Abbildung 6-3). In der Nutzung (Lager) ist mit 1'770 kg mehr Indium in übrigen Anwendungen gelagert als in Elektronik-Produkten mit 1'410 kg. Da das Indium in Steuerelementen aufgrund der radioaktiven Verstrahlung nicht für eine Wiederverwertung geeignet ist, bilden Elektronik-Produkte dennoch das relevanteste Indium-Lager der Schweiz.

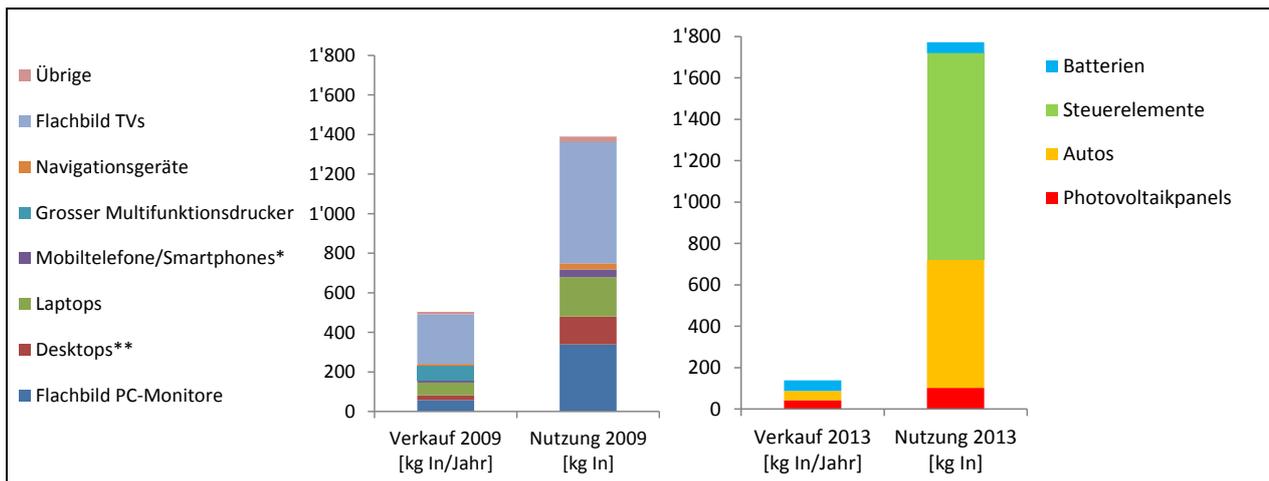


Abbildung 6-3: Indium in Elektronik-Produkten (links) und übrigen Anwendungen (rechts)

Neodym ist sowohl im Verkauf wie auch in der Nutzung mit 14'550 kg/Jahr bzw. 58'240 kg in Elektronik-Produkten in deutlich grösseren Mengen vorhanden als in übrigen Anwendungen mit 5'340 kg bzw. 27'720 kg (Abbildung 6-4). Elektronik-Produkte bilden demnach den relevantesten Input sowie das relevanteste Lager von Neodym in der Schweiz.

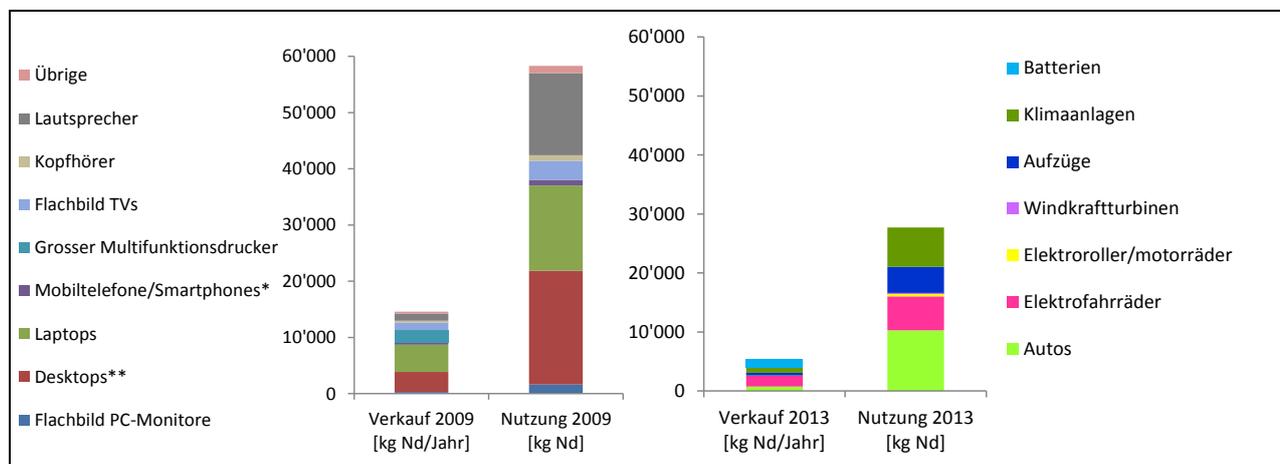


Abbildung 6-4: Neodym in Elektronik-Produkten (links) und übrigen Anwendungen (rechts)

7 Technische Machbarkeit und Recyclingkosten

7.1 Indium

7.1.1 Behandlungsschritte

Die indiumhaltigen Produktgruppen TV Flachbildschirme, LCD Monitor, Laptop, Tablet und Handy können grundsätzlich manuell oder mechanisch vorbehandelt werden.

Bei der *manuellen Vorbehandlung* werden die Geräte zerlegt, wobei zwei Zielsetzungen verfolgt werden: Einerseits die Entfernung der quecksilberhaltigen Hintergrundbeleuchtung (CCFL-Röhrchen), welche in Flachbildschirmen der ersten Generationen noch vorhanden sind und andererseits die Freilegung der einzelnen Komponenten, welche mit Ausnahme der Hintergrundbeleuchtung direkt verwertet oder an Abnehmer für eine Weiterbehandlung verkauft werden können. Bei diesen Prozessen ist die Arbeitssicherheit zu beachten (Quecksilberemissionen bei der Zerlegung). Frühere Untersuchungen in Zusammenarbeit mit der SUVA zeigten jedoch eine grundsätzliche Machbarkeit dieses Verfahrens, sofern gewisse Sicherheitsvorkehrungen beachtet werden (Böni and Widmer 2011). Die manuelle Zerlegung wird heute in der Schweiz in einigen Zerlegebetrieben, welche im Auftrag der Recycler arbeiten, praktiziert.

Aufgrund der begrenzten Verarbeitungskapazität der manuellen Vorbehandlung haben sich in den letzten Jahren auch *mechanische Vorbehandlungsverfahren* etabliert. Die SOVAG betreibt in Rubigen/BE eine Anlage mit einer Kapazität von 500 kg/h, welche sowohl Leuchtstoffröhren, als auch Flachbildschirme verarbeiten kann. Die Geräte werden in einem Shredder zerkleinert und anschliessend in sechs verschiedene Korngrößen abgeseibt. Magnetische Metalle werden über einem Metallabscheider abgeschieden. Die mit Staub und Quecksilber belastete Prozessabluft wird über zwei Zyklon Filter und einen Aktivkohlefilter geführt. Insgesamt entstehen bei diesem Prozess neun Fraktionen (magnetische Metalle, Siebstufen 1-6, Zyklon 1 und 2, Aktivkohlefilter).

Kombinierte manuell/mechanische Vorbehandlungsverfahren werden im Ausland vereinzelt entwickelt und eingesetzt (u.a. (Rydén 2014), (Donoghue, Moroney, and Harrison 2014), (Fröhlich 2015)). Dabei werden die Geräte manuell vorzerlegt und die Bildschirme, resp. LCD-Panels werden danach entlang den Hintergrundbeleuchtungen aufgesägt. Der Prozess findet unter Unterdruck statt. Dieses Verfahren kann vorwiegend bei PC Monitore eingesetzt werden, bei denen die Hintergrundbeleuchtungen oben und unten am Display angeordnet sind. Bei TV Flachbildschirmgeräten ist die Hintergrundbeleuchtung auf die ganze Fläche verteilt, was den Einsatz solcher Verfahren einschränkt.

Andere Verfahren zur Vorbehandlung von Flachbildschirmen sind bisher nicht erprobt.

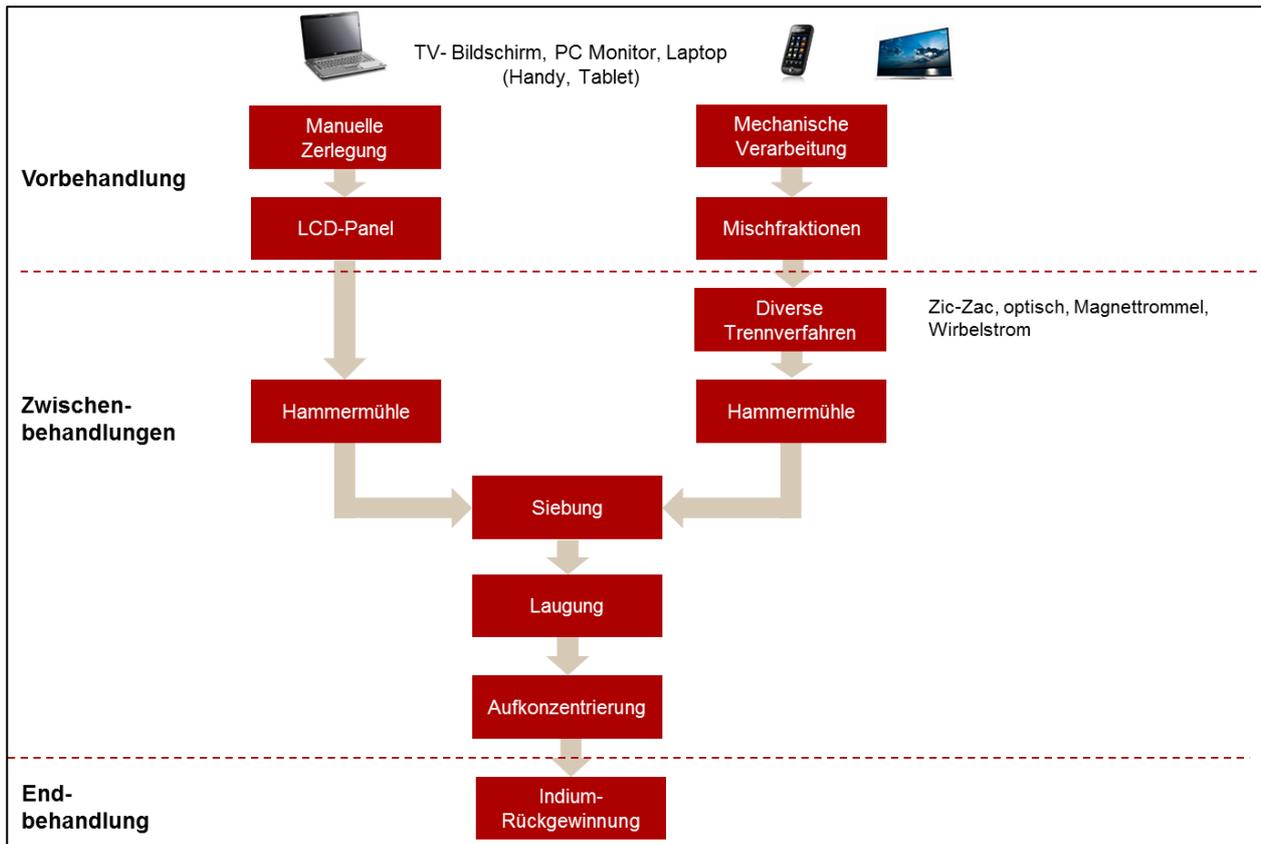


Abbildung 7-1: Behandlungskette Indiumhaltiger Produkte

Für eine Indium-Rückgewinnung sind die Ausgangsmaterialien bei der manuellen und der mechanischen Vorbehandlung unterschiedlich. Aus der manuellen Vorbehandlung resultieren indiumhaltige LCD-Panels. Bei der mechanischen Vorbehandlung ist das Indium auf mehrere Fraktionen verteilt, was weitere Trennschritte erfordert (Zic-Zac, optische Verfahren, Wirbelstrom etc.). In beiden Fällen wird die indiumhaltige Fraktion mit einer Hammermühle zerkleinert, um daraus nach einer Absiebung über hydrometallurgische und nasschemischen Prozesse ein vermarktungsfähiges Indium Konzentrat herzustellen.

Die Indium Rückgewinnung ist bei Umicore in Hoboken/B für Produktionsrückstände industriell verfügbar. Gemäss Angaben der Umicore könnte das indiumhaltige Konzentrat im gleichen Prozess verarbeitet werden, falls es die erforderliche Reinheit und den erforderlichen Indiumgehalt erreicht.

7.1.2 Resultate der Versuche zur Vorbehandlung

7.1.2.1 Manuelle Vorbehandlung

In einem Versuch wurden in einem Zerlegebetrieb je 20 TV Bildschirmen mit grosser (> 40“), mittlerer (30-39“) und kleiner Bildschirmdiagonale (< 29“), 20 PC Monitore sowie 20 Laptops zerlegt. Dabei wurden die Zerlegezeiten und die Gewichte der Komponenten bestimmt (Abbildung 7-2).

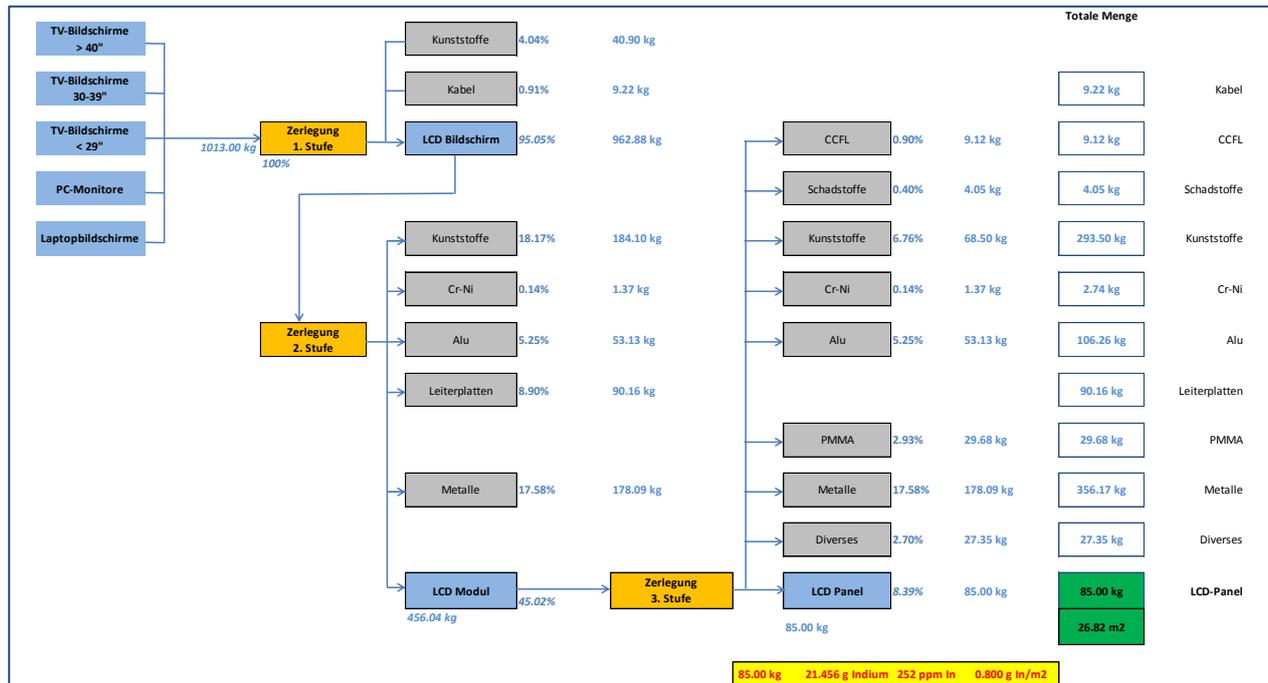


Abbildung 7-2: Zerlegeschritte und Komponenten bei der manuellen Zerlegung von Flachbildschirmen (Quelle: Bird-RDS SA)

Die Zerlegezeiten der einzelnen Produktgruppen variierten zwischen rund 10 (Laptopbildschirm), resp. rund 32 Minuten (TV > 40“). Die Zerlegeleistung betrug zwischen 5 und 37 kg/h (Tabelle 7-1).

Tabelle 7-1: Zerlegezeiten und Zerlegeleistung bei der manuellen Demontage (Quelle: Bird-RDS SA)

Gerät	Fläche [m²]	Gewicht			Zerlegezeit			Zerlegeleistung	
		Gerät [kg]	LCD Modul [kg]	LCD Panel [kg]	Stufe 1 [min]	Stufe 2 [min]	Stufe 3 [min]	TOTAL [min]	[kg/h]
TV > 40"	0.57	21.4	9.3	1.5	2.1	13.1	17.3	32.5	37
TV 30-39"	0.40	13.4	5.1	1.0	0.5	13.7	9.5	23.7	34
TV < 29"	0.24	8.3	3.0	0.6	0.9	7.5	8.2	16.6	30
PC Monitor	0.13	5.2	1.8	0.3	0.1	4.8	5.7	10.6	29
Laptop ¹	0.08	0.8	0.4	0.2	0.0	5.0	4.6	9.6	5

¹ nur Bildschirm, ohne Recheneinheit

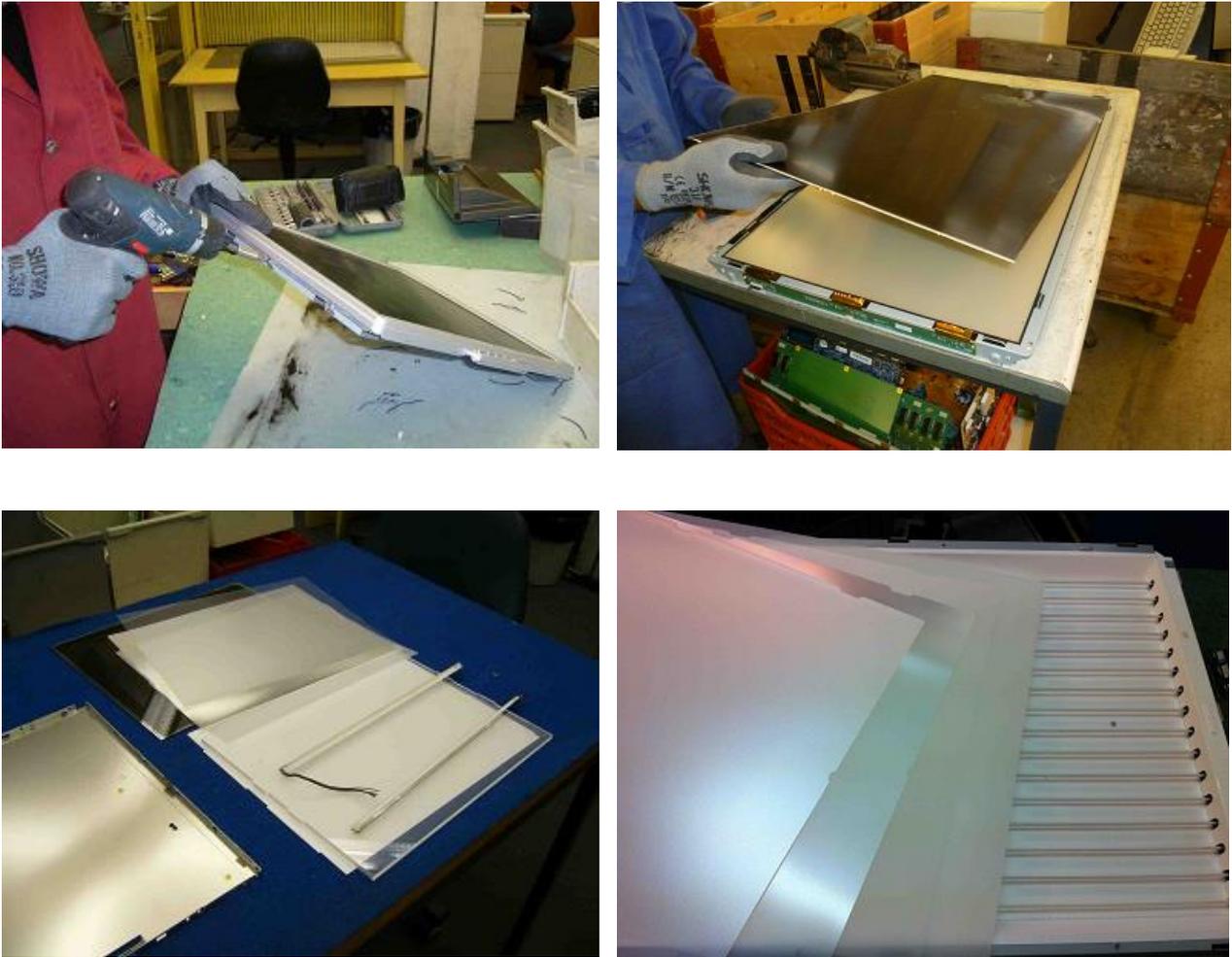


Abbildung 7-3: Manuelle Zerlegung von Flachbildschirmen (Fotos: Bird-RDS SA)

oben links: LCD Modul; oben rechts: LCD Panel; unten links: Folien und Hintergrundbeleuchtung PC Monitor; unten rechts: Hintergrundbeleuchtung bei einem TV Flachbildschirm

Die chemischen Analyse ergaben Indiumgehalte von 155-242 ppm, resp. 613-931 mg/m² (Tabelle 7-2).

Tabelle 7-2: Indium Gehalte von LCD-Panels

Probe	je 10 Panels	Gewicht total kg	Fläche total m ²	Indium in Probe	
				ppm	mg/m ²
TV gross	38-43"	18.0	4.55	155 +/-1	613 +/- 4
TV mittel	27-32"	9.6	2.37	223 +/-7	902 +/- 27
TV klein	20-22"	5.2	1.27	227 +/-7	931 +/- 28
PC Monitor	17-19"	4.3	1.07	192 +/-1	772 +/- 2
Laptop	<- 14"	2.4	0.66	247 +/-2	900 +/- 9

+/- absolute Standardabweichung s aus n=3

Als Basiswert für die weiteren Untersuchungen wird von **800 mg In/m²** ausgegangen. Anhand der Fläche kann die Indium-Menge, welche in den LCD-Panels vorhanden sind, abgeschätzt werden. Insgesamt betrug die Fläche der manuell demontierten Flachbildschirmgeräte 26.82 m², was 21.456 g Indium entspricht. Dieses Indium befindet sich in 85 kg LCD Panels.

7.1.2.2 Mechanische Vorbehandlung

In einer Anlage zur mechanischen Verarbeitung von Flachbildschirmen wurden 508 PC-Monitore (15-23") mit einem Gesamtgewicht von 1'890 kg verarbeitet.

Die Anlage mit einer Kapazität von 500 kg/h kann sowohl Leuchtstoffröhren, als auch Flachbildschirme verarbeiten. Die Geräte werden zerkleinert und anschliessend in fünf verschiedene Korngrößen abgesiebt. Die Eisenmetalle werden über einem Metallabscheider abgeschieden. Die mit Staub und Quecksilber belastete Prozessabluft wird über zwei Zyklon Filter und einen Aktivkohlefilter geführt. Insgesamt entstehen bei diesem Prozess neun Fraktionen (magnetische Metalle, Siebstufen 1-5, Zyklon 1 und 2, Aktivkohlefilter).

Um die Indium Menge abzuschätzen, welche auf die Anlage gelangte, wurden die Gewichte bestimmt und die Bildschirmflächen gemessen (Abbildung 7-3).

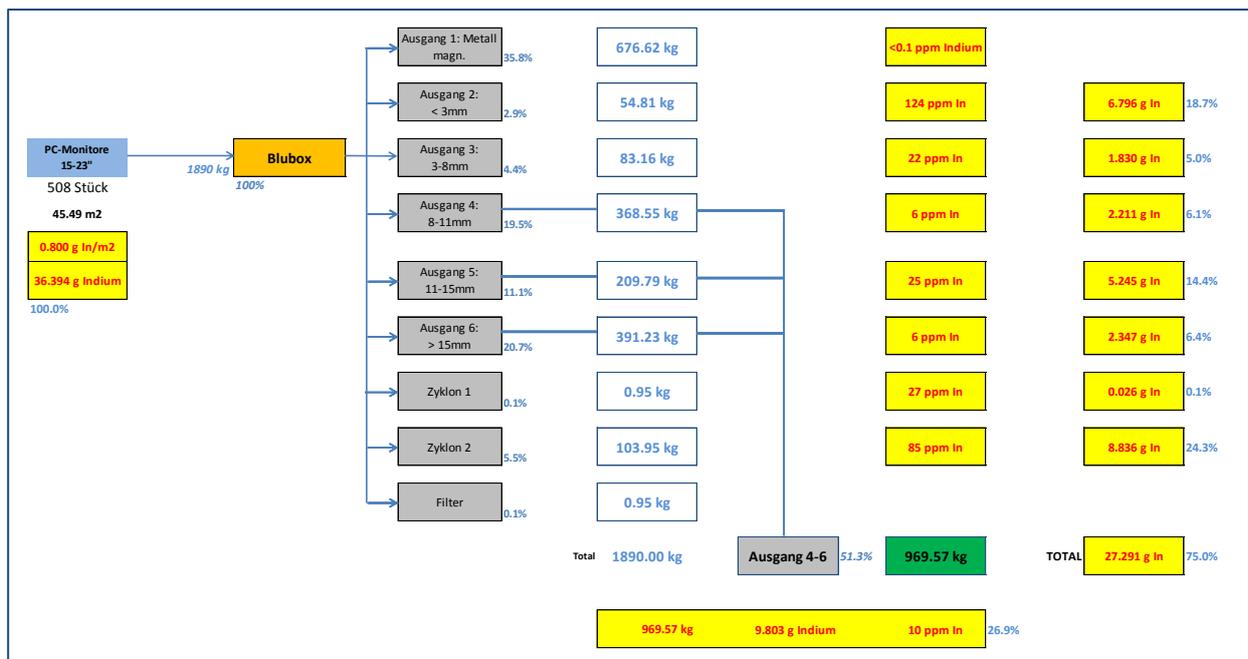


Abbildung 7-4: Fraktionen und Indiumgehalte aus der mechanischen Verarbeitung (Quelle: Blubox Trading AG)



Abbildung 7-5: Mechanische Verarbeitung von Flachbildschirmen (Fotos: Empa)

oben links: PC Monitore für den Versuch; oben rechts: Ausgänge 1-6;
 unten links: Ausgang 2 (< 3mm); unten rechts: Ausgang 5: 11-15 mm

Tabelle 7-3 zeigt die aus der mechanischen Verarbeitung resultierenden Fraktionen. Mit Ausnahme der magnetischen Fraktion wurden bei allen die Indiumgehalte bestimmt.

Tabelle 7-3: Fraktionen aus der mechanischen Verarbeitung von Flachbildschirmen und Indiumgehalte

Ausgang	Fraktion	Gewicht		Indiumgehalt		
		kg	%	mg	ppm	%
Ausgang 1	magn.	676.62	35.8	nb	nb	nb
Ausgang 2	< 3mm	54.81	2.9	6'796	124	17.6
Ausgang 3	3-8 mm	83.16	4.4	1'830	22	4.7
Ausgang 4	8-11mm	368.55	19.5	2'211	6	5.7
Ausgang 5	11-15 mm	207.79	11.1	5'245	25	13.6
Ausgang 6	> 15mm	391.23	20.7	2'347	6	6.1
Zyklon 1		0.95	0.1	26	27	0.1
Zyklon 2		103.95	5.5	8'836	85	22.9
Filter		0.95	0.1	n.b.	n.b.	n.b.

Für eine Indiumrückgewinnung würde gemäss Angaben des Anlagebetreibers das Material aus den Ausgängen 4-6 weiterverarbeitet. Geht man von 45.49 m² Bildschirmfläche mit 800 mg In/m² aus, beträgt die Inputmenge in die mechanische Verarbeitung ca. 36.394 g Indium. Die Indiummenge im Output der Fraktionen 4-6 entspricht 9.80 g und damit rund 27% der Indiumfracht, welche auf die Anlage gelangte. Diese Indiummenge ist in 969 kg Material verteilt, d.h. in 51.3% der Inputmenge an LCD Geräten, was einem Massengehalt von 10 ppm entspricht.

7.1.2.3 Effizienzvergleich manuelle vs. mechanische Vorbehandlung

Um die zwei Versuche zur Vorbehandlung vergleichbar zu machen, wurden die Resultate aus der mechanischen Vorbehandlung auf die Bildschirmfläche der manuellen Vorbehandlung reduziert, wodurch die gleiche Indium-Inputmenge resultierte (auf der Basis von 800 mg In/m², vgl. Tabelle 7-4). Die Daten aus der Vorbehandlung stammen aus den Versuchen im Rahmen des e-Recmet Projektes, während für die Weiterverarbeitung (Zwischen- und Endbehandlung) auf Daten aus dem r³-Projekt InAccess zurückgegriffen wurde (Rasenack 2014; Rasenack and Goldmann 2014).

Tabelle 7-4: Effizienzvergleich der manuellen und der mechanischen Vorbehandlung Indium haltiger Produkte (grobe Abschätzung)

	manuell	mechanisch	Bemerkung
VORBEHANDLUNG			
• Ausgangsmenge	1'013 kg	1'114 kg	
• Indium in Ausgangsmenge	21.45 g	21.45 g	
• Masse Indiumhaltige Fraktion	85 kg (8.39%)	571.5 kg (51.3%)	Gewicht LCD Panels (manuelle Demontage) resp. Mischung Fraktionen 4-6 (mechanische Verarbeitung)
• Indium Menge	21.46 g	5.78 g	Nach der manuellen Demontage, resp. der mechanischen Vorbehandlung
• Indium Massenanteil	252 ppm	10 ppm	
ZWISCHEN- UND ENDBEHANDLUNG¹			
• Angereicherte Fraktion	63.7 kg	261.9 kg	Trenntechnik/Hammermühle/Siebung
• Indium Menge	19.72 g	2.47 g	nach mechanischer Zwischenbehandlung
• Indium Massenanteil	309 ppm	9 ppm	nach mechanischer Zwischenbehandlung
• Bedarf H ₂ SO ₄ in schwefelsaurer Laugung	318.75 l	1'309 l	flüssig / fest = 5 / 1
• Zurückgewonnene Indium Menge	15.97g	2.00 g	
GESAMTEFFIZIENZ	74%	9%	Anteil zurückgewonnenes Indium

¹ Daten abgeschätzt gemäss (Rasenack 2014; Rasenack and Goldmann 2014)

Die Indium Ausbeute ist bei der manuellen Demontage aufgrund dieser groben Abschätzung mit 74% rund 8-mal höher als bei einer mechanischen Vorbehandlung (9%). Einerseits wird mit den Fraktionen 4-6 nicht die gesamte Indium Menge aus allen Fraktionen „mitgenommen“, an-

dererseits geht im mechanischen Prozess ein Teil des Indiums verloren. Der Aufwand für die Rückgewinnung des Indiums wird dadurch deutlich höher, weil u.a. eine grössere Ausgangsmenge an Material (571.5 kg gegenüber 85 kg) auch eine entsprechend höhere Säuremenge erfordert (Fest-Säure-Verhältnis 1:5).

Aus diesen Ergebnissen kann gefolgert werden, dass für eine Indium Rückgewinnung die manuelle Demontage deutliche Vorteile zeigt. Da diese gegenüber der mechanischen Verarbeitung aber deutlich tiefere Verarbeitungsleistungen aufweist, geht die Tendenz Richtung teilmechanische Vorbehandlung.

7.1.3 Kosten

Bei den Zerlegebetrieben handelt es sich meist um soziale Institutionen, welche nach Gewicht der zerlegten Geräte vergütet werden (ca. Fr. 250/t). Geht man von einer durchschnittlichen Zerlegeleistung von 30.5 kg/h aus (Mittelwert aus den Zerlegeversuchen über alle Gerätekategorien), ergeben sich daraus Vergütungskosten von ca. Fr. 7.60/h. Bei einem kommerziellen Recyclingbetrieb muss ein Kostenansatz von Fr. 50/h veranschlagt werden. Nimmt man eine doppelte Zerlegeleistung an, resultieren daraus ca. Fr. 820/t.

Unter Berücksichtigung der zu erwartenden Materialerlöse resultieren im Falle der Zerlegung durch einen Sozialbetrieb rund Fr. 303/t Nettoerlös, während bei einer Zerlegung in einem Recyclingbetrieb Fr. 268/t Nettokosten zu veranschlagen sind (vgl. Tabelle 6-5).

Die Kosten der mechanischen Vorbehandlung wurden im Rahmen dieses Projektes mit Fr. 250/t angenommen. Dieser Betrag berücksichtigt den möglichen Materialerlös aus der Weiterverarbeitung. Er liegt aufgrund der aktuellen Preissituation eher an der unteren Grenze.

Die Kosten der Zwischen- und Endbehandlung sind äusserst schwierig abzuschätzen, da Erfahrungen auf industriellen Massstab noch fehlen. Die angenommenen Kosten sind als konservative Schätzung zu betrachten.

In Tabelle 7-6 sind die Gesamtkosten der Rückgewinnung von Indium dargestellt. Bei der manuellen Demontage wurde von Zerlegekosten bei einem Recyclingbetrieb ausgegangen. Die Gegenüberstellung zeigt, dass die reine Rückgewinnung von Indium (d.h. ohne manuelle Vorzerlegung resp. die maschinelle Vorbehandlung, weil diese nicht primär mit dem Zweck der Indium Rückgewinnung geschieht) bei der manuellen Zerlegung mit ca. Fr. 11/t und bei der mechanischen Verarbeitung mit Fr. 248/t zu Buche schlägt.

Reduziert man die Kosten auf die einzelnen Geräte resultieren bei manueller Demontage (ohne Vorbehandlung) Fr. 0.05-0.23, während bei der mechanischen Verarbeitung diese Kosten (ohne Vorbehandlung) Fr. 9-47 betragen. *Dabei handelt es sich um eine grobe Abschätzung, welche noch mit Unsicherheiten behaftet ist. Eine genauere Analyse der Kostensituation und der Wirtschaftlichkeit ist im Kapitel 8 dargelegt.*

Tabelle 7-5: Kosten der manuellen Vorbehandlung von Flachbildschirmen (Stand April 2014)

	Gewicht [kg]	Ertrag [Fr/kg]	Zerlege- betrieb [Fr/t]	Recycler [Fr/t]	Bemerkungen
Zerlegekosten			250	821	
Materialerlöse (gerundet)			-553	-553	
• Kabel	9.22	-1.30	-12	-12	
• CCFL	9.12	0.20	2	2	Leuchtmittelrecycling
• Schadstoffe	4.05	0.20	1	1	
• Kunststoffe	293.50	-0.13	-37	-37	
• Cr-Ni	2.74	-0.85	-2	-2	
• Alu	106.25	-0.85	-92	-92	
• Leiterplatten	90.16	-3.00	-274	-274	
• PMMA	29.68	-0.69	-21	-21	
• Metalle	356.17	-0.38	-135	-135	
• LCD Panel	85.00	0.20	17	17	Verbrennung KVA
TOTAL (gerundet)			-303	268	

Tabelle 7-6: Gesamtkosten der Rückgewinnung von Indium aus Flachbildschirmen (Stand April 2014)

	Kosten [Fr/t]	Manuelle Demontage [Fr/t]	Mechanische Vor- behandlung [Fr/t]	Annahmen
(1) Vorbehandlung		268	250	
(2) Zwischenbehandlung		2	59	
(3) Endbehandlung		16	190	
(4) Ertrag Indium	Fr. 750/kg	-7	-1	Annahme: 60% des Indiums wird vergütet
Indium Rückgewinnung (2)+(3)+(4)	gerundet	11	248	
TOTAL (1-4) gerundet	pro t Bildschirme	279	498	
	pro t Panel/pro t Fraktion 4-6, exkl. (1)	127	434	8.4% / 58.6% vom Eingangsgewicht
	pro kg Indium, exkl. (1)	684	138'450	15.77 g In / 1.79 g In zurückgewonnen
	pro LCD TV, exkl. (1)	0.23	47	0.40 m ² 0.320 g In
	pro PC Monitor, exkl. (1)	0.08	15	0.13 m ² 0.104 g In
	pro Laptop, exkl. (1)	0.05	9	0.08 m ² 0.064 g In

*Faktor 3 wegen höherem Chemikalienbedarf

7.1.4 *Stand der Technik der Rückgewinnung*

Für die Rückgewinnung von Indium aus LCD Panels stehen Rückgewinnungsverfahren auf der Basis einer Lösungsmittlextraktion im Vordergrund. Die Resultate des laufenden Projektes In-Access (Rasenack 2014) (Rasenack and Goldmann 2014) lassen darauf schliessen, dass es verfahrenstechnisch gelingen sollte, ein Indium Konzentrat herzustellen, welches in bestehende Rückgewinnungsprozesse eingeschleust werden kann.

7.2 Neodym

7.2.1 *Behandlungsschritte*

Die neodymhaltigen Produktgruppen Laufwerke, Kopfhörer und Lautsprecher können analog der indiumhaltigen Komponenten grundsätzlich manuell oder mechanisch vorbehandelt werden.

Bei der *manuellen Vorbehandlung* werden die Geräte schrittweise zerlegt, um die darin enthaltenen Magnete freizulegen.

Bei der *mechanischen Vorbehandlung* ist eine vorherige Entmagnetisierung der Geräte, resp. der Komponenten notwendig. Diese kann durch eine Erhitzung über den Curie-Punkt (300 °C) erfolgen.

Die Zwischenbehandlung richtet sich danach, ob die Magnete wiederverwendet werden oder Neodym und andere in Neodym Magneten vorhandenen Seltenerdelemente wie Dysprosium und Praseodym zurückgewonnen werden. Eine direkte Wiederverwendung von Magneten wäre zwar die ökonomischste Variante, wird aber nur für grosse, leicht zugängliche Magnete (z.B. aus Windkraftanlagen) als sinnvoll erachtet. Die Herstellung neuer Magnete durch Behandlung ausgedienter Magnete mit Wasserstoff (H₂-Dekrepitation) und anschliessendem Sintern wiederum erfordert u.a. homogenes Ausgangsmaterial und kontrollierte Sauerstoffbedingungen. Für die Rückgewinnung von Neodym werden derzeit verschiedene Verfahren erprobt, wobei jedes seine eigenen, spezifischen Vor- und Nachteile hat. Generell werden die Beschichtung der Neodym Magnete mit Nickel und mögliche Verunreinigungen durch eine mechanische Aufbereitung der Ausgangsfraktionen als Hindernis für die Verwertung von Magneten betrachtet (Binnemans et al. 2013).

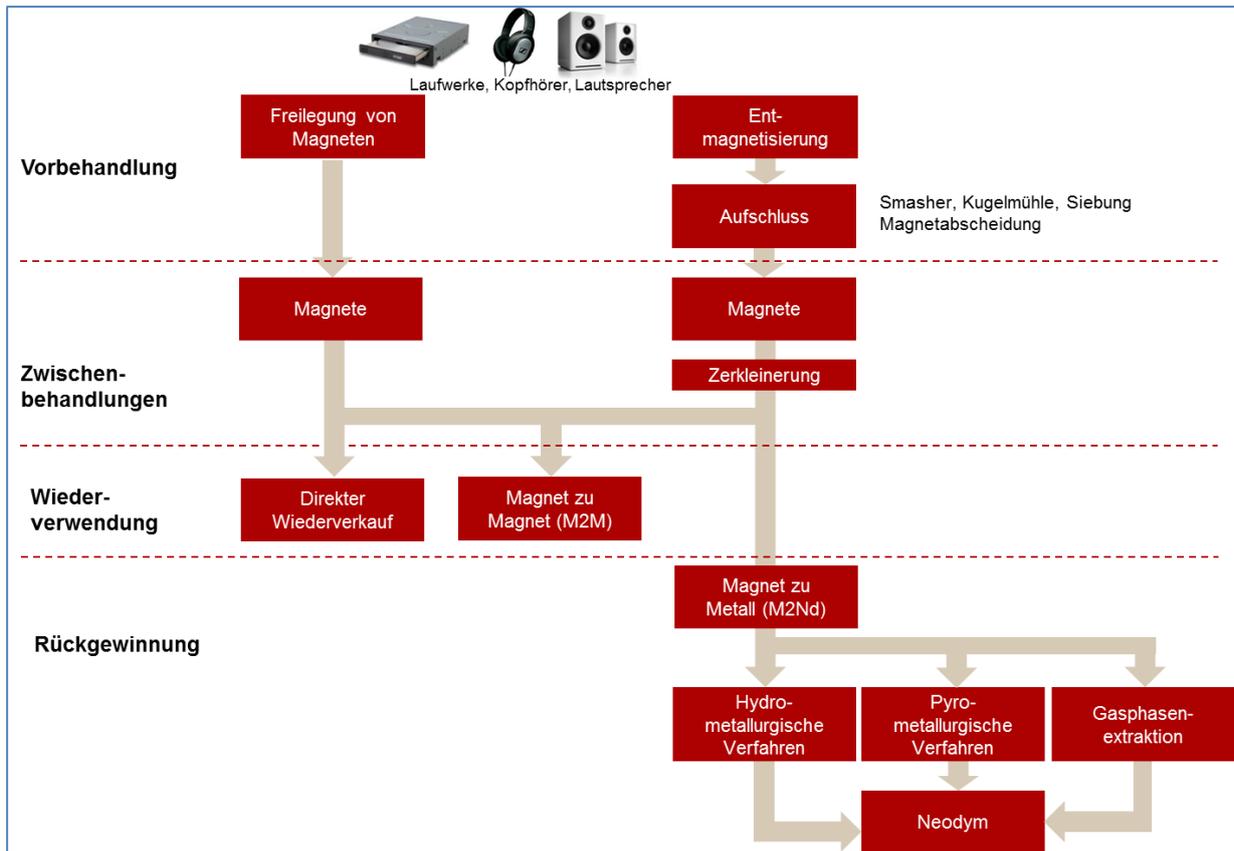


Abbildung 7-6: Behandlungskette neodymhaltiger Produkte

7.2.2 Resultate der Versuche zur Vorbehandlung

7.2.2.1 Manuelle Vorbehandlung

Die Zerlegung der Geräte erfolgte gemäss den Abbildungen 6-7 bis 6-9.

Bei einzelnen Geräten gab es mehrere auszubauende Zielkomponenten. Nicht alle Zerlegeversuche konnten wie vorgesehen durchgeführt werden. Der Ausbau von Festplattenlaufwerken und optischen Laufwerken aus DVD-Playern, Spielkonsolen und Tablets war nicht möglich, weil zu wenige Geräte zur Verfügung standen. Auch wurden die Spindelmotoren und Schwingspulenbetätiger im Zerlegebetrieb nicht separat ausgebaut. Aus den Zielkomponenten wurden für die weitere Aufbereitung jeweils die Magnete freigelegt.

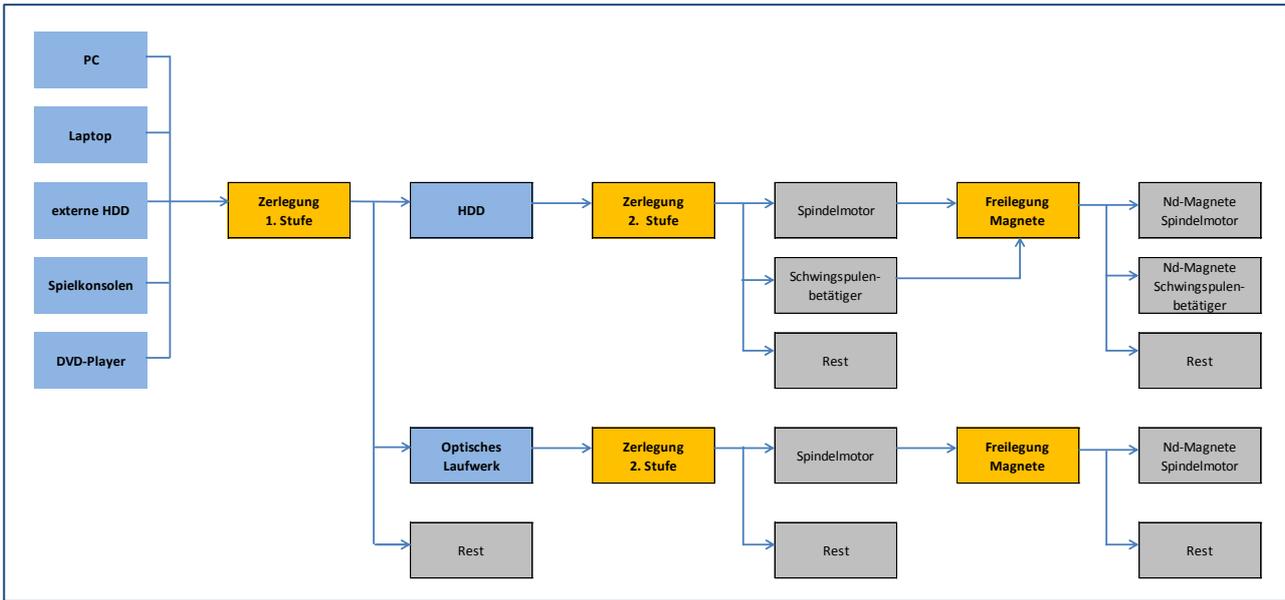


Abbildung 7-7: Zerlegeschritte beim Ausbau von Magneten aus Laufwerken

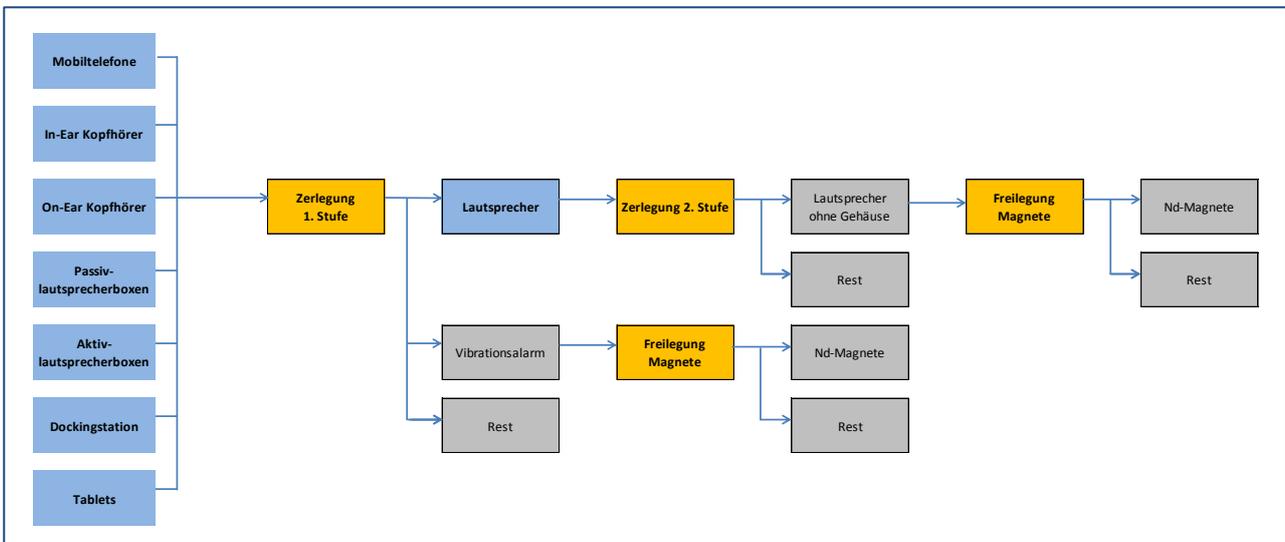


Abbildung 7-8: Zerlegeschritte beim Ausbau von Magneten aus Mobiltelefonen, Kopfhörern, Lautsprecherboxen, Dockingstations und Tablets



Abbildung 7-9: Ausgangsmaterial für die Zerlegeversuche von Mobiltelefonen, Kopfhörern, Lautsprecherboxen, Dockingstations und Tablets (Fotos: Empa)

oben links: Laptops; oben rechts: Desktop-PC; mitte links: Lautsprecherboxen; mitte rechts: Mobiltelefone; unten links: Spielkonsolen; unten rechts: Kopfhörer

Tabelle 7-7 zeigt die Anzahl der Zielkomponenten (Lautsprecher, Schwingspulenbetätiger, Spindelmotor, Vibrationsalarm) sowie den Zeitaufwand für die Freilegung der Magnete.

Schlussbericht

Tabelle 7-7: Anzahl und Massen der Zielkomponenten, Massen der ausgebauten Magnete sowie durchschnittlicher, maximaler und minimaler Zeitaufwand für die Freilegung der Magnete

Bauteil	Anzahl	Zielkomponenten	Gewicht Ziel- komponente [g]	Gewicht Magnet [g]	t_{ϕ} [s]	t_{max} [s]	t_{min} [s]
Festplatten- laufwerk Desktop-PC	7	2 Spindelmotoren, 7 Schwingspulenbetätiger	321.4	72	117	252	35
Festplatten- laufwerk Laptop	4	5 Spindelmotoren, 4 Schwingspulenbetätiger	94	19.9	99	324	20
optisches Lauf- werk Desktop-PC	10	Spindelmotoren	223.6	46	139	295	45
optisches Lauf- werk Laptop	9	Spindelmotoren	189.5	13.8	169	351	67
Passivlaut- sprecher ¹⁾	20	freigelegte Magnete	3330	951.2	576	1620	120
Aktivlaut- sprecher ¹⁾	29	freigelegte Magnete	4800	1194.5	762	2700	120
In-Ear Kopfhörer	53	Lautsprecher	79.6	16.7	103	308	20
On-Ear Kopfhö- rer	54	Lautsprecher	392.3	156.4	69	224	21
Laptop	15	Lautsprecher	76.9	29.9	68	173	30
Handy	48	Lautsprecher	71.4	20.5	90	383	41
Smartphone	13	Lautsprecher	13.6	4.84	94	195	40

¹⁾ Zeitaufwand wurde in Minuten gemessen

In Abbildung 6-10 ist der Zeitaufwand für die Freilegung der Magneten pro g freigelegten Magneten dargestellt. Der Zeitaufwand für den Ausbau der Zielkomponenten Festplattenlaufwerk, optische Laufwerke und Lautsprecher wurde wie daraus hervorgeht, ist der gesamte Zeitaufwand für die Freilegung eines Gramms Magnet bei weitem am höchsten für Vibrationsalarne in Smartphones, gefolgt von Vibrationsalarmen in Handys, Lautsprechern in Smartphones und Lautsprechern in Handys.

Der Massenanteil von Neodym beträgt zwischen 2.8 und 25.3% (Tabelle 7-8). Die Neodym-Massenanteile in den Magneten aus den Lautsprechern der Aktiv- und Passivlautsprecherboxen lagen unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0.05 % für die orientierende chemische Analyse. Bei diesen Proben wurden deshalb keine quantitativen Bestimmungen durchgeführt.

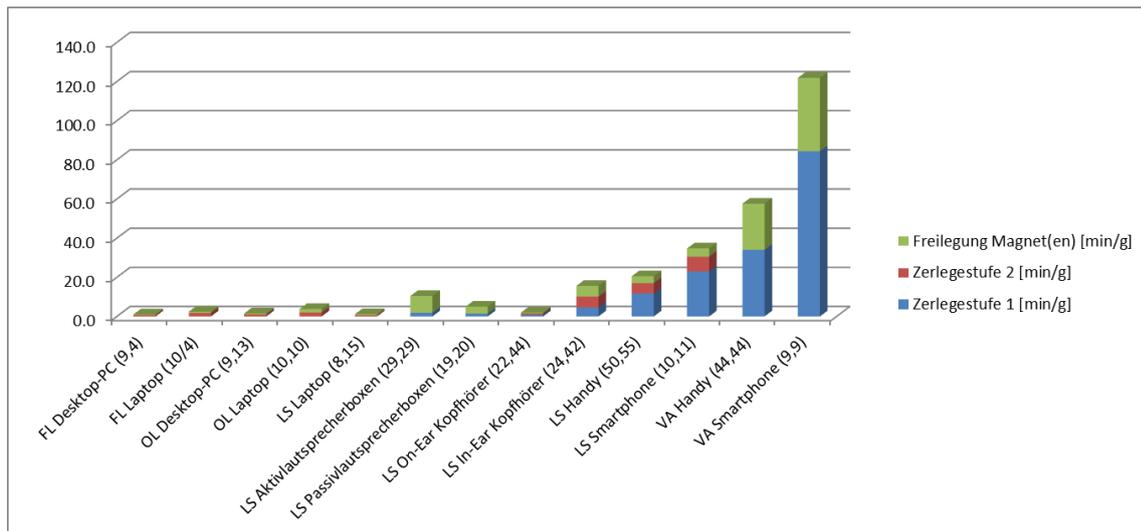


Abbildung 7-10: Zeitaufwand für die Freilegung der Magnete pro g freigelegte Magnete.

In Klammern: Anzahl zerlegte Geräte, Anzahl Zielkomponenten 1. Abkürzungen: FL = Festplattenlaufwerk, OL = Optisches Laufwerk; LS = Lautsprecher; VA = Vibrationsalarm.

Tabelle 7-8: Ergebnisse der orientierenden sowie der quantitativen chemischen Analysen von Neodym

Bauteil	Magnetttyp	Orientierende chemische Analyse		Quantitative chemische Analyse	
		grosse Anteile	geringe Anteile	Massenanteil Neodym g/100g (%)	
Festplattenlaufwerk	Desktop-PC	Nd ₂ Fe ₁₄ B	Fe, Nd , Pr, Ni	21.1 ± 1.1	
	Laptop	Nd ₂ Fe ₁₄ B	Fe, Nd , Pr, Ni	22.0 ± 2.2	
optisches Laufwerk	Desktop-PC	Nd ₂ Fe ₁₄ B	Fe, Sr	Ba, Nd	8.2 ± 0.4
	Laptop	Nd ₂ Fe ₁₄ B	Fe, Nd , Pr	Ni	20.2 ± 1.0
Lautsprecher	Passivlautsprecher-boxen	SrFe ₁₂ O ₁₉ bzw. (Sr+Ba)Fe ₁₂ O ₁₉	Fe, Sr, Ba		n.b.
	Aktivlautsprecher-boxen	SrFe ₁₂ O ₁₉ bzw. (Sr+Ba)Fe ₁₂ O ₁₉	Fe, Sr, Ba		n.b.
	In-Ear Kopfhörer	SrFe ₁₂ O ₁₉ bzw. (Sr+Ba)Fe ₁₂ O ₁₉	Fe, Sr, Zn, Nd	Ba	17.7 ± 0.4
	On-Ear Kopfhörer	SrFe ₁₂ O ₁₉ bzw. (Sr+Ba)Fe ₁₂ O ₁₉	Fe, Sr, Ba	Zn, Nd	2.8 ± 0.1
	Laptop	Nd ₂ Fe ₁₄ B	Fe, Nd , Pr	Zn, Ni, Nb	25.3 ± 0.4
	Handy	Nd ₂ Fe ₁₄ B	Fe, Nd , Pr, Zn, Cu, Ni	Nb	18.9 ± 1.6
	Smartphone	Nd ₂ Fe ₁₄ B	Fe, Nd , Pr, Zn	Cu, Ni, Nb	17.4 ± 0.8
Vibrationsalarm	Handy	Nd ₂ Fe ₁₄ B	Fe, Nd , Pr, Cu, Ni	Zn, Nb, Zr	14.6 ± 0.4
	Smartphone	Nd ₂ Fe ₁₄ B	Fe, Nd , Pr, Cu, Ni	Zn	17.4 ± 0.7

7.2.2.2 Mechanische Vorbehandlung

Für die mechanische Vorbehandlung von elektronischen Komponenten, welche Magnete enthalten, wurde ein separates Projekt gestartet (NeoRec). Da dieses Projekt erst Ende 2014 begonnen hat, konnten die Resultate im Projekt e-Recmet nicht mehr berücksichtigt werden.

7.2.3 Kosten

Tabelle 7-9 zeigt die geschätzten Kosten für die manuelle Freilegung von Neodym-Magneten. Die Zerlegekosten beruhen auf einem Stundensatz von Fr. 50/h. Der Preis für Nd Magneten aus EoL basiert auf (Sprecher et al. 2014) und wurde mit Fr. 15.00/kg angenommen.

Tabelle 7-9: Kosten für die Freilegung von Magneten (Stand April 2014)

	Zeitaufwand Freilegung¹	Zerlege- kosten	M₀ Magneten pro Gerät	Erlös pro Magnet	Verhältnis Erlös/ Zerlegekosten
	[min]	[Fr.]	[g]	[Fr.]	
Festplattenlaufwerk Desktop-PC	10.9	9.9	12.0	0.18	1:59
Festplattenlaufwerk Laptop	12.3	6.9	5.0	0.07	1:137
optisches Laufwerk Desk- top-PC	10.3	11.1	6.6	0.10	1:87
optisches Laufwerk Laptop	5.8	7.3	1.5	0.02	1:211
Passivlautsprecherboxen	13.6	12.9	2.7	0.02	1:278
Aktivlautsprecherboxen	15.5	11.3	1.5	0.04	1:578
On-Ear Kopfhörer	11.4	9.5	5.8	0.09	1:109
In-Ear Kopfhörer	8.6	7.2	0.6	0.01	1:867
Lautsprecher Laptop	4.4	3.6	3.7	0.06	1:65
Lautsprecher Handy	9.7	8.0	0.5	0.01	1:1141
Lautsprecher Smartphone	16.1	13.4	0.4	0.01	1:2187
Vibrationsalarm Handy	8.8	7.3	0.2	0.00	1:3200
Vibrationsalarm Smartpho- ne	14.0	11.7	0.1	0.00	1:6771

¹ Zeit für den Ausbau von Festplattenlaufwerken und optischen Laufwerken nicht mitgerechnet

7.2.4 Stand der Technik der Rückgewinnung

Eine Bedingung für die mechanische Aufbereitung von Hard-Disks ist die Entmagnetisierung der Neodym Magnete, das diese ansonsten an den eisenhaltigen Teilen der mechanischen Behand-

lung anhaften. Die meisten der heute angedachten Verfahren beinhalten eine Erhitzung und eine anschließende Zerkleinerung der Hard-Disk. Die Herausforderung wird deshalb sein, das Optimum zu finden zwischen einer rein manuellen Zerlegung der Hard-Disks und einer mechanischen Aufarbeitung, welche gewährleistet, dass eine Fraktion mit Magneten als möglichst als ganze Stücke erzeugt werden kann. Eine Zerkleinerung mittels Smasher befindet sich gegenwärtig in Rahmen des Projektes Neorec (durch Umtec) in Prüfung.

Bereits heute besteht die Möglichkeit, die gewonnene, neodymreiche Fraktion mittels einem hydrometallurgisch/nasschemischen Prozess zu hochreinen Seltenerdoxid-Rezyklaten weiterzuverarbeiten.

Wie bereits erwähnt, sind die Anforderungen der Industrie an die Recyclingfraktionen hoch. So müssen beispielsweise die Hard-Disk Schredderfraktionen einen Nd Gehalt von mindestens 25% aufweisen. Einige Schmelzen wie z.B. die MS Schramberg Sinter GmbH & Co. KG verkauft heute ihre Produktionsabfälle nach Vietnam, wo sie wieder zu Legierungen eingeschmolzen werden. Fallweise lohnt sich bei den gegenwärtig eher tiefen Rohstoffpreisen selbst das Recycling von Produktionsabfällen in der EU nicht.

8 Ökologischer Nutzen

8.1 Fragestellung

Der ökologische Nutzen des Recyclings ergibt sich aus dem Vergleich der Umweltbelastungen der Rückgewinnung der Metalle aus ausgewählten e-Waste Fraktionen mit der Primärproduktion der beiden Metalle. Dieser Vergleich wird mit der Methodik der Ökobilanz gemacht.

Dabei wurden für Indium und Neodym **drei Produktions- resp. Gewinnungswege** unterschieden und miteinander verglichen:

- die **Primärproduktion**, bzw. die Neugewinnung aus Erzen
- eine **Sekundärproduktion** über manuelle Sortierprozesse und
- eine **Sekundärproduktion**, bei welcher die Ausgangsmaterialien mit Hilfe eines Schredders zerkleinert und fraktioniert werden.

Bei der Sekundärproduktion werden die zerlegten, resp. geschredderten Fraktionen über eine nasschemische Aufbereitung und anschließende Veredelungsschritte aufbereitet, um Indium bzw. Neodym zurückzugewinnen.

8.2 Methodisches Vorgehen

8.2.1 Untersuchungsrahmen

Ein zentraler erster Schritt einer Ökobilanz ist die saubere Definition des zu Grunde liegenden Untersuchungsrahmens. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurden zwei Vorbehandlungsverfahren von indium- und neodymhaltigen Komponenten aus ausgewählten Elektronik-Abfällen modelliert und einem ökologischen Vergleich mit der bestehenden Primärproduktion der beiden Metalle unterzogen.

Indium und Neodym werden heute noch nicht im industriellen Massstab aus Elektronikabfällen zurückgewonnen. Die Grundlagen der Sachbilanz wurden daher basierend auf Pilotprojekten und wissenschaftlichen Studien modelliert, unter anderem aus den Resultaten des e-Recmet Projektes. Für die Primärproduktion wurde auf Daten aus ecoinvent v2.2 zurückgegriffen.

In Tabelle 7-1 sind die wichtigsten Eckdaten zum Untersuchungsrahmen zusammengefasst.

Tabelle 8-1: Untersuchungsrahmen der vergleichenden Ökobilanz

Was	Indium	Neodym
Funktionelle Einheit	Produktion von 1kg reinem Indium.	Produktion von 1 kg Neodymoxid. Neodymoxid bildet die Vorstufe von reinem Neodym. Die Prozesse zur Neodymoxid-Aufbereitung unterscheiden sich nicht zwischen der Sekundär- und Primärproduktion und werden daher in der Sachbilanz nicht berücksichtigt.
Untersuchungsgegenstand	Indium aus Flachbildschirmen in TVs, PCs und Laptops	Magnete aus Hard Disc Drives (HDD) (integriert in PCs oder Laptops oder externen HDD) ⁸ .
Produktsystem	Für beide Metalle werden zwei Varianten zur Vorbehandlung (manuell, mechanisch) mit der Primärproduktion verglichen. Bei Indium sind für alle drei Produktionswege je zwei Varianten der Aufbereitung (Ionentauscher, Lösungsmittelextraktion) definiert. Im Falle von Neodym wurden „magnet-to-magnet“-Varianten, die ohne nass- oder thermochemische Extraktion der einzelnen Metalle auskommen nicht betrachtet. Diese sind nur für grosse Magnete mit sehr homogener Zusammensetzung geeignet, was beides nicht zutrifft, vgl. Binnemans et al. 2013.	
Geographischer Bezug	<i>Sekundärproduktion:</i> Europa <i>Primärproduktion:</i> global	<i>Sekundärproduktion:</i> Europa <i>Primärproduktion:</i> China
Zeitlicher Bezug	<i>Sekundärproduktion:</i> Hypothetischer Prozess basierend auf heute verfügbaren Labordaten. <i>Primärproduktion:</i> 2005/2006 gemäss ecoinvent v2.2 (Annahme, dass keine Änderungen in den Produktionsprozesse in den letzten Jahren erfolgt ist.)	
Allokation	<i>Sekundärproduktion:</i> Massenallokation <i>Primärproduktion:</i> Umsatzbasierte ökonomische Allokation (Indium als Nebenprodukt der Zinkproduktion)	<i>Sekundärproduktion:</i> Massenallokation <i>Primärproduktion:</i> Umsatzbasierte ökonomische Allokation (Neodym als Koppelprodukt von weiteren Seltenen Erden)
Wirkungsabschätzung	Methode der ökologischen Knappheit 2013. Zur Überprüfung der Ergebnisse wurden die Methoden ReCiPe 2008, der Kumulierte Energieaufwand (KEA) und das Treibhausgaspotenzial (GWP100a) angewandt	

⁸ Neodym ist in diversen weiteren Magneten (z.B. von Spielkonsolen, DVD-Playern, Handys, On-Ear-Kopfhörern, Passivlautsprechern, Aktivlautsprechern, Dockingstations, oder Flachbildschirmen) enthalten. Die Massenanteile von Neodym in Magneten aus HDD sind jedoch höher und das Neodym homogener verteilt, weshalb sich diese besser für die Rückgewinnung eignen (Sprecher et al. 2014; Binnemans et al. 2013; Hatayama et al. 2013).

8.2.2 Sachbilanz

Die Sachbilanz (engl. Life Cycle Inventory, LCI) ist eine Bestandsaufnahme der Material- und Energieflüsse eines Produktsystems. Diese umfassen die Inputs (Wasser, Energie und Rohstoffe) sowie die Emissionen in Luft, Boden und Wasser. Als Grundlage wird ein Stoffflussmodell erstellt, welches die In- und Outputs aller Prozesse innerhalb der Systemgrenze, einschließlich der vor- und nachgelagerten Phasen im Lebenszyklus umfasst. Die Daten beziehen sich jeweils auf die zuvor definierte funktionelle Einheit. Das Ergebnis der Sachbilanz ist eine Aufstellung aller In- und Outputs der verschiedenen Verfahrensstufen.

8.2.2.1 Indium

Für *Indium* wurde die Sachbilanz der manuellen und mechanischen Sekundärproduktion auf der Grundlage eines Rückgewinnungsverfahrens von Indium aus LCD-Glas der TU Clausthal in Deutschland (Rasenack 2014; Rasenack and Goldmann 2014) entwickelt und modelliert. Diese Laborprozesse wurden auf industrielle Produktionsmassstäbe aufskaliert, um die Sekundärproduktion mit der Primärproduktion vergleichbar zu machen. Die Skaleneffekte wurden beim Energieverbrauch, den Wärmeverlusten, dem Transportaufwand und den Inputs wie Lösungsmitteln, Katalysatoren oder Säuren angewandt. Die Veredelung (Zementierung und Gussanode, elektrolytischen Raffination und Vakuum Destillation), wie auch die Lösungsmittlextraktion wurden aus der Datenbank ecoinvent v2.2 übernommen. Da diese Prozesse bereits industriellen Produktionsmassstäben entsprechen, wurden hier keine Skaleneffekte berücksichtigt.

Indium wird heute klassischerweise als Nebenprodukt der Zinkproduktion aus Rückständen und Stäuben gewonnen und elektrolytisch aufbereitet. Dieses Verfahren von der Erzgewinnung bis zur Aufbereitung und Veredelung ist in ecoinvent v2.2 inventarisiert (Classen et al. 2007). In ecoinvent v2.2 wird für Indium eine umsatzbasierte ökonomische Allokation vorgenommen.

8.2.2.2 Neodym

Die Sachbilanz für die Sekundärproduktion von *Neodym* wurde aus der Studie von (Sprecher et al. 2014) abgeleitet. Dabei wurden die Umweltauswirkungen der Herstellung von neuen HDD-Magneten aus alten (Recyclingmaterial) untersucht und mit den Umweltauswirkungen der Herstellung von Magneten mit Neuware (primär gewonnenes Neodym aus Erzen in China) verglichen. Der Prozess der Rückgewinnung von Neodym aus Magneten in HDD, das Vorgehen zur Datensammlung (Laborexperimente, Literaturrecherche und Experteninterviews) sowie die Vergleichbarkeit der Daten mit der Primärproduktion sind in der Studie ausführlich dokumentiert. Im Unterschied zur Studie von Sprecher et al. 2014 wurde hier im Rahmen des e-Recmet Projekts die Produktion von Neodymoxid modelliert, eine Vorstufe der Magnetproduktion. Es wurde daher nur die Prozesse der Behandlung der Magnete bis zur Neodymoxid-Produktion von

Sprecher et al. 2014 in die Sachbilanz übernommen. Die vorangehenden Prozesse zur Sammlung und Vorbehandlung wurden mit Hilfe von Schweizer Grundlagendaten modelliert.

Die Primärproduktion von Neodymoxid erfolgt heute als Koppelprodukt der Produktion von seltenen Erden (RE). Für die Sachbilanz wurden die ecoinvent Daten v2.2 verwendet (basierend auf (Classen et al. 2007)). Dieser Prozess beschreibt die Gewinnung des RE-reichen Erzes in China mit konventionellen Bergbautechnologien und Aufbereitung zu RE-Konzentrat sowie die anschliessende nasschemische Aufbereitung des Neodymoxids. Es wurde dabei eine kleine Korrektur der ecoinvent v2.2 Daten vorgenommen⁹. In ecoinvent v2.2 wird eine umsatzbasierte ökonomische Allokation vorgenommen, da Neodym als Koppelprodukt weiterer RE gewonnen, wie zum Beispiel Cerium, Praseodym oder Lanthan.

8.2.3 Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung besteht in der Bewertung der Umweltauswirkungen, die aus den Stoff- und Energieströmen der entwickelten Sachbilanz resultiert.

Um eine möglichst umfassende und breit abgestützte Übersicht über die Umweltauswirkungen zu gewinnen, wurde die Ökobilanz mit vier verschiedenen Methoden zur Wirkungsabschätzung durchgeführt. Für eine erste Gesamtbetrachtung wurde die Methode der ökologischen Knappheit 2013 (Frischknecht and Büsser Knöpfel 2013) angewandt, da es sich um eine Betrachtung im schweizerischen Kontext handelt. Um den Vergleich mit einer europaweit akzeptierten Methode zu bewerkstelligen, wurde zusätzlich die Methode ReCiPe 2008 angewandt. Diese Bewertungsmethoden ermöglichen sowohl eine Bewertung in einzelnen Wirkungskategorien (Midpoint) als auch eine Vollaggregation (Endpoint). Um wichtige Teilaspekte isoliert zu betrachten und die oben genannten klassischen und vollaggregierten Methoden zur Ökobilanzierung zu ergänzen, wurden zusätzlich zwei Methoden auf Midpoint-Ebene angewandt, zum einen der Kumulierte Energieaufwand (KEA), der die energetische Ressourceneffizienz eines Produktes widerspiegelt, und zum anderen den IPCC GWP 100a, um Aussagen zur Klimawirkung zu machen.

Bei den Resultaten und der Diskussion wurde ein Schwerpunkt auf den Ergebnissen der Methode der ökologischen Knappheit gelegt. Die weiteren drei Bewertungsmethoden wurden jedoch ergänzend zugezogen, um die Ergebnissen mit der Methode der ökologischen Knappheit zu untermauern oder zu relativieren.

Um den Einfluss relevanter und mit Unsicherheiten behafteter LCI-Parameter auf die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung zu beurteilen, wurden im Rahmen der vorliegenden Studie ausgewählte Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Diese sind jedoch als nicht abschliessend zu betrachten.

⁹ Betrifft den Energiebedarf der RE-Veredelung, der gemäss ecoinvent v2.2 0.016 kWh/kg RE-Konzentrat beträgt. Dieser wurde mit dem Faktor 19.4 korrigiert, da 1kg RE-Konzentrat aus 19.4 kg RE-haltigen Erz gewonnen wird.

8.3 Indium

8.3.1 Gesamtbild

Abbildung 8-1 stellt einen Vergleich der zuvor illustrierten Ergebnisse (Methode der Ökologischen Knappheit 2013) mit drei weiteren gängigen Methoden zur Wirkungsabschätzung (ReCiPe; Kumulierter Energieaufwand, KEA; Global Warming Potential 100a, GWP 100a) dar.

Die vier Bewertungsmethoden ergeben ein vergleichbares Gesamtbild. Der bedeutendste Unterschied liegt darin, dass die auf manueller Demontage und Lösungsmittelextraktion beruhende Sekundärproduktion (MAN SX) im Vergleich zur Primärproduktion bei den anderen drei Bewertungsmethoden nicht mehr bzw. höchstens geringfügig besser abschneidet als die Primärproduktion. Weiter zeigt sich, dass die Bewertungsprofile von ReCiPe, KEA und GWP 100a – zwar mit unterschiedlichen Beiträgen der einzelnen Prozessschritte – weitgehend übereinstimmen und sich von der Methode der Ökologischen Knappheit unterscheiden.

Dieser Sachverhalt ist darauf zurückzuführen, dass Letztere in der Wirkungsabschätzung als einzige Methode einen auf die Schweizer Gesetzgebung bezogenen „distance-to-target“-Ansatz verwendet (was dazu führt, dass gewisse Wirkungen vergleichsweise stark und andere gar nicht berücksichtigt werden) und die Ablagerung der radioaktiven Abfälle aus der Nuklearenergie Eingang in die Bewertung finden.

Die Ergebnisse für Indium werden mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen auf ihre Robustheit getestet. Dazu wurden im Rahmen von zwei Sensitivitätsanalysen zwei Parameter variiert, welche die Ergebnisse der Primärproduktion sowie der Sekundärproduktion stark beeinflussten.

8.3.2 Sensitivitätsanalyse

Sensitivitätsanalyse 1 „Indium als Hauptprodukt beim Abbau von Zinkerz“: Die Primärproduktion von Indium erfolgt unter der heutigen Marktsituation als Nebenprodukt von Zink, wobei ein grosser Teil der Umweltbelastung dem Zink angerechnet wird. Um den Einfluss der ökonomischen Allokation auf die Umweltbilanz der Primärproduktion von Indium abzuschätzen, wurde ein „fiktives“ Szenario „Indium als Hauptprodukt beim Abbau von Zinkerz“ gerechnet (d.h. die Umweltbelastung aus dem Abbau und ersten Veredelungsschritten wurde zu 100% auf Indium alloziert).

Sensitivitätsanalyse 2 „Wiederverwendbarkeit des Kunstharzes“: Die grossen Unterschiede zwischen den beiden alternativen Verfahren Lösungsmittelextraktion und Ionenaustauschverfahren wurden mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse geprüft, da die Annahme zum Einsatz des Kunstharzes mit Unsicherheiten behaftet ist. Während bei den Null-Varianten mit Ionenaustauschverfahren angenommen wurde, dass 100 kg Kunstharz pro Tonne LCD Glas eingesetzt wird, geht Sensitivitätsanalyse 2 davon aus, dass die Recyclingrate von 80% beträgt, d.h. pro Tonne LCD Glas müssen lediglich 20 kg Kunstharz eingesetzt werden.

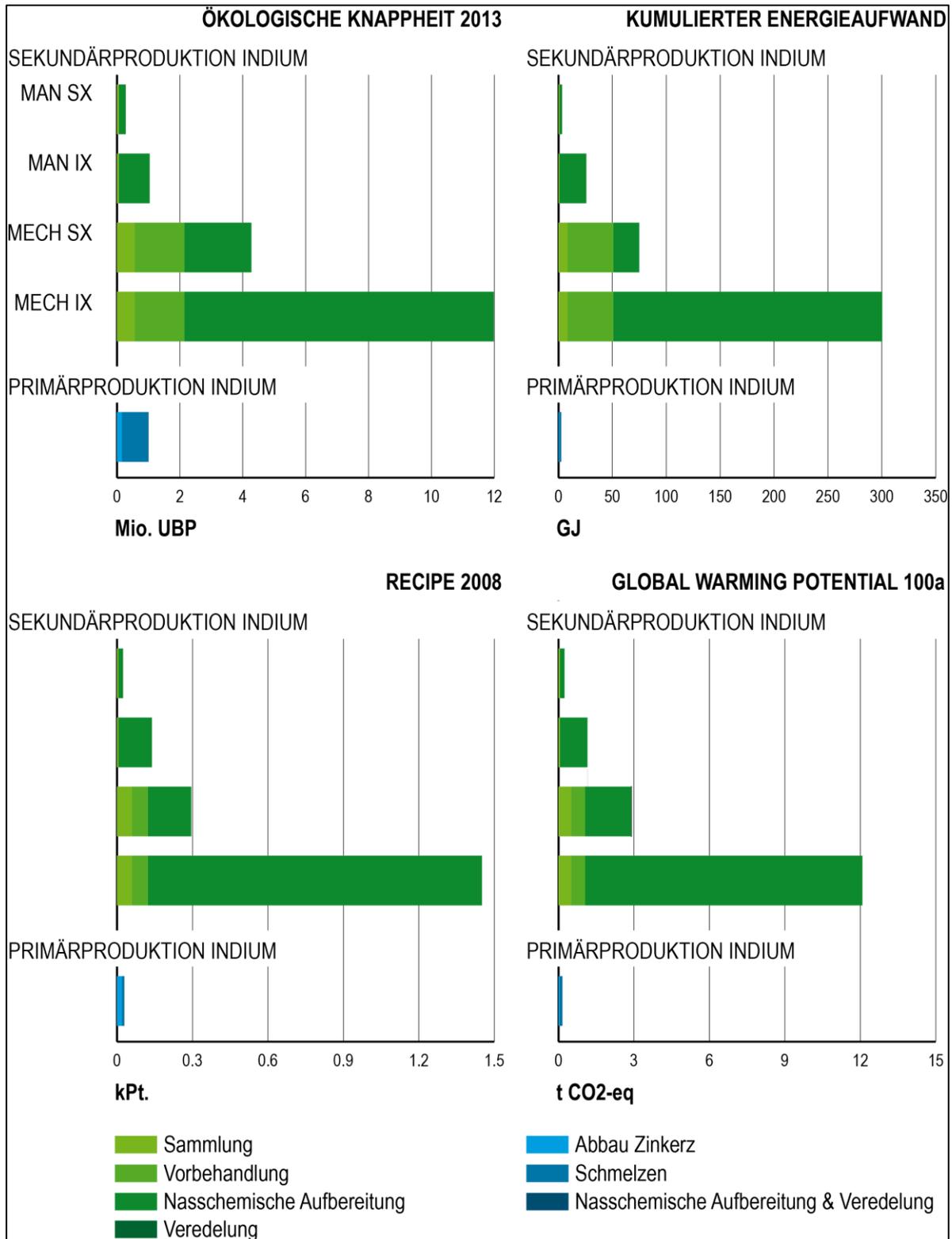


Abbildung 8-1: Umweltbelastung der Prozesse für die vier untersuchten Varianten der Sekundärproduktion und der Primärproduktion von Indium für alle vier Bewertungsmethoden

Die entsprechenden Resultate sind in Tabelle 8-2 dargestellt ("-" bedeutet keine Änderung gegenüber der Null-Variante).

Tabelle 8-2: Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen für Indium

Variante		Sekundärproduktion				Primärproduktion	
		MAN IX	MAN SX	MECH IX	MECH SX	Neben- produkt	Haupt- produkt
Null-Variante	Mio UBP	1.0	0.3	12.0	4.3	1.0	-
Sensitivitätsanalyse 1	Mio UBP	-	-	-	-	-	154.7
Sensitivitätsanalyse 2	Mio UBP	0.4	-	5.9	-	-	-

Sensitivitätsanalyse 1 zeigt, dass die Umweltbelastung der Primärproduktion um Faktor 150 ansteigt, wenn Indium als Hauptprodukt gewonnen wird. Unter solchen „fiktiven“ Marktbedingungen wären aus Umweltsicht alle Varianten der Sekundärproduktion in höchstem Masse zu favorisieren.

Sensitivitätsanalyse 2 bestätigt, dass die Recyclingrate des Kunstharzes einen höchst sensitiven Parameter darstellt. Die Umweltbelastungspunkte sinken auf weniger als die Hälfte. Der Unterschied zu den Varianten mit Lösungsmittelextraktion nimmt damit markant ab und die beiden Verfahrens-Varianten werden nahezu vergleichbar.

8.3.3 Fazit

Die Sekundärproduktion von Indium geht einzig bei der Kombination von manueller Demontage und Lösungsmittelextraktion mit weniger oder ähnlich grossen Umweltbelastungen einher wie die Primärproduktion.

Die vergleichsweise gute Umweltbilanz der Primärproduktion von Indium liegt in der Tatsache begründet, dass Indium als Nebenprodukt der Zinkgewinnung anfällt.

Die Art der Vorbehandlung – manuelle Demontage oder mechanisches Schreddern – und der nasschemischen Aufbereitung – Lösungsmittelextraktion oder Extraktion über Ionenaustauscher – hat einen entscheidenden Einfluss auf die Umweltbilanz der Sekundärproduktion.

- Die manuelle Demontage des Indium-enthaltenden LCD-Glas ist einem mechanischen Schredder-Prozess klar vorzuziehen.
- Die Extraktion von Indium mit Lösungsmitteln ist gegenüber der Extraktion über Ionenaustauscher eindeutig zu favorisieren, falls das Kunstharz nicht wiederverwendet werden kann. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass eine 80% Wiederverwendung des Kunstharzes den markanten Unterschied zwischen den beiden Verfahrensvarianten deutlich vermindert und diese nahezu vergleichbar macht.

Die Luftemissionen tragen bei allen untersuchten Produktionswegen von Indium eindeutig den grössten Anteil zu den Gesamtumweltbelastungen bei.

Im Falle der Indium-Extraktion über Ionenaustauscher ist vor allem die Herstellung des Kunstharzes massgebend, während es bei der Variante mit Lösungsmittelextraktion primär der Stromverbrauch und damit verbundene Emissionen sowie die Emissionen aus der Sonderabfallverbrennung der Säuren sind.

Der Verbrauch von Energieressourcen und deponierte Abfälle sind bei den auf mechanischer Vorbehandlung beruhenden Rückgewinnungs-Varianten nicht vernachlässigbar und sind zu einem überwiegenden Anteil auf den Stromverbrauch des Schredder-Prozesses und die mit der Stromproduktion verbundene Ablagerung radioaktiver Abfälle zurückzuführen.

Die Ergebnisse und entsprechenden Aussagen werden durch die drei weiteren Bewertungsmethoden weitgehend bestätigt.

Der Hauptunterschied zwischen den vier Bewertungsmethoden liegt darin, dass ReCiPe 2008, KEA und GWP 100a die Umweltauswirkungen der Primärproduktion weniger hoch bewerten, was zur Folge hat, dass die ökologisch bestbewertete Variante der Sekundärproduktion (MAN SX) nicht mehr besser abschneidet.

8.4 Neodym

8.4.1 Gesamtbild

Abbildung 8-2 stellt einen Vergleich der zuvor illustrierten Ergebnisse (Methode der Ökologischen Knappheit 2013) mit drei weiteren gängigen Methoden zur Wirkungsabschätzung (ReCiPe; Kumulierter Energieaufwand, KEA; Global Warming Potential 100a, GWP 100a) dar.

Grundlegend betrachtet zeigen die vier Bewertungsmethoden ein vergleichbares Gesamtbild. Alle resultieren in derselben Rangfolge der analysierten Produktionswege. Die Bewertungsprofile inkl. Beiträgen der Prozessschritte sind bei KEA und GWP 100a nahezu übereinstimmend. Die beiden anderen Methoden führen einerseits zu deutlicheren Unterschieden zwischen der manuellen und mechanischen Sekundärproduktion (33% bzw. 44% bei ReCiPe bzw. Methode der ökologischen Knappheit 2013; rund 20% bei KEA und GWP 100a). Andererseits variiert der Beitrag der mechanischen Vorbehandlung zwischen 25% (ReCiPe) und 30% (ökologische Knappheit 2013).

Schlussbericht



Abbildung 8-2: Umweltbelastung der Hauptprozesse für die verschiedenen Produktionswege von Neodymoxid (für alle vier Bewertungsmethoden)

8.4.2 *Fazit*

Die Sekundärproduktion von Neodymoxid aus HDD ist der Primärproduktion aus ökologischer Sicht eindeutig vorzuziehen.

Die auf manueller Isolierung der Magnete beruhende Sekundärproduktion ist mit 30% weniger Umweltbelastungen verbunden als die mechanische Sekundärproduktion, in welcher die Vorbehandlung nach der Entmagnetisierung über einen Schredder-Prozess und anschließende Fraktionierung erfolgt.

Die nasschemische Aufbereitung der isolierten Magnete dominiert die Gesamtumweltbelastungen in beiden Varianten der Sekundärproduktion; die Vorbehandlung spielt keine (MAN) bzw. mit einem Anteil von 30% (MECH) eine untergeordnete Rolle.

In allen drei Fällen erfolgt der Grossteil der Beeinträchtigung von schädlichen Emissionen in die Luft (MAN: 73%, MECH: 75%, Primärproduktion: 76%), welche direkt in den Prozessschritten (v.a. nasschemische Aufbereitung) bzw. diesen vorgelagert bei der Herstellung der dafür erforderlichen Ressourcen-Inputs anfallen.

Der Verbrauch von Energieressourcen und deponierte Abfälle sind bei den auf mechanischer Vorbehandlung beruhenden Rückgewinnungs-Varianten nicht vernachlässigbar und sind zu einem überwiegenden Anteil auf den Stromverbrauch des Schredder-Prozesses und die und die mit der Stromproduktion verbundene Ablagerung radioaktiver Abfälle zurückzuführen.

Die Ergebnisse und entsprechenden Aussagen werden durch die drei weiteren Bewertungsmethoden weitgehend bestätigt, wobei lediglich der Unterschied zwischen der manuellen und mechanischen Sekundärproduktion leicht variiert.

9 Wirtschaftliche Tragbarkeit

9.1 Fragestellung

Die wirtschaftliche Tragbarkeit der Rückgewinnung kritischer Metalle wurde anhand eines systemdynamischen Simulationsmodells ermittelt. Das Modell wurde für Indium erstellt, liesse sich in ähnlicher Weise aber auch für Neodym erzeugen bzw. parametrisieren.

Bei den Untersuchungen stand die folgende Frage im Zentrum:

- Wie verändert sich der vorgezogene Recycling-Beitrag (VRB), wenn Swico in Zukunft Indium aus den Produktkategorien «TV-Monitor», «PC-Monitor» und «Laptop» zurückgewinnt?

Diese zentrale Frage wurde unter Veränderung wichtiger Annahmen analysiert. Zu diesen wichtigen, sich in der Zeit verändernden Annahmen zählen z. B. der Prozentsatz der rezyklierten Bildschirmgeräte, die Kosten der Aufkonzentrierung der indiumhaltigen Fraktion, die Kosten der finalen Rückgewinnung des Sekundär-Indiums, die Entwicklung des Weltmarktpreises von Indium sowie die Entwicklung des Ertrags/der Kosten der aufkonzentrierten indiumhaltigen Fraktion, der Anteil des manuell bzw. mechanisch verarbeiteten Rezyklats.

Nebst der Beantwortung der zentralen Fragestellung sollen mit dem Modell auch die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Wie viel Indium kann jährlich potentiell aus Bildschirmgeräten zurückgewonnen werden?
- Welche Verarbeitungsart (manuell oder mechanisch) führt zu optimalen Ergebnissen, d.h. tieferen Kosten des Indium-Recyclings und grösseren Mengen an zurückgewonnenem Indium?

Das Modell¹⁰ soll das Recycling von Indium aus Bildschirmgeräten im Swico Recycling System abbilden und die Simulation von wichtigen Indikatoren wie z. B. «Output Menge Indium», «Veränderung VRB» ermöglichen. Ebenfalls sollen verschiedenen Szenarien simuliert werden. Das Modell umfasst die gesamte Kette vom Verkauf der Produkte (Bildschirmgeräte) über die Nutzung, Rücknahme, Zerlegung bis zur Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen.

9.2 Methodisches Vorgehen

9.2.1 Modell

Zur Modellierung der Kosten des Recyclings von Indium aus Bildschirmgeräten wurde ein Modell nach der System-Dynamics-Methodik (Groesser 2012; Bossel 2004) erstellt.

¹⁰ Das Modell ist eine Entscheidungsunterstützung – ein Decision Support Tool – für das Swico Management. Deshalb wird das erstellte Simulationsmodell im Folgenden als «Swico DST» bezeichnet.

9.2.2 Modellgrenze

Die Abgrenzung des Swico DST Modells wurde wie folgt definiert:

- Das Modell umfasst den Zeitraum 1990-2030.
- Das Modell deckt die Versorgungskette (supply chain) der Bildschirmgeräte vom Verkauf bis zur Rückgewinnung der Sekundärressourcen, inkl. Indium im Rahmen des Swico Recycling Systems ab. Der Fokus liegt dabei auf den Recycling-Aktivitäten. Die anderen Aktivitäten im Swico Recycling System wie z. B. die Rückgabe und das Recycling von Verpackungen, die Administration sind im Swico DST Modell nicht berücksichtigt.
- Das Modell berücksichtigt entsprechend nur den für das Recycling von Produkten zu verwendenden Teil des VRB, d. h. 35% (Swico 2014).
- Das Modell bildet die drei Produkt-Kategorien ab: «TV-Monitor», «PC-Monitor» und «Laptop».
- Zusätzlich zu den in der Praxis bereits heute zurückgewonnenen Fraktionen (Aluminium, Kupfer, Eisen) berücksichtigt das Modell die Rückgewinnung von Indium, nicht aber die Rückgewinnung weiterer seltener Metalle.

9.2.3 Modellstruktur

Abbildung 9-1 zeigt die vereinfachte Modellstruktur. Das Modell besteht aus drei Teilmodellen:

- Teilmodell 1: Produkte und Finanzen
- Teilmodell 2: Verarbeitung der Produkte (manuell und mechanisch)
- Teilmodell 3: Aufkonzentrierung und Rückgewinnung des Indiums.

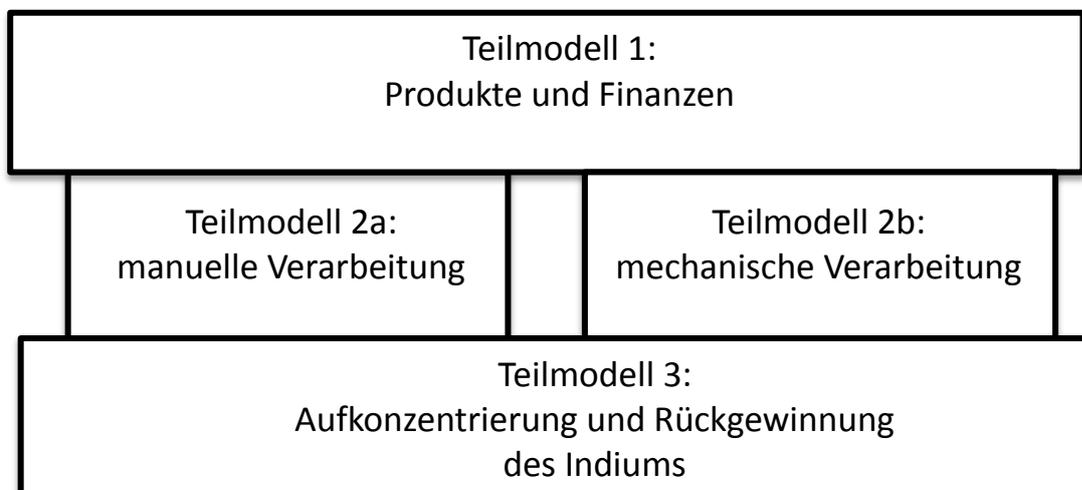


Abbildung 9-1: Modellstruktur

9.2.4 *Modellannahmen und Modellparameter*

Die oben beschriebene Modellstruktur wurde mit Hilfe der Daten und Ergebnisse früherer Studien (Böni and Wäger 2015; Böni and Widmer 2011) und mit Hilfe von Experteneinschätzungen parametrisiert und validiert. Für die Modellerstellung wurden verfügbare statistische Daten (z. B. Anzahl verkaufte Bildschirmgeräte) sowie Erfahrungswerten (z. B. Indium Massenanteil in m² Display) als einzelne Modellparameter eingesetzt. Alle verwendeten Parameter und Daten sind im Bericht 2.3 zur dynamischen Modellierung dargestellt. Neben den Modellparameter wurden auch wichtige Modellannahmen getroffen. Diese Annahmen sind bei der Interpretation der Resultate der Simulationen stets zu berücksichtigen.

Wichtigste Annahmen sind:

- Der aktuelle VRB pro Produkt deckt die bisherigen Recyclingkosten ohne (wesentliche) Unter- bzw. Überdeckung ab. Diese Annahme ist insbesondere bei der Interpretation der Resultate der Variable «Veränderung VRB pro Produkt» von Bedeutung.
- Zur Zeit sind die Kosten für die Indium-Rückgewinnung, d. h. die Kosten für die Rückgewinnung des Indiums aus der indiumhaltigen Fraktion, noch mit grösseren Unsicherheiten behaftet. In einem ersten Schritt wird die Annahme getroffen, dass die Rückgewinnungskosten unter dem Weltmarktpreis von Indium liegen. Diese Annahme wird in Szenario 2 aufgegriffen und die Sensitivität der Ergebnisse auf die Veränderung der Kosten der Rückgewinnung wird getestet.
- Die neuen Generationen der betrachteten Produkte weisen den gleichen Indiumgehalt pro m² auf wie bisherige Generationen.

9.2.5 *Modellvalidierung*

Die Modellstruktur und das Modellverhalten wurde validiert. Das Modell erzeugt valide Resultate, welche eine sehr hohe Passung zu den verfügbaren Vergangenheitsdaten. Abbildung 9-2 zeigt die Passung der simulierten Menge der zurückgegebenen Produkten mit verfügbaren Datenreihen.

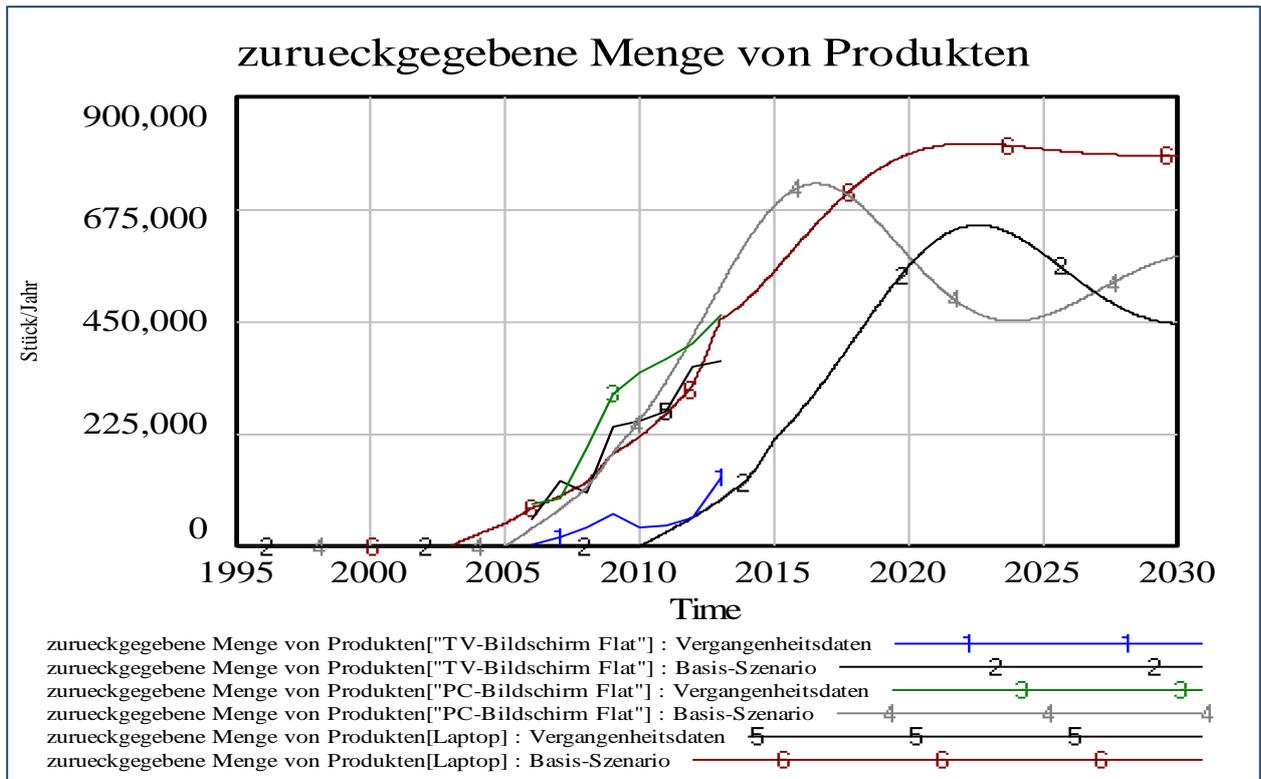


Abbildung 9-2: Modellvalidierung

9.3 Szenarien

Um die Fragestellungen beantworten zu können, wurden für die Simulation der Ergebnisse in Zusammenarbeit mit der Projektbegleitgruppe sieben Szenarien entwickelt.

Tabelle 8-1 und Tabelle 8-2 zeigen die simulierten Szenarien sowie die veränderten Eingabeparameter in einer Übersicht.

Tabelle 9-1: Szenarien 1-5 für die Modellierung der wirtschaftlichen Tragbarkeit

	Anteil manuelle Verarbei- tung	Anteil mechanische Verarbeitung	Indium Rückge- winnung ab	Lagerung Displays ab	Rückgabequote			
					TV	PC	Laptop	
Szenario 1: Basis-Szenarium								
Szenario 1a 100% manuelle Verarbei- tung	100%	0%	2016	-	80%	80%	90%	
Szenario 1b 50% manuelle 50% mecha- nische Verarbeitung	50%	50%	2016	-	80%	80%	90%	
Szenario 1c 100% mechanische Verar- beitung	0%	100%	2016	-	80%	80%	90%	
Szenario 2: Veränderung der Kosten der Indium-Rückgewinnung								
Szenario 2a niedrigere Aufkonzentrierungskosten (50%)	100%	0%	2016	-	80%	80%	90%	
Szenario 2b höhere Aufkonzentrierungskosten (200%)	100%	0%	2016	-	80%	80%	90%	
Szenario 2c niedrigere Rückgewinnungs- kosten (10%)	100%	0%	2016	-	80%	80%	90%	
Szenario 2d höhere Rückgewinnungs- kosten (90%)	100%	0%	2016	-	80%	80%	90%	
Szenario 2e Rückgewinnungskosten 20% über Weltmarktpreis (120%)	100%	0%	2016	-	80%	80%	90%	
Szenario 3: Lagerhaltung ab 2016, Rückgewinnung ab 2020								
Szenario 3a niedrigere Aufkonzentrierungskosten (50%)	100%	0%	2020	2016	80%	80%	90%	
Szenario 3b höhere Aufkonzentrierungskosten (200%)	100%	0%	2020	2016	80%	80%	90%	
Szenario 3c niedrigere Rückgewinnungskosten (10%)	100%	0%	2020	2016	80%	80%	90%	
Szenario 3d höhere Rückgewinnungskosten (90%)	100%	0%	2020	2016	80%	80%	90%	
Szenario 3e Rückgewinnungskosten 20% über Weltmarktpreis (120%)	100%	0%	2020	2016	80%	80%	90%	
Szenario 3f Standardkosten	100%	0%	2020	2016	80%	80%	90%	
Szenario 4: Veränderung Anzahl Produkte pro Person								
Szenario 4a Halbierung der Anzahl Pro- dukte pro Person von 2016 bis 2026	100%	0%	2016	-	80%	80%	90%	
Szenario 4b Verdoppelung Produkte pro Person von 2016 bis 2026	100%	0%	2016	-	80%	80%	90%	
Szenario 5: Veränderung der Menge Indium in den Produkten								
Szenario 5a Abnahme von Indium in m2 um 30% von 2016 bis 2026	100%	0%	2016	-	80%	80%	90%	
Szenario 5b Zunahme von Indium in m2 Panel um 30% von 2016 bis 2026	100%	0%	2016	-	80%	80%	90%	

Tabelle 9-2: Szenarien 6-7 für die Modellierung der wirtschaftlichen Tragbarkeit

	Anteil manuelle Verarbeitung	Anteil mechanische Verarbeitung	Indium Rückgewinnung ab	Lagerung Displays ab	Rückgabequote		
Szenario 6: Veränderung der Nutzungsdauer							
Szenario 6a Halbierung der Nutzungsdauer der Produkte von 2016 bis 2026	100%	0%	2016	-	80%	80%	90%
Szenario 6b Verdopplung der Nutzungsdauer der Produkte von 2016 bis 2026	100%	0%	2016	-	80%	80%	90%
Szenario 7: Veränderung der Rückgabequote							
Szenario 7a: Eine Senkung der Rückgabequoten um 20%	100%	0%	2016	-	64%	64%	72%
Szenario 7b: Eine Senkung der Rückgabequoten um 40%	100%	0%	2016	-	48%	48%	54%

9.4 Resultate

9.4.1 Veränderung des VRB

Die Resultate zeigen auf, welche Veränderung des VRB in CHF nötig wäre, falls das Indium-Recycling in das Swico Recycling System eingeführt und aus dem VRB finanziert werden würde.

9.4.1.1 Szenario 1: Indium Rückgewinnung ab 2016

Die Veränderung des VRB, die eine Einführung des Indium-Recyclings (Szenario 1) ab 2016 bewirken würde, geht aus Tabelle 9-3 hervor. Aus den Resultaten ist klar ersichtlich, dass die manuelle Verarbeitung die effizientere Verarbeitungsart ist und der VRB in diesem Fall lediglich um 0.19 CHF/Produkt bei TV-Monitoren, um 0.08 CHF/Produkt bei PC-Monitoren und um 0.07 CHF/Produkt bei Laptops erhöht werden müsste.

Würden die Produkte mechanisch verarbeitet, müsste die nötige Anpassung des entsprechenden VRB rund um den Faktor 10 höher sein, d. h. um 3.52 CHF/Produkt bei TV-Monitoren, um 1.44 CHF/Produkt bei PC-Monitoren und um 1.28 CHF/Produkt bei Laptops.

Tabelle 9-3: Veränderung VRB (in CHF) Szenario 1

Veränderung VRB	TV-Monitore	PC-Monitore	Laptops
Szenario 1a: 100% manuelle Verarbeitung	CHF 0.19	CHF 0.08	CHF 0.07
Szenario 1b: 50% manuelle, 50% mechanische Verarbeitung	CHF 1.86	CHF 0.76	CHF 0.68
Szenario 1c: 100% mechanische Verarbeitung	CHF 3.52	CHF 1.44	CHF 1.28

9.4.1.2 Szenario 2: Variierung Kosten des Indium-Recyclings

Die Resultate der Simulation von Szenario 2 zeigen die Sensitivität der Resultate (der Veränderung des VRB) bei einer Veränderung der für das Indium-Recycling spezifischen Kostenkategorien (Aufkonzentrierungskosten und Rückgewinnungskosten). Die Simulation wurde nur für den Fall einer vollständig (100%-Anteil) manuellen Verarbeitung durchgeführt, da sich diese in Szenario 1 als die effizientere Verarbeitungsart erwiesen hat. Die Resultate sind deshalb mit den Resultaten des Szenarios 1a direkt vergleichbar und zeigen die Sensitivität des Modells gegenüber der Veränderungen der Indium-Recyclingkosten auf.

Tabelle 9-4: Veränderung VRB (in CHF) Szenario 2 im Vergleich zum Szenario 1a

Veränderung VRB	TV-Monitore	PC-Monitore	Laptops
<i>Szenario 1a: 100% manuelle Verarbeitung</i>	<i>CHF 0.19</i>	<i>CHF 0.08</i>	<i>CHF 0.07</i>
Szenario 2a: niedrige Aufkonzentrierungskosten 50%	CHF 0.06	CHF 0.03	CHF 0.02
Szenario 2b: hohe Aufkonzentrierungskosten 200%	CHF 0.45	CHF 0.18	CHF 0.16
Szenario 2c: niedrige Rückgewinnungskosten 10%	CHF 0.11	CHF 0.04	CHF 0.04
Szenario 2d: hohe Rückgewinnungskosten 90%	CHF 0.27	CHF 0.11	CHF 0.10
Szenario 2e: Rückgewinnungskosten 20% über Weltmarktpreis	CHF 0.34	CHF 0.14	CHF 0.12

Die Resultate in Tabelle 9-4 zeigen, dass das Modell Swico DST und seine Ergebnisse sensitiv auf eine Veränderung der Aufkonzentrierungskosten und/oder der Rückgewinnungskosten reagieren. So bewirkt z. B. die Verdoppelung der Aufkonzentrierungskosten eine 2.3-fache Steigerung des VRB (um 0.45 CHF anstatt um 0.19 CHF) bei TV-Monitoren. Eine Erhöhung der Rückgewinnungskosten (Kosten D) um 70% bewirkt eine Steigerung des VRB um 76% (um 0.34 CHF anstatt um 0.19 CHF) bei TV-Monitoren. Auf der anderen Seite bewirkt die Senkung der Rückgewinnungskosten um 40% eine Reduktion der zusätzlich benötigte VRB um 57% bei allen drei Produkten.

9.4.1.3 Szenario 3: Lagerhaltung ab 2016, Rückgewinnung ab 2020

Die Ergebnisse der Simulation von Szenario 3, d. h. der Lagerung der Displays ab 2016 (inkl. den entsprechenden Lagerungskosten) und die anschliessende Rückgewinnung ab 2020, sind in Tabelle 9-5 dargestellt.

Das Unterszenario 3f ist direkt mit Unterszenario 1a vergleichbar und zeigt, dass die zusätzlichen Lagerungskosten bei einer späteren Rückgewinnung ab 2020 keinen signifikanten Einfluss auf die VRB-Veränderung haben. Die resultierende Veränderung des VRB bei einer sofortigen Rückgewinnung ab 2016 ist 0.19 CHF/Produkt bei TV-Monitoren. Die Simulation zeigt, dass eine Lagerung ab 2016 und Rückgewinnung ab 2020 eine Veränderung des VRB von 0.20 CHF/Produkt benötigen würde. Bei den beiden Produktkategorien „PC-Monitoren“ und „Laptops“ bewirkt die

Lagerung und spätere Rückgewinnung keine zusätzliche Veränderung des VRB gegenüber der sofortigen Rückgewinnung ab 2016 ohne Lagerung.

Die Ergebnisse in Tabelle 9-5 zeigen die Veränderung des VRB bei einer gleichzeitigen Variation der Kosten des Indium Recyclings (wie in Szenario 2) und der Lagerung der Displays ab 2016 und Rückgewinnung ab 2020. Aus dem Vergleich mit Szenario 1a ist ersichtlich, dass die Lagerung und spätere Rückgewinnung nur eine minimale zusätzliche Erhöhung des VRB zur Folge hätte.

Tabelle 9-5: Veränderung VRB (in CHF) Szenario 3 im Vergleich zu Szenario 1a

Veränderung VRB	TV-Monitore	PC-Monitore	Laptops
Szenario 1a: 100% manuelle Verarbeitung	CHF 0.19	CHF 0.08	CHF 0.07
Szenario 3a: niedrige Aufkonzentrierungskosten 50%	CHF 0.06	CHF 0.03	CHF 0.02
Szenario 3b: hohe Aufkonzentrierungskosten 200%	CHF 0.48	CHF 0.20	CHF 0.17
Szenario 3c: niedrige Rückgewinnungskosten 10%	CHF 0.11	CHF 0.05	CHF 0.04
Szenario 3d: hohe Rückgewinnungskosten 90%	CHF 0.29	CHF 0.12	CHF 0.11
Szenario 3e: Rückgewinnungskosten 20% über Weltmarktpreis	CHF 0.36	CHF 0.15	CHF 0.13
Szenario 3f: Lagerhaltung ab 2016, Rückgewinnung ab 2020 bei unveränderten Aufkonzentrierungs- und Rückgewinnungskosten	CHF 0.20	CHF 0.08	CHF 0.07

Die Ergebnisse der Simulationen der Szenarien 4, 5 und 6 haben keinen signifikanten Einfluss auf die Veränderung des VRB. Diese bleibt in den erwähnten Szenarien stabil. Das bedeutet, dass die angenommenen Veränderungen im Konsumenten-Verhalten sowie in der Technologie keine signifikante Veränderung des VRB gegenüber Szenario 1 (Indium-Rückgewinnung ab 2016) zur Folge haben. Die Ergebnisse der Simulation des Szenarios 7 zeigen, dass eine niedrigere Rücklaufquote der Produkte eine etwas geringere Veränderung des VRB mit sich bringen würde als bei den anderen Szenarien. Dies, weil weniger Produkte verarbeitet werden müssten, falls weniger Produkte zurück gegeben würden.

9.4.2 Menge des zurückgewonnenen Indiums

Die Resultate der Simulationen bezüglich der Menge des zurückgewonnenen Indiums pro Jahr sind als weitere Grundlage für die Entscheidung über die künftige Rückgewinnung von Indium wichtig. Es handelt sich hierbei um die ersten Schätzungen der Mengen im Zeitraum von 2016 bis 2030.

Zuerst werden die Resultate bzgl. der Mengen zurückgewonnenen Indiums unter der Standardannahme der Rücklaufquoten (d. h. 80% für TV-Monitore, 80% für PC-Monitore und 90% für Laptops) vorgestellt.

Abbildung 9-3 und 8-4 bilden die Entwicklung der Mengen an reinem Indium, das unter den verschiedenen Szenarien pro Jahr zurückgewonnen werden könnte, ab. Daraus wird ersichtlich, wie die Indium-Menge, die ab 2020 in der Schweiz jährlich zurückgewonnen werden könnte, je

nach Szenario stark variiert. Die Simulationen der einzelnen Szenarien zeigen Ergebnisse **zwischen 285kg und 475 kg Indium/Jahr für das Jahr 2026**.

Die Simulation der Unterszenarien 1a (100% manuelle Verarbeitung) und 1c (100% mechanische Verarbeitung) zeigt grosse Unterschiede bezüglich der zurückgewonnenen Indium-Mengen auf. So könnten mit Hilfe einer mechanischen Verarbeitung im Jahr 2026 nur 200 kg Indium pro Jahr zurückgewonnen werden. Dies im Vergleich zu 475 kg (2026) bei einer vollständig manuellen Verarbeitung. Daraus ist ersichtlich, dass auch bezüglich der Mengen an zurückgewonnenem Indium eine manuelle Verarbeitung ein wesentlich grösseres Potenzial hat als die mechanische Verarbeitung.

Da die potentielle Menge an Indium, die zurückgewonnen werden könnte, direkt mit der Anzahl zu verarbeitender Produkte und somit mit der Rücklaufquote der Produkte zusammenhängt, wurde das Szenario 7 entwickelt. Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass die Menge zurückgewonnen Indiums im Jahr 2026 von 475 kg/Jahr auf 380 kg/Jahr abnehmen würde, falls die angenommene Rücklaufquote um 20% sinken würde, d. h. bei TV- und PC-Monitoren von 80% auf 64% und bei Laptops von 90% auf 72%. Falls die Rücklaufquote um 40% sinken würde, resultierten 280 kg an zurückgewonnenem Indium/Jahr für das Jahr 2026.

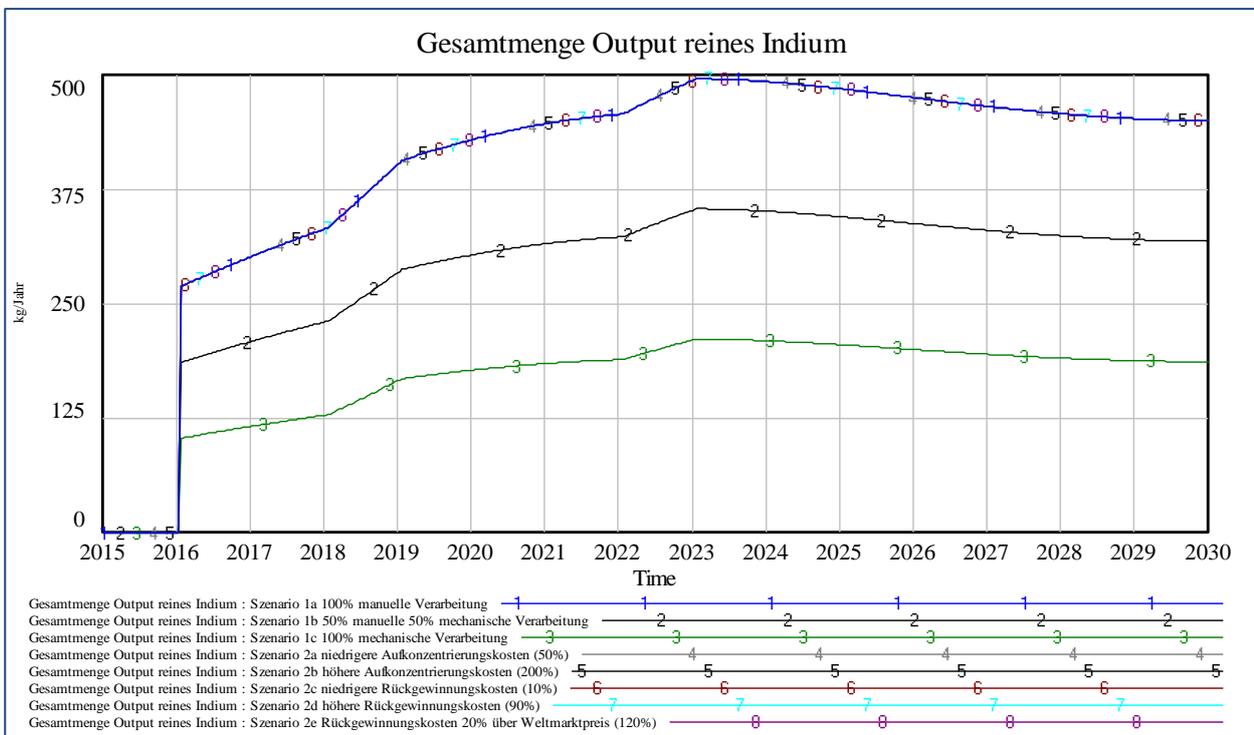


Abbildung 9-3: Resultate Gesamtmenge zurückgewonnenes Indium (Szenarien 1 und 2)¹¹

¹¹ Für eine bessere Lesbarkeit der Ergebnisse wurde Szenario 3 in Abbildung 9-3 nicht aufgeführt. Die Menge an Indium im Jahr 2020 ist bei diesem Szenario so gross, dass die Skalierung der Abbildung stark verzerrt wird.

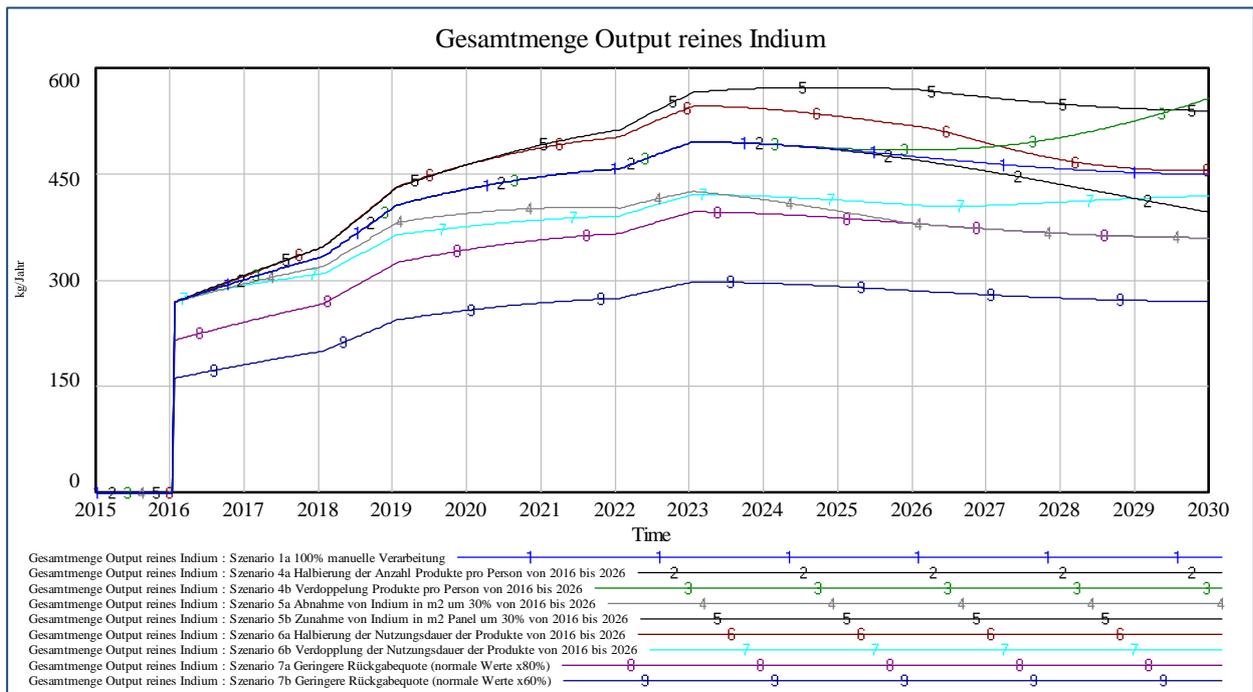


Abbildung 9-4: Resultate Gesamtmenge zurückgewonnenes Indium (Szenarien 4 bis 7)

Tabelle 8-6 zeigt die Mengen reinen Indiums im Jahr 2026 für alle simulierten Szenarien. Sie zeigt zudem die Auswirkung einer Veränderungen des Konsum-Verhaltens (d.h. einer Halbierung bzw. einer Verdoppelung der Anzahl Produkte im Zeitraum von 2016 bis 2026 pro Person in Szenarien 4a bzw. 4b), einer Veränderung der Nutzungsdauer (Halbierung der Nutzungsdauer in Szenario 6a, Verdopplung der Nutzungsdauer in Szenario 6b im selben Zeitraum) auf.

Den stärksten Einfluss auf die Menge reinen Indiums scheint die Verdoppelung der Nutzungsdauer sowie eine Abnahme der in den Produkten eingesetzten Indium-Menge um 30% zu haben. Die Gesamtmenge Indium sinkt in diesen beiden Szenarien (auf 406 bzw. 380 kg im Jahr 2026). Umgekehrt resultiert die grösste Menge an Indium in Szenario 5b (Veränderung der Technologie; +30% Indium pro Quadratmeter Panel). In diesem Fall resultiert eine Output-Menge an reinem Indium von 570 kg im Jahr 2026.

Tabelle 9-6: Ergebnisse Output-Menge reines Indium in 2026 (kg Indium)

Output-Menge reines Indium in kg	2026
Szenario 1: Indium-Rückgewinnung	
Szenario 1a 100% manuelle Verarbeitung	475
Szenario 1b 50% manuelle 50% mechanische Verarbeitung	337
Szenario 1c 100% mechanische Verarbeitung	200
Szenario 2: Kosten des Indium-Recyclings	
Szenario 2a niedrige Aufkonzentrierungskosten 50%	475
Szenario 2b hohe Aufkonzentrierungskosten 200%	475
Szenario 2c niedrige Rückgewinnungskosten 10%	475
Szenario 2d hohe Rückgewinnungskosten 90%	475
Szenario 2e Rückgewinnungskosten 10% über Weltmarktpreis 120%	475
Szenario 3: Lagerhaltung ab 2016, Rückgewinnung ab 2020	
Szenario 3a niedrige Aufkonzentrierungskosten 50%	475
Szenario 3b hohe Aufkonzentrierungskosten 200%	475
Szenario 3c niedrige Rückgewinnungskosten 10%	475
Szenario 3d hohe Rückgewinnungskosten 90%	475
Szenario 3e Rückgewinnungskosten 10% über Weltmarktpreis 120%	475
Lagerhaltung ab 2016, Rückgewinnung ab 2020	475
Szenario 4: Anzahl Produkte pro Person	
Szenario 4a Halbierung der Anzahl Produkte pro Person von 2016 bis 2026	471
Szenario 4b Verdoppelung Produkte pro Person von 2016 bis 2026	484
Szenario 5: Menge Indium in Produkten	
Szenario 5a Abnahme von Indium in m2 Panel um 30% von 2016 bis 2026	380
Szenario 5b Zunahme von Indium in m2 Panel um 30% von 2016 bis 2026	570
Szenario 6: Veränderung Nutzungsdauer	
Szenario 6a Halbierung der Nutzungsdauer der Produkte von 2016 bis 2026	518
Szenario 6b Verdopplung der Nutzungsdauer der Produkte von 2016 bis 2026	406
Szenario 7: Veränderung der Rückgabequote	
Szenario 7a: Eine Senkung der Rückgabequoten um 20%	380
Szenario 7b: Eine Senkung der Rückgabequoten um 40%	285

9.4.3 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Modellierung haben gezeigt, dass im Falle einer manuellen Verarbeitung der aktuell erhobene VRB die zusätzlichen Kosten des Indium-Recyclings bereits heute beinahe decken würde. Die vollständige finanzielle Deckung des Indium-Recyclings würde mit einer marginalen Erhöhung des VRB von ca. 0.19 CHF/Produkt bei TV-Monitoren, von ca. 0.07 CHF/Produkt bei PC-Monitoren und von ca. 0.08 CHF/Produkt bei Laptops erreicht. Im Fall einer ausschliesslich mechanischen Verarbeitung müsste der aktuell erhobene VRB zusätzlich um ca. 3.5 CHF/Produkt bei den TV-Monitoren, um ca. 1.4 CHF/Produkt bei den PC-Monitoren und um ca. 1.3 CHF/Produkt bei den Laptops erhöht werden, um die Kosten des Indium-Recyclings vollständig zu decken.

Diese Ergebnisse sind vor dem Hintergrund der getroffenen Annahmen zu interpretieren:

- Eine Veränderung der Kosten der Rückgewinnung des Indiums hat eine starke Auswirkung auf die Veränderungen des VRB. Gleichzeitig sind diese Kostenpositionen mit grosser Unsicherheit behaftet. Falls z. B. die Aufkonzentrierungskosten um 200% steigen würden, würde sich dies mit einer zusätzlichen Erhöhung des VRB um 0.42 CHF/Produkt bei den TV-Monitoren auswirken.
- Gemäss den Simulationen ergibt sich 2026 eine Output-Menge an reinem Indium von 475 kg/Jahr bei einer vollständig manuellen Verarbeitung und einer hohen Rücklaufquote (80% bei Bildschirmen, 90% bei Laptops). Diese Mengen an Indium pro Jahr sind höher als die bisher aufgrund der Vergangenheitsdaten vermuteten Mengen. Die Ergebnisse dieser Modellierung unter den definierten Annahmen zeigen auf, dass das Potenzial eines Indium-Recyclings grösser ist als bisher vermutet. Sinkt jedoch die Rücklaufquote der Geräte um 20% bzw. 40%, so wären die zurückgewinnbaren Indium-Mengen bedeutend kleiner (380 kg/Jahr bzw. 285 kg/Jahr in 2026).
- Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass mit der manuellen Verarbeitung von Produkten potentiell wesentlich mehr reines Indium (475 kg in 2026) zurückgewonnen werden könnte als mit der mechanischen Verarbeitung (200 kg in 2026). Bezüglich der Wirtschaftlichkeit des Indium-Recyclings aus den Bildschirmgeräten hat sich ergeben, dass die Rückgewinnung des Indiums im Falle einer mechanische Vorbehandlung der Bildschirmgeräte mindestens 10-fach teurer ist als bei einer manuellen Vorbehandlung. Zudem geht ein grösserer Teil des Indiums in den mechanischen Prozessen verloren.

Im Rahmen des Projekts wurden deshalb alle weiteren Szenarien basierend auf der manuellen Verarbeitung entwickelt. Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass eine Veränderung im Konsumenten-Verhalten (Verdopplung bzw. Halbierung der Nutzungsdauer der Bildschirmgeräte) sowie in der Technologie (Zunahme bzw. Abnahme von Indium pro m² Panel) keinen signifikanten Einfluss auf die Veränderung des VRB wohl aber auf die Menge an zurückgewinnbaren Indium haben (siehe Tabelle 8-6).

10 Umsetzungsmodell

10.1 Rechtlicher Rahmen

Noch ist nicht abschliessend geklärt, wann und in welchem Umfang die Rückgewinnung von seltenen technischen Metallen künftig als Stand der Technik (gemäss Art. 3 Abs. 5 Anhörungsentwurf VREG) betrachtet wird. Sollte dies einmal der Fall sein, so wäre eine Rückgewinnung gemäss Art. 9 Abs. 1 lit. b Anhörungsentwurf VREG umzusetzen (vgl. Abbildung 10-1).

⁵ Als Stand der Technik gilt der aktuelle Entwicklungsstand technologischer Verfahren, der:

- a. bei vergleichbaren Anlagen im In- oder Ausland erfolgreich erprobt ist oder bei Versuchen erfolgreich eingesetzt wurde und nach den Regeln der Technik auf andere Anlagen übertragen werden kann; und
- b. für einen mittleren und wirtschaftlich gesunden Betrieb der betreffenden Branche wirtschaftlich tragbar ist.

Art. 9 Anforderungen an die Entsorgung

¹ Wer Geräte und Bestandteile entsorgt, muss sicherstellen, dass die Entsorgung umweltverträglich und nach dem Stand der Technik erfolgt; namentlich müssen:

- a. besonders schadstoffhaltige Bestandteile wie quecksilberhaltige Schalter und Hintergrundbeleuchtungen von Bildschirmen, PCB-haltige Kondensatoren und FCKW-haltige Wärmeisolationen getrennt entsorgt werden;
- b. verwertbare Anteile, insbesondere Kunststoffe, Bildröhren, metallhaltige Bestandteile wie Batterien, Leiterplatten und Metallgehäuse sowie seltene technische Metalle wie Gold, Palladium, Indium, Gallium, Germanium, Neodym und Tantal, soweit möglich verwertet werden;
- c. nicht verwertete organisch-chemische Bestandteile wie Kunststoffgehäuse, Kabelisolationen und Kunstharzplatten in geeigneten Anlagen verbrannt werden.

Abbildung 10-1: Bestimmungen zum Stand der Technik und zur Rückgewinnung seltener technischer Metalle gemäss Anhörungsentwurf zur VREG vom 3. Juni 2013

10.2 Systemoptimierung durch Anreize

Es stellt sich die Frage, wie in einem künftigen Rücknahmesystem die Finanzierung der Rückgewinnung von Indium oder Neodym erfolgen müsste, falls die Kosten die möglichen Erträge weiterhin übertreffen sollten. Die Frage ist insofern von Interesse, als Swico gegenwärtig daran ist, eine Neu-Ausschreibung der Recyclingverträge vorzubereiten. Im heutigen Zeitpunkt ist es unwahrscheinlich, dass eine Indium- oder Neodym-Rückgewinnung bis zum anvisierten Vertragsbeginn (1. Januar 2017) dem Stand der Technik entsprechen wird. Hingegen besteht für Swico

die Möglichkeit, die Verträge mit den Recyclingpartnern bezüglich Rückgewinnung von seltenen technischen Metallen anschlussfähig zu gestalten.

10.2.1 Aktuelles Entschädigungsmodell „push“

Im aktuellen Entschädigungsmodell (nachfolgend "push" genannt) von Swico erhält der Recycler basierend auf einer Ausschreibung eine Entschädigung pro verarbeitete Tonne (vgl. Abbildung 10-2). Die Entschädigung soll die Nettokosten decken, welche aus der Verarbeitung (Recyclingkosten minus Materialerlös) entstehen. Die Entschädigung erfolgt gleich für alle Recycler und ist indexiert nach den Rohstoffpreisen für Eisen, Kupfer und Aluminium, nach dem Bildschirmanteil der gesamten verarbeiteten Menge (aller Recycler) sowie den Wechselkursen. Sie erfolgt unabhängig von der Art der verarbeiteten Geräte. D.h. der gerätespezifische VRB, welche beim Kauf erhoben wird, kommt nicht der entsprechenden Gerätekategorie zu Gute.

Die Anreize im heutigen Entschädigungsmodell sind:

- möglichst viel Material verarbeiten
- „gutes“ Material verarbeiten, d.h. eher Geräte mit wertvollen Komponenten akquirieren
- Recycling dort optimieren wo es sich finanziell lohnt (Basis- und Edelmetalle, Kunststoffe)
- Entsorgungskosten niedrig halten (Schadstoffentfrachtung minimieren)

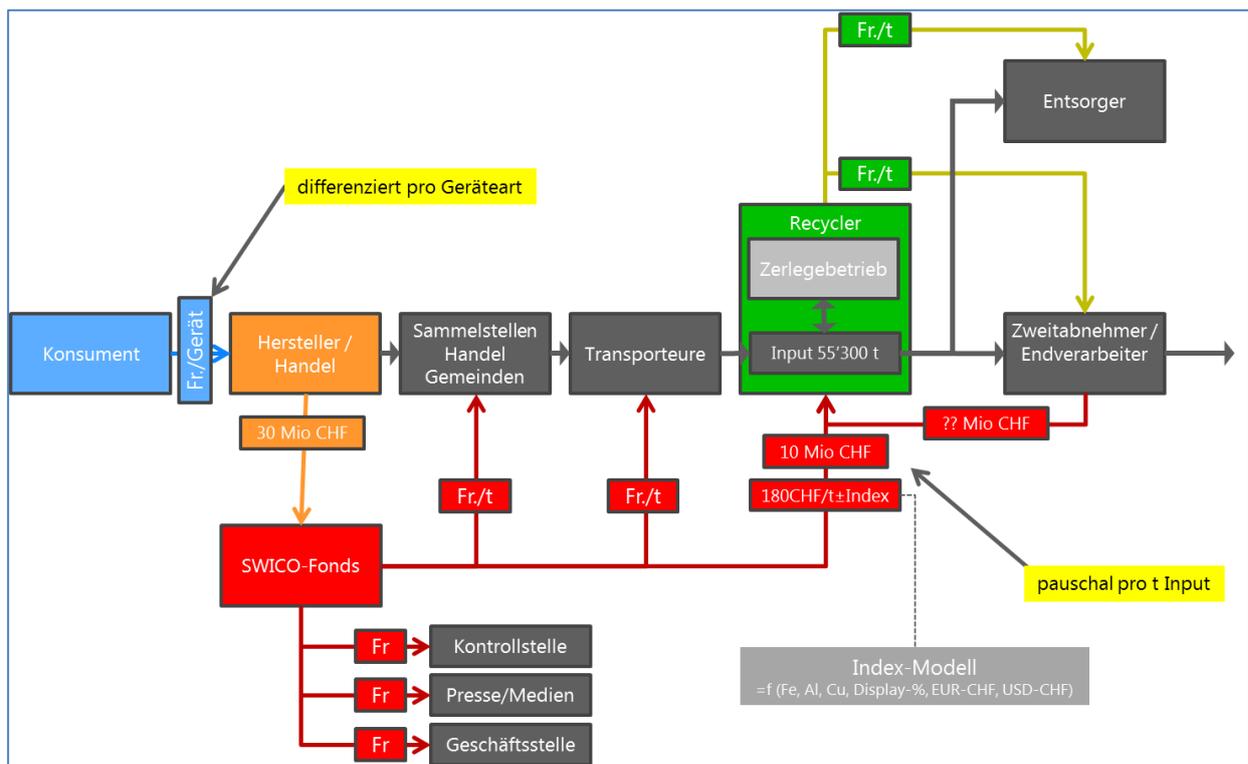


Abbildung 10-2: Material- und Geldflüsse im heutigen Swico-System („push“)

Im heutigen System wäre eine Entschädigung für die Rückgewinnung kritischer Metalle möglich, falls Swico die Erzeugung indium- oder neodymhaltiger Fraktionen mit einem Betrag entschädigen würde. Eine solche Entschädigung könnte einen Anreiz dafür setzen, den notwendigen Zusatzaufwand zu betreiben. Eine Entschädigung würde dann nach der Menge der nachweislich erzeugten Fraktion (z.B. kg Panel und kg Magnete) erfolgen.

Dennoch stellt sich die Frage, ob die Anreize nicht dort gesetzt werden müssten, wo das System von der stofflichen Seite her zu optimieren ist. Wodurch dann diejenigen Recycler finanzielle Vorteile haben würden, welche den nicht kostendeckenden Teil ihres Auftrages möglichst optimal erfüllen.

10.2.2 Entschädigungsmodell „pull“

Ein alternatives Entschädigungsmodell (nachfolgend "pull" genannt) könnte die Anreize (teilweise oder vollständig) dort setzen, wo eine Systemoptimierung zu einer möglichst weitgehenden Schadstoffentfrachtung und zu einem Recycling wertvoller Komponenten führt, unabhängig davon, ob dafür Nettoerlöse oder Nettokosten resultieren. Ein solches System könnte zusätzlich die Materialkategorien differenzieren.

Beim "pull" Ansatz verarbeitet der Recycler die Elektronikaltgeräte und erhält je nach Zusammensetzung seines Warenkorbes dafür entweder eine Entschädigung (wenn der Recyclingaufwand den Materialerlös übersteigt) oder muss diese Geräte kaufen (im umgekehrten Fall). Für seine unrentablen Tätigkeiten erhält er eine Entschädigung, welche seinen Mehraufwand deckt. D.h. das Rücknahmesystem entschädigt für die Menge der schadstoffhaltigen und zu entsorgenden Anteile (so wie das heute bereits für Batterien geschieht) und entschädigt auch die nicht kostendeckende Rückgewinnung einzelner Stoffe. Die Zusatzfinanzierung zieht („pull“) damit erwünschte Fraktionen - sowohl Schadstoffe wie Wertstoffe - aus dem Materialfluss.

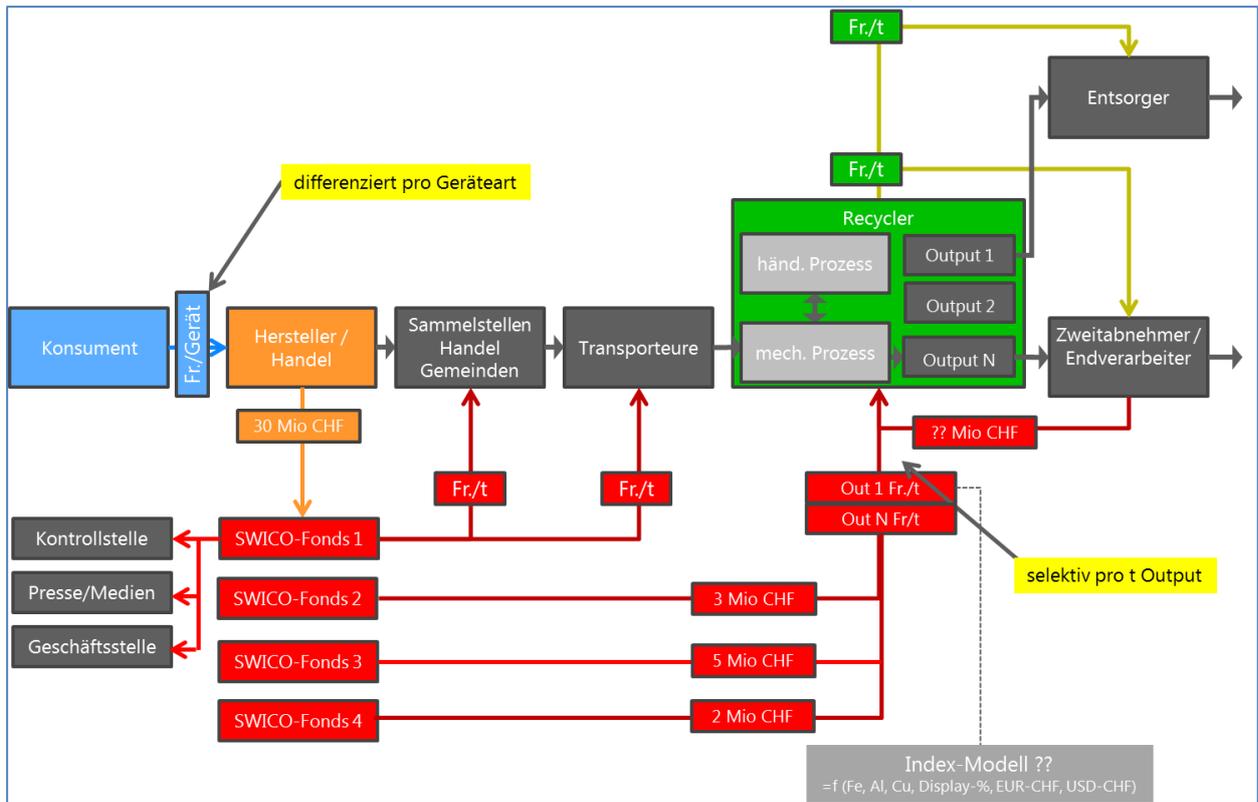


Abbildung 10-3: Material- und Geldflüsse in einem fiktiven System „pull“

11 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Aus den Resultaten des Projektes e-Recmet lassen sich folgende **zentralen Schlussfolgerungen** ziehen:

- Aus **ökologischer Sicht** zeigte das Projekt e-Recmet, dass eine Rückgewinnung von Indium aus Elektronikgeräten gegenüber der Primärgewinnung ökologisch konkurrenzfähig ist. Die Rückgewinnung von Neodym(oxid) schneidet aus ökologischer Sicht sowohl bei manueller als auch bei mechanischer Vorbehandlung deutlich besser ab als eine Primärgewinnung.
- Die **ökonomischen Modellierungen** und die Kostenbetrachtungen am Beispiel Indium zeigten, dass eine Rückgewinnung Zusatzkosten verursacht, d.h. für eine Rückgewinnung finanzielle Zuschüsse benötigen würden. Solche Zuschüsse könnten z.B. über eine Erhöhung der vorgezogenen Recyclinggebühr finanziert werden. Soweit sich dies zum heutigen Zeitpunkt sagen lässt, würde eine solche Erhöhung moderat ausfallen und die Produktpreise nur unmerklich erhöhen. Die wirtschaftliche Tragbarkeit im Falle von Indium ist somit voraussichtlich gegeben. Für den Fall Neodym konnten keine analogen Betrachtungen durchgeführt werden.
- Die **technische Machbarkeit** der Rückgewinnung von Indium und Neodym entlang der gesamten Behandlungskette konnte nicht abschliessend geklärt werden. Sowohl auf Stufe Vorbehandlung, wie auch auf Stufe Zwischen- und Endbehandlung sind weitere Entwicklungen notwendig um diese zu beurteilen.

Abgeleitet aus diesen Schlussfolgerungen geben wir folgende **Empfehlungen** an die Projektträger ab:

1. Eine Zwischenlagerung von indium- und neodymhaltigen Komponenten aus Elektronikgeräten soll den Recyclingbetrieben empfohlen und allenfalls durch Anreize gefördert werden.
2. Untersuchungen und Entwicklungen zur Optimierung der Vor- und Zwischenbehandlung indium- und neodymhaltiger Komponenten sind zu unterstützen.
3. Die weitere Entwicklung der Rückgewinnung von Indium und Neodym aus Elektronikgeräten ist im Auge zu behalten und es sind frühzeitig geeignete technische und organisatorische Massnahmen zu treffen, falls sich eine Rückgewinnung als technisch möglich und wirtschaftlich tragbar erweisen sollte.
4. Swico soll im Hinblick auf eine Neuausschreibung der Verträge Anpassungen beim Entschädigungssystem evaluieren. Dabei ist zu prüfen, ob die Anreize so gesetzt werden können, dass die Schadstoffentfrachtung maximiert und die Verwertung optimiert werden können.

Literaturverzeichnis

- Angerer, G., L. Erdmann, F. Marscheider-Weidemann, M. Scharp, A. Lüllmann, V. Handke, and M. Marwede. 2009. "Rohstoffe für Zukunftstechnologien."
- Binnemans, Koen, Peter Tom Jones, Bart Blanpain, Tom Van Gerven, Yongxiang Yang, Allan Walton, and Matthias Buchert. 2013. "Recycling of Rare Earths: A Critical Review." *Journal of Cleaner Production* 51 (July): 1–22. doi:10.1016/j.jclepro.2012.12.037.
- Blaser, F., S. Castelanelli, P. Wäger, and R. Widmer. 2011. "Seltene Metalle in Elektro- Und Elektronikaltgeräten - Vorkommen und Rückgewinnungstechnologien." Bern, Schweiz: Bundesamt für Umwelt.
- Böni, H., and P. Wäger. 2015. "Rückgewinnung von Kritischen Metallen wie Indium und Neodym aus Elektronikschrott auf der Stufe der manuellen und mechanischen Vorbehandlung." In *Recycling Und Rohstoffe*. Vol. 8. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky, K.; Goldmann, D.
- Böni, H., and R. Widmer. 2011. "Entsorgung von Flachbildschirmen in der Schweiz." Schlussbericht. St. Gallen: Empa.
- Bossel, H. 2004. "Systeme, Dynamik, Simulation: Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme." In , Books on Demand. Norderstedt.
- Buchert, M., A. Manhart, D. Bleher, and D. Pingel. 2012. "Recycling Critical Raw Materials from Waste Electronic Equipment." Oeko-Institut e.V.
- Classen, M., H.J. Althaus, S. Blaser, W. Scharnhorst, M. Tuchschnid, N. Jungbluth, and M. Faist Emmenegger. 2007. "Life Cycle Inventories of Metals." Dübendorf.
- Donoghue, Lisa, Paul Moroney, and William Harrison. 2014. "Novel LCD Separation Strategy to Allow for Maximum Rare Earth Recovery." In . Vienna, Austria.
- Elsner, H., F. Melcher, U. Schwarz-Schampera, and P. Buchholz. 2010. "Elektronikmetalle - Zukünftig Steigender Bedarf bei unzureichender Versorgungslage?" *Commodity Top News* 33.
- Erdmann, Lorenz, and Thomas Graedel. 2011. "The Criticality of Non-Fuel Minerals: A Review of Major Approaches and Analyses." *Environmental Science & Technology* 45 (18): 7620–30.
- European Commission. 2014. "Critical Raw Materials for the EU. Report of the Ad-Hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials."
- Frischknecht, Rolf. 2013. "Umweltverträgliche Technologien: Analyse und Beurteilung - Teil 2: Ökobilanzen (Life Cycle Assessment, LCA)." Skript ETH Zürich Studiengang Umweltwissenschaften. Zürich.
- Frischknecht, Rolf, and S. Büsser Knöpfel. 2013. "Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Methodische Grundlagen und Anwendung in der Schweiz." Umwelt-Wissen Nr. 1330. Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU.
- Fröhlich, Hannes. 2015. "Recycling von LCD Bildschirmgeräten." In *Recycling von Rohstoffen*. Vol. 8. Berlin, Deutschland: Thomé-Kozmiensky, K.; Goldmann, D.
- Groesser, Stefan. 2012. "Stichwort: System Dynamics." In , Gabler Wirtschaftslexikon. Heidelberg: Gabler.
- Hagelücken, C., and C.E.M. Meskers. 2010. "Complex Life Cycles of Precious and Special Metals." In *Linkages of Sustainability*. Vol. 4. Strüngmann Forum Report. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Hatayama, H., M. Masaharu, T. Kiyotaka, A. Tomohiko, and H. Yuzo. 2013. "Comparing Environmental Impacts of Natural Resource Extraction and Recycling Processes for Rare-Earth Magnet Production." *International Journal for Sustainable Innovations* 3 (1).
- IUTA, and fem. 2011. "Metallurgische Rückgewinnung von Indium, Gallium und Germanium aus Elektronikschrott und Entwicklung entsprechender Aufbereitungsmethoden für die Verwertungsindustrie." AiF-FV Nummer: 16040. Schäbisch Gmünd & Duisburg: fem Forschungsinstitut Edelmetalle und Metallchemie, Schwäbisch-Gmünd und Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V., Duisburg.

- Rasenack, K. 2014. "r3 Verbundprojekt „InAccess“." presented at the URBAN MINING Kongress& r³ Statusseminar „Strategische Metalle. Innovative Ressourcentechnologien“, Essen.
- Rasenack, K., and D. Goldmann. 2014. "Herausforderungen des Indium-Recyclings aus LCD-Bildschirmen und Lösungsansätze." In *Recycling Und Rohstoffe*. Vol. 7. Berlin, Deutschland: Thomé-Kozmiensky, K.; Goldmann, D.
- Rotter, V.S., Flamme, S., Ueberschaar, M., and Götzer, R. 2012. "Thermodynamische Herausforderung beim Recycling von Nebenmetallen." In *Recycling Und Rohstoffe*, 5:537–60. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky, K.; Goldmann, D.
- Rydén, Claes. 2014. "Recycle Flat Screens in a Safe and Profitable System." presented at the 13th International Electronics Recycling Congress IERC, Salzburg, January 22.
- Sander, K. et al. 2012. "Abfallwirtschaftliche Produkteverantwortung unter Ressourcenaspekten Projekt RePRO, Meilensteinbericht August 2012." Meilensteinbericht FKZ 3711 95 318. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Schüler, D., M. Buchert, S. Lui, S. Dittrich, and C. Merz. 2011. "Study on Rare Earth and Their Recycling." Darmstadt: Öko-Institut e.V.
- SEC. 2012. "SEC Adopts Rule for Disclosing Use of Conflict Minerals." www.sec.gov/news/press/2012/2012-163.htm.
- Skinner, B.J. 1979. "Earth Resources." *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, no. Vol. 76, No. 9, (September): pp. 4212–17.
- Sprecher, B., Y. Xiao, A. Walton, J. Speight, R. Harris, R. Kleijn, G. Visser, and G.J. Kramer. 2014. "Life Cycle Inventory of the Production of Rare Earths and the Subsequent Production of NdFeB Rare Earth Permanent Magnets." *Environmental Science and Technology* 48 (7): 3951–58.
- Swico. 2014. "Jahresbericht." Zürich. <http://www.swicorecycling.ch/de/aktuell-medien/publikationen>.
- UBA. 2012. "Glossar zum Ressourcenschutz." Umweltbundesamt. <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/4242.pdf>.
- USGS. 2013. *Mineral Commodities Summaries 2013*. Reston, Virginia: U.S. Department of the Interior; U.S. Geological Survey.
- Wäger, P., R. Widmer, E. Restrepo, and M. Fernandes. 2014. "Seltene Metalle in Fraktionen aus der maschinellen Aufbereitung von WEEE. Unveröffentlicht." Bern, Schweiz: Bundesamt für Umwelt.