

# Rückgewinnung von kritischen Metallen wie Indium und Neodym aus Elektronikschrott auf der Stufe der manuellen und mechanischen Vorbehandlung

Heinz Böni, Patrick Wäger und Renato Figi

1.	Motivation und Rahmenbedingungen.....	444
2.	Manuelle und mechanische Vorbehandlung indiumhaltiger Produkte.....	445
2.1.	Untersuchte Produkte.....	445
2.2.	Bestimmung der Indiumgehalte .....	446
2.3.	Manuelle Zerlegung.....	447
2.3.1.	Zerlegeschritte und Komponenten.....	447
2.3.2.	Zerlegezeiten.....	448
2.3.3.	Gewichte und Indiumgehalte .....	448
2.4.	Mechanische Vorbehandlung.....	449
2.4.1.	Zerlegeschritte und Fraktionen.....	449
2.4.2.	Gewichte und Indiumgehalte .....	450
2.5.	Effizienzvergleich .....	451
2.6.	Kosten .....	452
3.	Manuelle und mechanische Vorbehandlung neodymhaltiger Produkte .....	454
3.1.	Untersuchte Produkte.....	454
3.2.	Manuelle Zerlegung.....	454
3.2.1.	Zerlegeschritte .....	454
3.2.2.	Zerlegezeiten.....	456
3.2.3.	Neodymgehalte.....	458
3.3.	Mechanische Vorbehandlung .....	460
3.4.	Kosten .....	460
4.	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	460
5.	Literatur.....	462

## 1. Motivation und Rahmenbedingungen

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 über 120.000 Tonnen werden Basis- und Edelmetalle zurückgewonnen. Seltene Metalle 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 der dünnen Verteilung, in den thermodynamischen und metallurgischen Grenzen der Rückgewinnung [4] sowie vor allem auch in den fehlenden ökonomischen Anreizen.

Swico, der schweizerische Verband der ICT-Anbieter sowie weiterer verwandter Branchen, nimmt im Auftrag von Herstellern, Importeuren und Großverteilern die erweiterte Produkteverantwortung wahr und betreibt dazu ein kollektives Rücknahme- und Recyclingsystem. Gegenwärtig werden jährlich rund 60.000 Tonnen Elektronikabfälle aus den Kategorien ICT (WEEE Kat. 3) und Unterhaltungselektronik (WEEE Kat. 4) verarbeitet.

Im Projekt e-Recmet, welches die Empa im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU zusammen mit Swico und weiteren Partnern durchführt, wird untersucht, welche technischen und organisatorischen Voraussetzungen notwendig sind, damit die Rückgewinnung von seltenen Metallen aus Elektronikschrott künftig möglich wäre. Dabei wird auch geklärt, ob eine Rückgewinnung ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist.

Die acht von Swico beauftragten Recyclingunternehmen verarbeiten die zurückgenommenen Elektronikgeräte mit manuellen und mechanischen Prozessen. Die erzeugten Fraktionen werden anschließend im Ausland weiterverarbeitet, um daraus Metalle und Kunststoffe zurückzugewinnen. Bei der durch die Rückgewinnung von Metallen erzielten Wertschöpfung ist die Art der Vorbehandlung wesentlich. Dies gilt auch für seltene Metalle, welche in den Geräten oft in sehr geringen Konzentrationen vorliegen (*Gewürzmetalle*). Das Projekt e-Recmet konzentriert sich bei den technischen Abklärungen deshalb auf die in der Schweiz stattfindenden manuellen und mechanischen Vorbehandlungsprozesse.

Im Rahmen eines mehrstufigen Auswahlverfahrens, welches von den in den Elektronikgeräten vorhandenen kritischen Metallen nach Erdmann und Graedel [1] sowie den Konfliktmetallen gemäß der U.S. Security and Exchange Commission [8] ausging, wurden das Metall Indium und das Seltenerdmetall Neodym stellvertretend für andere seltene Metalle ausgewählt, um die in den Projektzielsetzungen gestellten Fragen zu beantworten.

Der vorliegende Beitrag fasst die wichtigsten Resultate der technischen Abklärungen zur Rückgewinnung der kritischen Metalle Indium und Neodym aus Elektronikschrott auf der Stufe der manuellen und mechanischen Vorbehandlung zusammen.

## 2. Manuelle und mechanische Vorbehandlung indiumhaltiger Produkte

### 2.1. Untersuchte Produkte

Im Jahre 2012 gingen mit den rezyklierten Elektronikprodukten etwa 104 kg Indium verloren (Tabelle 1).

Tabelle 1: Indiummenge in verkauften, genutzten und entsorgten Elektronik-Produkten

Produkt	Indium Menge in verkauften Produkten 2009	Indium Menge in Produkten im Gebrauch 2009	Indium Menge in der Entsorgung 2012
	kg In/Jahr	kg In	kg In/Jahr
Flachbild PC-Monitor	58	339	39
Flachbild TV	250	612	17
Laptop	63	197	17
Desktop PC	25	141	13
Großer Multifunktionsdrucker	73	n.b.	7
Navigationsgerät	10	31	n.b.
Übrige	13	29	7
Mobiltelefon/Smartphone	19	65	4
<b>Summe</b>	<b>510</b>	<b>1.414</b>	<b>104</b>
In-Anteile	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%
Anteil in Displays	65	73	61
Anteil in Leiterplatten	35	27	39

Quelle: Thiebaut, E.: Dynamische Modellierung von Indium und Neodym in Elektronikschrott. Projekte-Recmet – Recycling kritischer Metalle im Elektronikschrott. Arbeitsbericht 1.2. Entwurf, 24.04.14

Indium kommt sowohl in den Displays (etwa 61 Prozent), als auch in den Leiterplatten (etwa 39 Prozent) vor (Tabelle 1). Von der Indiummenge in der Entsorgung befanden sich rund 73 kg (70 Prozent) in den Flachbild TV Geräten, den PC Monitoren und den Laptops und davon etwa 45 kg in den Displays.

Für die Verarbeitungsversuche von indiumhaltigen Geräte wurden im Rahmen des Projektes e-Recmet die drei Gerätekategorien gemäß Tabelle 2 untersucht.

Tabelle 2: Entsorgte Mengen an Flachbild TV-Geräten, PC Monitoren und Laptops bei Swico im Jahr 2013

Produkt	Anzahl 2013	Gewicht pro Gerät	entsorgte Menge 2013
	Stück	kg	t
PC-Monitore, LCD	464.000	5,8	2.679
LCD-Fernseher	139.000	16	2.180
Notebooks	370.000	3,3	1.219
<b>Summe</b>	<b>973.000</b>		<b>6.078</b>

Quelle: Thiebaut, E.: Dynamische Modellierung von Indium und Neodym in Elektronikschrott. Projekt e-Recmet – Recycling kritischer Metalle im Elektronikschrott. Arbeitsbericht 1.2. Entwurf 24.04.14

Flachbildschirme können manuell demontiert oder mechanisch verarbeitet werden. Ziel der Verarbeitung sind die Entfernung der quecksilberhaltigen Hintergrundbeleuchtung sowie die Verwertung von Metallen und Kunststoffen.

Die manuelle Demontage erfolgt in Zerlegebetrieben, welche im Auftrag der Recyclingunternehmen manuelle Zerlegertätigkeiten durchführen. In diesen Prozessen werden Metall- und Kunststofffraktionen sowie Leiterplatten als wertbringende Fraktionen erzeugt. Die entnommenen quecksilberhaltigen Leuchtstoffröhren werden in der Leuchtmittelverarbeitung entsorgt.

Bei der mechanischen Verarbeitung werden die ganzen Flachbildschirmgeräte in einem mit Unterdruck betriebenen Prozess verarbeitet. Dadurch kann das Quecksilber über die Abluftreinigung, resp. die Feinfraktion weitgehend abgeschieden werden. Als Verarbeitungsprodukte resultieren Kunststoff-Metallgemische unterschiedlicher Körnung, eine Eisenfraktion sowie Rückstände aus der Abluftreinigung.

Aktuell wird in der Schweiz aufgrund der hohen Preise der mechanischen Verarbeitung und der besseren Wertstoffqualität bei der manuellen Zerlegung praktisch die gesamte Menge an Flachbildschirmen manuell zerlegt. Bei den Laptops erfolgt teilweise eine manuelle Abtrennung des Bildschirmteils. Dieser wird entweder manuell zerlegt oder gelangt in eine thermische Verwertung, während der Rechner-/Tastaturteil mechanisch verarbeitet wird.

## 2.2. Bestimmung der Indiumgehalte

Bei der chemischen Analyse der Indiumgehalte von LCD Panels (im Falle der manuellen Zerlegung) 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  $-197\text{ °C}$  vorgekühlt und anschließend drei Minuten bei  $-197\text{ °C}$  und einer Frequenz von 25 Schwingungen/s in einer Kryomühle gemahlen.

Bei den gemischten Fraktionen aus der mechanischen Verarbeitung von LCD Panels wurde zuerst nicht mahlbares Material (Siebrest) von Hand entfernt. Das restliche Material wurde dem Mahlverfahren in einer Ultrazentrifugalmühle mit Flüssig- $\text{N}_2$  bei 18.000 Umdrehungen/Minute unterzogen. Die Proben wurden manuell im Becherglas bei  $-197\text{ °C}$  während zwei Minuten vorgekühlt. Der 1. Mahldurchgang erfolgte mit einem Sieb mit Maschengröße  $< 1,5\text{ mm}$ , während im 2. Mahldurchgang mit einem Sieb mit Maschengröße  $< 0,5\text{ mm}$  gearbeitet wurde.

In beiden Fällen wurden etwa 0,2 g der gemahlten Proben in ein 70 ml Quarzgefäß eingewogen, mit 5 ml  $\text{HNO}_3$  65 Prozent p.a. versetzt und im Hochdruckverascher (Paar HPA-S) bei  $240\text{ °C}$  und 135 bar Druck 1 Stunde aufgeschlossen. Anschließend wurden die Lösungen abgekühlt und in einen 50 ml Messkolben überführt.

Die Quantifizierung der zuvor membranfiltrierten ( $0,45\text{ }\mu\text{m}$ ) Lösungen erfolgte beim HPA-Aufschluss mittels Plasma-Emissionsspektrometrie (ICP-OES). Als Qualitätssicherung dienten Blindlösungen und zertifizierte Standardreferenzmaterialien.

## 2.3. Manuelle Zerlegung

### 2.3.1. Zerlegeschritte und Komponenten

In einem Versuch wurden in einem Zerlegebetrieb je 20 TV Bildschirmen mit großer (> 40“), mittlerer (30 bis 39“) und kleiner Bildschirmdiagonale (< 29“), 20 PC Monitore sowie 20 Laptops zerlegt. Dabei wurden die Zerlegezeiten und die Gewichte der Komponenten bestimmt (Bild 1 und 2 und Kap. 2.3.2.).

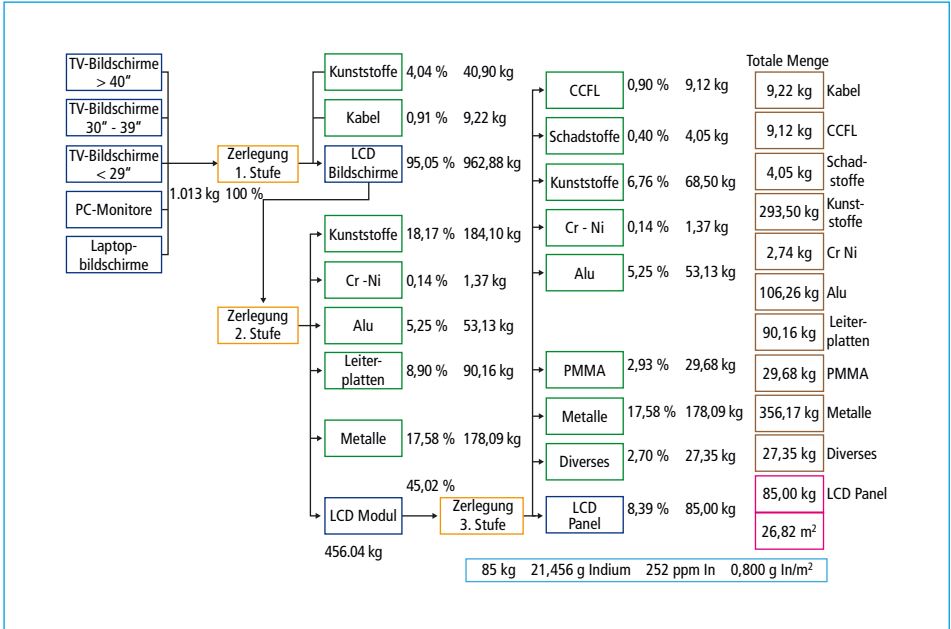


Bild 1: Zerlegeschritte und Komponenten aus der manuellen Zerlegung von Flachbildschirmen



Bild 2 a: Manuelle Zerlegung von Flachbildschirmen (links: LCD Modul; rechts: LCD Panel)

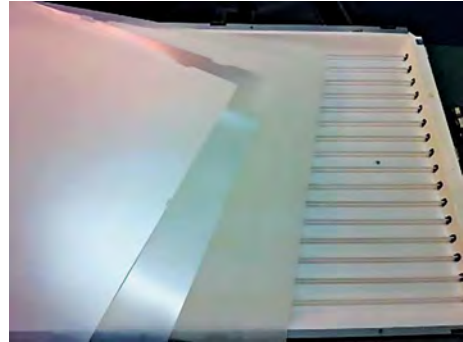


Bild 2 b: Manuelle Zerlegung von Flachbildschirmen (links: Folien und Hintergrundbeleuchtung PC Monitor; rechts: Hintergrundbeleuchtung bei einem TV Flachbildschirm)

### 2.3.2. Zerlegezeiten

Die totalen 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 3).

Tabelle 3: Zerlegezeiten und Zerlegeleistung bei der manuellen Demontage

Gerät	Fläche	Gewicht			Zerlegezeit				Zerlegeleistung
		Gerät	LCD Modul	LCD Panel	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Summe	
	m <sup>2</sup>	kg	kg	kg	min	min	min	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 <sup>1</sup>	0,08	0,8	0,4	0,2	0,0	5,0	4,6	9,6	5

<sup>1</sup> nur Bildschirm, ohne Recheneinheit

### 2.3.3. Gewichte und Indiumgehalte

Die aufgrund der chemischen Analyse bestimmten Indiumgehalte betragen 155 bis 242 ppm, resp. 613 bis 931 mg/m<sup>2</sup> (Tabelle 4).

Als Basiswert für die weiteren Untersuchungen wird von 800 mg In/m<sup>2</sup> ausgegangen. Anhand der Fläche kann die Indiummenge, welche in den LCD-Panels vorhanden sind, abgeschätzt werden. Insgesamt betrug die Fläche der manuell demontierten Flachbildschirmgeräte 26,82 m<sup>2</sup>, was 21,456 g Indium entspricht. Dieses Indium befindet sich in insgesamt 85 kg LCD Panels (Bild 1).

Tabelle 4: Indiumgehalte von LCD-Panels

Probe	je 10 Panels	Gewicht total	Fläche total	Indium in Probe	
				kg	m <sup>2</sup>
TV groß	38 bis 43"	18,0	4,55	155 +/- 1	613 +/- 4
TV mittel	27 bis 32"	9,6	2,37	223 +/- 7	902 +/- 27
TV klein	20 bis 22"	5,2	1,27	227 +/- 7	931 +/- 28
PC Monitor	17 bis 19"	4,3	1,07	192 +/- 1	772 +/- 2
Laptop	< bis 14"	2,4	0,66	242 +/- 2	900 +/- 9

+/- absolute Standardabweichung s aus n=3

## 2.4. Mechanische Vorbehandlung

### 2.4.1. Zerlegeschritte und Fraktionen

In einer Anlage zur mechanischen Verarbeitung von Flachbildschirmen wurden 508 PC-Monitore (15 bis 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. Magnetische Metalle werden über einem Magnetabscheider abgeschieden. Die mit Staub und Quecksilber belastete Prozessabluft wird über zwei Zyklonfilter und einen Aktivkohlefilter geführt. Insgesamt entstehen bei diesem Prozess neun Fraktionen (magnetische Metalle, Siebstufen 1-5, Zyklon 1 und 2, Aktivkohlefilter).



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

Bei der Verarbeitung wurden die Gewichte bestimmt und die Bildschirmflächen gemessen, um eine Abschätzung vornehmen zu können, wieviel Indium auf die Anlage gelangte (Bild 3 und 4).

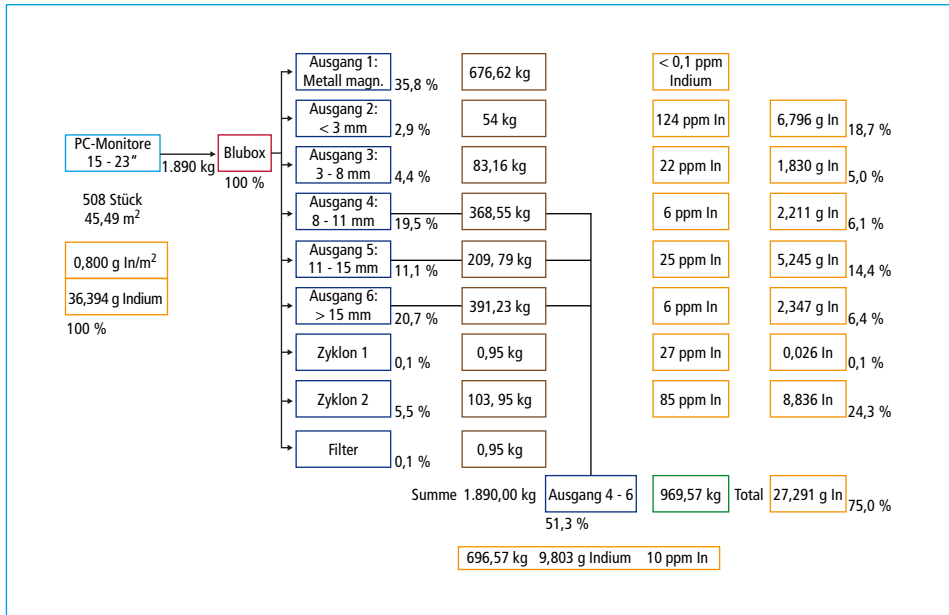


Bild 4: Fraktionen und Indiumgehalte aus der mechanischen Verarbeitung

### 2.4.2. Gewichte und Indiumgehalte

Tabelle 5 zeigt die aus der mechanischen Verarbeitung resultierenden Fraktionen. Mit Ausnahme der magnetischen Fraktion wurden bei allen die Indiumgehalte bestimmt.

Tabelle 5: 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	< 3	54,81	2,9	6.796	124	17,6
Ausgang 3	3 bis 8	83,16	4,4	1.830	22	4,7
Ausgang 4	8 bis 11	368,55	19,5	2.211	6	5,7
Ausgang 5	11 bis 15	207,79	11,1	5.245	25	13,6
Ausgang 6	> 15	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			



Für eine Indiumrückgewinnung würde gemäß Angaben des Anlagebetreibers vermutlich das Material aus den Ausgängen 4 bis 6 weiterverarbeitet. Geht man von 45,49 m<sup>2</sup> Bildschirmfläche mit 800 mg In/m<sup>2</sup> aus, beträgt die Inputmenge in die mechanische Verarbeitung etwa 36,394 g Indium. Die Indiummenge im Output der Fraktionen 4 bis 6 entspricht 9,80 g und damit rund 27 Prozent der Indiumfracht, welche auf die Anlage gelangte (Bild 4). Diese Indiummenge ist in 969 kg Material verteilt, d.h. in 51,3 Prozent der Inputmenge an LCD Geräten, was einem Massengehalt von 10 ppm entspricht.

## 2.5. Effizienzvergleich

Um die zwei Versuche vergleichbar zu machen, wurde die verarbeitete Bildschirmfläche der mechanischen Vorbehandlung auf diejenige der manuellen Demontage reduziert. Da in beiden Fällen die Indiummenge mit 800 mg/m<sup>2</sup> angenommen wurde, sind in beiden Prozessketten die gleichen Indiumausgangsmengen enthalten (Tabelle 6). Die Daten aus der Vorbehandlung stammen aus den vorstehenden Versuchen, während für die Weiterverarbeitung (Zwischen- und Endbehandlung) auf Daten aus dem r<sup>3</sup>-Projekt InAccess zurückgegriffen wurde [2, 3].

Tabelle 6: Gesamteffizienz der Prozessketten

	manuell	mechanisch	Bemerkung
<b>Vorbehandlung</b>			
• 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 bis 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	
<b>Zwischen- und Endbehandlung<sup>1</sup></b>			
• Angereicherte Fraktion	63,7 kg	261,9 kg	Trenntechnik/Hammermühle/Siebung
• Indiummenge	19,72 g	2,47 g	nach mechanischer Zwischenbehandlung
• Indium Massenanteil	309 ppm	9 ppm	nach mechanischer Zwischenbehandlung
• Bedarf H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> in schwefelsaurer Laugung	318,75 l	1.309 l	flüssig/fest = 5/1
• Zurückgewonnene Indiummenge	15,97 g	2,00 g	
<b>Gesamteffizienz</b>	<b>74 %</b>	<b>9 %</b>	<b>Anteil zurückgewonnenes Indium</b>

<sup>1</sup> Daten abgeschätzt gemäß:

Rasenack, K. Goldmann, T.: Herausforderungen des Indium-Recyclings aus LCD-Bildschirmen und Lösungsansätze. In: Thomé-Kozmiensky, K.-J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 7, Nietwerder: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014. S. 205-215

Fröhlich, K.; Rasenack, K.; r<sup>3</sup> Verbundprojekt InAccess. URBAN MINING Kongress & r<sup>3</sup> Statusseminar, Strategische Metalle. Innovative Ressourcentechnologien 11./12.06.2014, Messe Essen

Die Indiumausbeute ist bei der manuellen Demontage mit 74 Prozent rund 8-mal höher als bei einer mechanischen Vorbehandlung. Einerseits wird mit den Fraktionen 4 bis 6 nicht die gesamte Indiummenge aus allen Fraktionen *mitgenommen*, andererseits 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 Indiumrückgewinnung die manuelle Demontage deutliche Vorteile zeigt. Da diese gegenüber der mechanischen Verarbeitung aber deutlich tiefere Verarbeitungsleistungen aufweist, geht die Tendenz Richtung halbautomatische Vorbehandlung. Dabei können die arbeitsintensiven Zerlegearbeiten vermieden oder zumindest deutlich reduziert werden.

## 2.6. Kosten

Bei den Zerlegebetrieben handelt es sich meist um soziale Institutionen, welche nach Gewicht der zerlegten Geräte vergütet werden (etwa 200<sup>1</sup> EUR pro Tonne). Geht man von einer durchschnittlichen Zerlegeleistung von 30,5 kg/h aus (Mittelwert aus den Zerlegeversuchen über alle Gerätekategorien), ergeben sich daraus Vergütungskosten von etwa 6,40 EUR/h. Bei einem kommerziellen Recyclingbetrieb muss ein Kostenansatz von 40 EUR/h veranschlagt werden. Nimmt man eine doppelte Zerlegeleistung an, resultieren daraus 656 EUR/t.

Tabelle 7: Kosten der manuellen Vorbehandlung von Flachbildschirmen

	Gewicht	Ertrag	Zerlegebetrieb	Recycler	Bemerkungen
	kg	EUR/kg	EUR/t	EUR/t	
<b>Zerlegekosten</b>			<b>200,00</b>	<b>656,60</b>	
<b>Materialerlöse</b>			<b>-449,49</b>	<b>-449,49</b>	
• Kabel	9,22	-1,04	-9,86	-9,86	
• CCFL	9,12	0,16	1,50	1,50	Leuchtmittelrecycling
• Schadstoffe	4,05	0,16	0,67	0,67	
• Kunststoffe	293,50	-0,10	-30,30	-30,30	
• Cr-Ni	2,74	-0,68	-1,91	-1,91	
• Alu	106,25	-0,68	-74,34	-74,34	
• Leiterplatten	90,16	-2,40	-222,61	-222,61	
• PMMA	29,68	-0,55	-16,79	-16,79	
• Metalle	356,17	-0,30	-109,93	-109,93	
• LCD Panel	85,00	0,16	13,99	13,99	Verbrennung KVA
<b>Summe (gerundet)</b>	<b>986</b>		<b>-250</b>	<b>207</b>	

<sup>1</sup> Kurs 1 CHF = 1.25 EUR (Dez. 2014)

Unter Berücksichtigung der zu erwartenden Materialerlöse resultieren im Falle der Zerlegung durch einen Sozialbetrieb rund 250 EUR/t Nettoerlös, während bei einer Zerlegung in einem Recyclingbetrieb 207 EUR/t Nettokosten zu veranschlagen sind (Tabelle 7).

Die Kosten der mechanischen Vorbehandlung wurden im Rahmen dieses Projektes mit 200 EUR/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 8 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 Indiumrückgewinnung geschieht) bei der manuellen Zerlegung mit etwa 8 EUR/t und bei der mechanischen Verarbeitung mit 198 EUR/t zu Buche schlägt.

Reduziert man die Kosten auf die einzelnen Geräte resultieren bei manueller Demontage maximal 0,19 EUR, während bei der mechanischen Verarbeitung diese Kosten im Maximum 38 EUR betragen. Damit zeigt sich deutlich, dass die Art der Vorbehandlung auf die Gesamtkosten einen weit höheren Effekt hat, als die Zwischen- und Endbehandlung.

Tabelle 8: Gesamtkosten der Rückgewinnung von Indium aus Flachbildschirmen

	Kosten	Manuelle Demontage	Mechanische Vorbehandlung	Annahmen
	EUR/t			
(1) Vorbehandlung		207	200	
(2) Zwischenbehandlung		1,68	47,31	
(3) Endbehandlung		11,75	151,96	
(4) Ertrag Indium	600 Euro/kg	-5,68	-0,75	Annahme: 60 % des Indiums wird vergütet
<b>Indiumrückgewinnung (2)+(3)+(4)</b>		<b>7,75</b>	<b>198,52</b>	
Summe (1-4) gerundet	pro t Bildschirme	215	399	
	pro t Panel/pro t Fraktion 4-6, exkl. (1)	102	347	8,4 %/ 58,6 % vom Eingangsgewicht
	pro kg Indium, exkl. (1)	547	110.760	15,77 g In/2,00 g In zurückgewonnen
	pro LCD TV, exkl. (1)	0,19	38	0,40 m <sup>2</sup> 0,320 g In
	pro PC Monitor, exkl. (1)	0,06	12	0,13 m <sup>2</sup> 0,104 g In
	pro Laptop, exkl. (1)	0,04	8	0,08 m <sup>2</sup> 0,064 g In

\*Faktor 3 wegen höherem Chemikalienbedarf

## 3. Manuelle und mechanische Vorbehandlung neodymhaltiger Produkte

### 3.1. Untersuchte Produkte

Im Jahre 2012 waren in den von Swico rezyklierten Elektronikprodukten insgesamt rund 6.800 kg Neodym enthalten. Davon entfielen rund 3.300 kg bzw. knapp 50 Prozent auf Desktop-PCs und Laptops, weitere rund 2.700 kg bzw. knapp 40 Prozent stammen aus Lautsprechern (Tabelle 9, vgl. auch [7]). 82 Prozent des Neodyms befinden sich in Magneten, 18 Prozent in den Leiterplatten. Der Fokus des Projektes e-Recmet liegt auf Magneten.

Tabelle 9: Neodymmenge in verkauften, genutzten und entsorgten Elektronik-Produkten

Produkt	Neodymmenge in verkauften Produkten 2009	Neodymmenge in Produkten im Gebrauch 2009	Neodymmenge in der Entsorgung 2012
	kg Nd/Jahr	kg Nd	kg Nd/Jahr
Lautsprecher	1.276	14.591	2.682
Desktop	3.713	20.913	1.986
Laptop	4.787	15.059	1.306
Multifunktionsdrucker	2.251	n.b.	230
Flachbild PC-Monitor	273	1.604	183
Flachbild TV	1.343	3.408	96
Mobiltelefon/Smartphone	366	999	52
Kopfhörer	318	1.016	0,14
Übrige	342	1.303	353
<b>Total</b>	<b>14.668</b>	<b>58.894</b>	<b>6.825</b>
<b>Nd-Anteile</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
Anteil in Magneten	63	82	82
Anteil in Leiterplatten	36	18	18

Quelle: Thiebaut, E.: Dynamische Modellierung von Indium und Neodym in Elektronikschrott. Projekt e-Recmet – Recycling kritischer Metalle im Elektronikschrott. Arbeitsbericht 1.2. Entwurf 24.04.14

## 3.2. Manuelle Zerlegung

### 3.2.1. Zerlegeschritte

Die Zerlegung der Geräte erfolgte gemäß den Bildern 5 bis 7.

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.

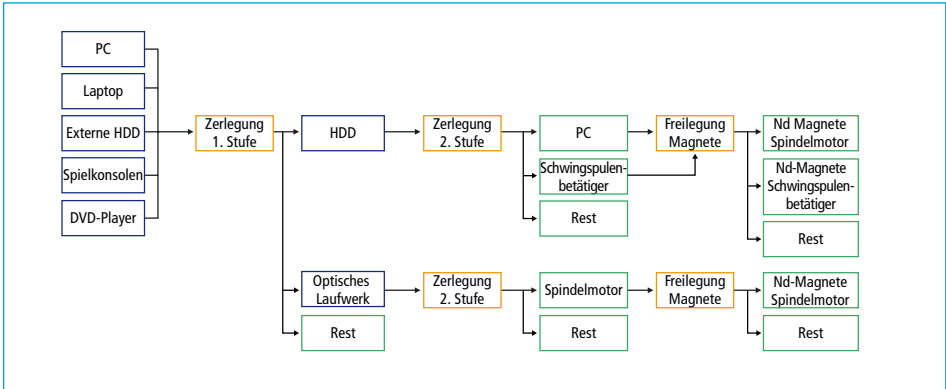


Bild 5: Zerlegeschritte beim Ausbau von Magneten aus Laufwerken

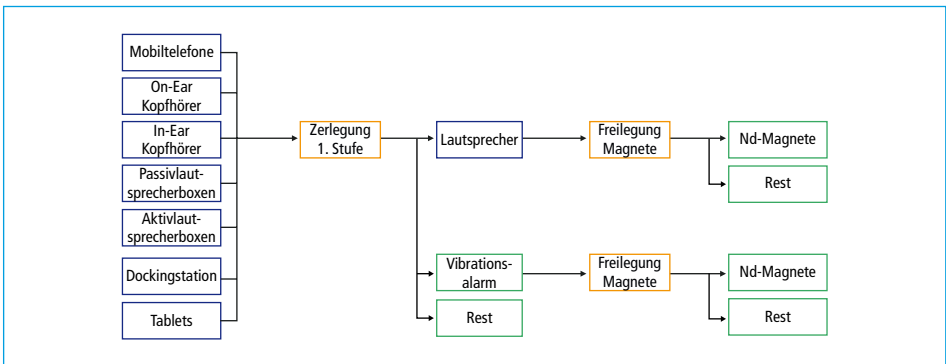


Bild 6: Zerlegeschritte beim Ausbau von Magneten aus Mobiltelefonen, Kopfhörern, Lautsprecherboxen, Dockingstationen und Tablets



Bild 7: Ausgangsmaterial (oben links: Laptops; oben mittig: Desktop-PC; oben rechts: Lautsprecherboxen; unten links: Mobiltelefone, unten mittig: Spielkonsolen; unten rechts: Kopfhörer)

### 3.2.2. Zerlegezeiten

In Tabelle 10 sind der durchschnittliche, der maximale und der minimale Zeitaufwand für den Ausbau der Zielkomponenten zusammengestellt.

Tabelle 10: Gemessene Zeiten für den Ausbau der Zielkomponenten aus Elektronikgeräten

Gerät	Anzahl	Zielkomponente 1	Anzahl	$t_{g \text{ min}}$	$t_{\text{max min}}$	$t_{\text{min min}}$	Zielkomponente 2	$t_{g \text{ min}}$	$t_{\text{max min}}$	$t_{\text{min min}}$
Desktop-PC	9	Festplattenlaufwerk	7				Schwingspulenmagnete, Spindelmotor			7 <sup>1)</sup>
		optisches Laufwerk groß	10				Spindelmotor			11 <sup>1)</sup>
		optisches Laufwerk klein					Spindelmotor			3 <sup>1)</sup>
Laptop	8	Lautsprecher	15	23,1	30	14	Lautsprecher ohne Gehäuse	2,0	3	1
Laptop ohne Bildschirm und Lautsprecher	10	Festplattenlaufwerk	4				Schwingspulenmagnete, Spindelmotor			9 <sup>1)</sup>
		optisches Laufwerk	9				Spindelmotor			3 <sup>1)</sup>
Passivlautsprecher	19	Lautsprecher (Hochtöner)	20	4	10	1				
Aktivlautsprecher	29	Lautsprecher	29	2,8	7	1				
In-Ear Kopfhörer	24	Lautsprecher mit Gehäuse	42	2,5	4	2	Lautsprecher ohne Gehäuse	3,1	4	2
On-Ear Kopfhörer	22	Lautsprecher mit Gehäuse	44	4,8	12	2	Lautsprecher ohne Gehäuse	4,3	8	2
Handy	50	Lautsprecher mit Gehäuse	55	5,5	10	2	Lautsprecher ohne Gehäuse	2,5	6	1
Handy ohne Lautsprecher	44	Vibrationsalarm	44	5,2	10	1				
Smartphone	10	Lautsprecher	11	9,4	12	7	Lautsprecher ohne Gehäuse	3,1	5	1
Smartphone	9	Vibrationsalarm	9	9,7	10	7				

<sup>1)</sup> Ergebnis aus einer Messung

Tabelle 11 zeigt die Anzahl der Zielkomponenten (Lautsprecher, Schwingspulenbetätigter, Spindelmotor, Vibrationsalarm) sowie den Zeitaufwand für die Freilegung der Magnete.

In Bild 8 ist der gesamte Zeitaufwand für den Ausbau der Zielkomponenten und die Freilegung der Magnete pro Gerät dargestellt. Der Zeitaufwand für den Ausbau der Zielkomponenten Festplattenlaufwerk, optische Laufwerke und Lautsprecher wurde nicht berücksichtigt. Wie aus Bild 8 hervorgeht, ist der Zeitaufwand am höchsten für Magneten aus Lautsprechern von Smartphones, Aktiv- und Passivlautsprecherboxen sowie Vibrationsalarme aus Smartphones, am kleinsten für die Magneten aus optischen Laufwerken und Lautsprechern in Laptops.

Tabelle 11: Anzahl und Massen der Zielkomponenten, Massen der ausgebauten Magnete sowie durchschnittlicher, maximaler und minimaler Zeitaufwand für die Freilegung der Magneten

Bauteil	Anzahl	Zielkomponenten	Gewicht Zielkomponente	Gewicht Magnet	$t_0$	$t_{max}$	$t_{min}$
			g		s		
Festplattenlaufwerk Desktop-PC	7	2 Spindelmotoren, 7 Schwingspulenbetätiger	321.4	72	117	252	35
Festplattenlaufwerk Laptop	4	5 Spindelmotoren, 4 Schwingspulenbetätiger	94	19.9	99	324	20
optisches Laufwerk Desktop-PC	10	Spindelmotoren	223.6	46	139	295	45
optisches Laufwerk Laptop	9	Spindelmotoren	189.5	13.8	169	351	67
Passivlautsprecher <sup>1)</sup>	20	freigelegte Magnete	3330	951.2	576	1620	120
Aktivlautsprecher <sup>1)</sup>	29	freigelegte Magnete	4800	1194.5	762	2700	120
In-Ear Kopfhörer	53	Lautsprecher	79.6	16.7	103	308	20
On-Ear Kopfhörer	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

<sup>1)</sup> Zeitaufwand wurde in Minuten gemessen

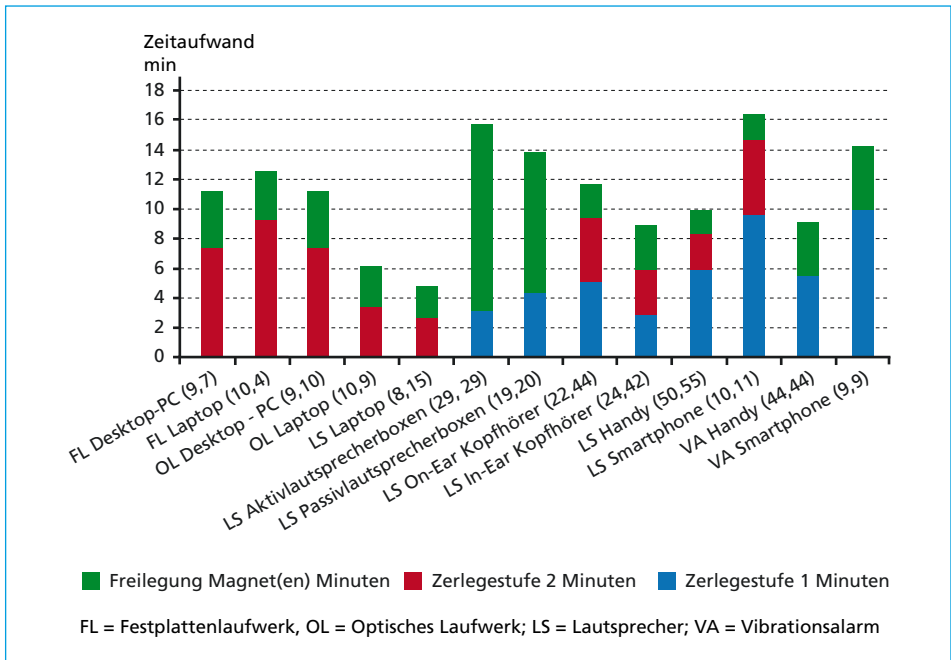


Bild 8: Zeitaufwand für die Freilegung der Magneten pro zerlegtes Gerät; in Klammern: Anzahl zerlegte Geräte, Anzahl Zielkomponenten

In Bild 9 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 in Bild 8 nicht berücksichtigt. Wie aus Bild 9 hervorgeht, ist der gesamte Zeitaufwand für die Freilegung eines Gramms Magnet bei weitem am höchsten für Vibrationsalarme in Smartphones, gefolgt von Vibrationsalarmen in Handys, Lautsprechern in Smartphones und Lautsprechern in Handys.

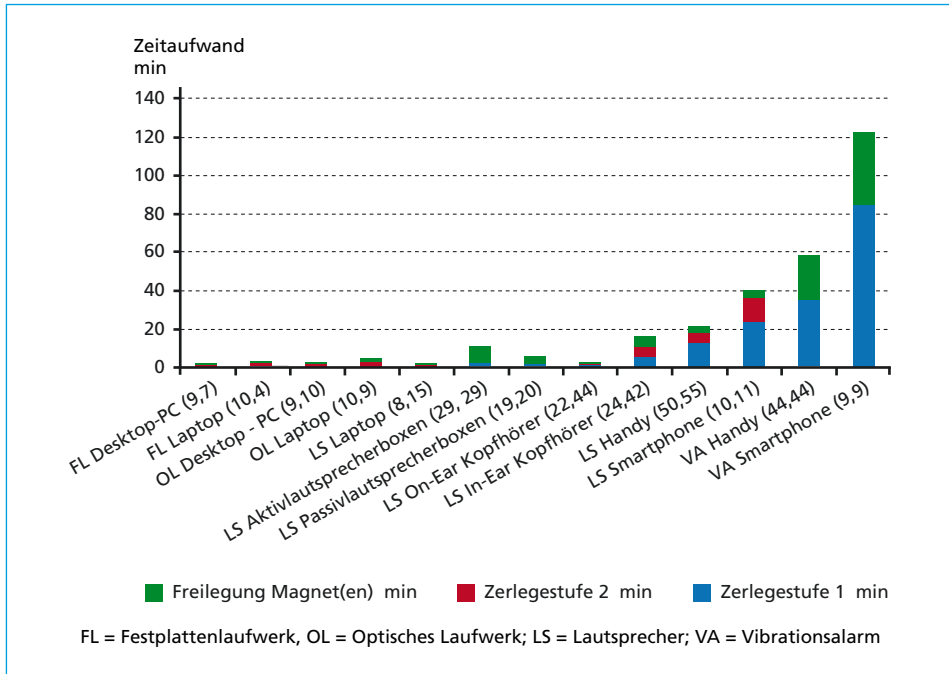


Bild 9: Zeitaufwand für die Freilegung der Magnete pro g freigelegte Magnete; in Klammern: Anzahl zerlegte Geräte, Anzahl Zielkomponenten

### 3.2.3. Neodymgehalte

Vor der chemischen Analyse wurden die Magnete 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 (Neodymmagnete 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 Röntgenfluoreszenzspektrometer zum Einsatz. Die Bestimmungsgrenze für Nd lag bei < 0,05 Prozent.

Diejenigen Proben, bei denen in der orientierenden chemischen Analyse Neodym gefunden werden konnte, wurden einer quantitative Analysen unterzogen. Bei Magneten des Typs  $Nd_2Fe_{14}B$  wurden dazu etwa 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  $\mu m$ ) 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  $SrFe_{12}O_{19}$  bzw.  $(Sr+Ba)Fe_{12}O_{19}$  wurden etwa 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 50 mL Messkolben überführt. Die Quantifizierung der zuvor membranfiltrierten (0,45  $\mu m$ ) 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. Es konnte kein Nd festgestellt werden (<0,05%).

Tabelle 12: Ergebnisse der orientierenden sowie quantitativen chemischen Analysen

Bauteil	Magnettyp	Orientierende chemische Analyse		Quantitative chemische Analyse
		grosse Anteile	geringe Anteile	g Nd/100 g (%)
FL Desktop-PC	$Nd_2Fe_{14}B$	Fe, Nd, Pr, Ni		21,1 ± 1,1
Festplattenlaufwerk, Laptop	$Nd_2Fe_{14}B$	Fe, Nd, Pr, Ni		22,0 ± 2,2
optisches Laufwerk, Desktop-PC	$Nd_2Fe_{14}B$	Fe, Sr	Ba, Nd	8,2 ± 0,4
optisches Laufwerk, Laptop	$Nd_2Fe_{14}B$	Fe, Nd, Pr	Ni	20,2 ± 1,0
Passivlautsprecherboxen	$SrFe_{12}O_{19}$ bzw. $(Sr+Ba)Fe_{12}O_{19}$	Fe, Sr, Ba		n.b.
Aktivlautsprecherboxen	$SrFe_{12}O_{19}$ 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
Lautsprecher, Laptop	$Nd_2Fe_{14}B$	Fe, Nd, Pr	Zn, Ni, Nb	25,3 ± 0,4
Lautsprecher, Handy	$Nd_2Fe_{14}B$	Fe, Nd, Pr, Zn, Cu, Ni	Nb	18,9 ± 1,6
Lautsprecher, Smartphone	$Nd_2Fe_{14}B$	Fe, Nd, Pr, Zn	Cu, Ni, Nb	17,4 ± 0,8
Vibrationsalarm, Handy	$Nd_2Fe_{14}B$	Fe, Nd, Pr, Cu, Ni	Zn, Nb, Zr	14,6 ± 0,4
Vibrationsalarm, Smartphone	$Nd_2Fe_{14}B$	Fe, Nd, Pr, Cu, Ni	Zn	17,4 ± 0,7

±: absolute Standardabweichung s aus n= 3 ; n.b: nicht bestimmt

Die Ergebnisse der chemischen Analysen sind in Tabelle 12 zusammengefasst. Wie daraus hervorgeht, lagen die Neodym-Massenanteile in den Magneten aus den Lautsprechern der Aktiv- und Passivlautsprecherboxen unterhalb der Bestimmungsgrenze von 0,05 Prozent für die orientierende chemische Analyse. Bei diesen Proben wurden deshalb keine quantitativen Bestimmungen durchgeführt.

Für alle anderen Magnetproben wurden Neodym-Massenanteile zwischen 2,8 Prozent (Lautsprecher aus On-Ear-Kopfhörern) und 25,3 Prozent (Lautsprecher aus Laptops) gefunden. Die Neodym-Massenanteile betragen 21,1 Prozent (Desktop-PC) und 22,0 Prozent (Laptop) in Festplattenmagneten, 8,2 Prozent (Desktop-PC) und 20,2 Prozent (Laptop) in optischen Laufwerken, zwischen 2,8 Prozent (On-Ear-Kopfhörer) und 25,3 Prozent (Laptop) in Lautsprechern, sowie 14,6 Prozent (Handy) und 17,4 Prozent (Smartphone) in Vibrationsalarnten.

Der Nachweis von Cu und Ni ist auf die Verwendung von Nickellegierungen (Ni-Cu-Ni) als gängigste Beschichtung von u.a. Neodym-Scheibenmagneten zurückzuführen. Im Falle der Magneten aus Festplattenlaufwerken, für die nur einige wenige Proben untersucht werden konnten, zeigt z.B. die gemessenen Neodym-Massenanteile vergleichsweise niedrig sind. Dies könnte mit darauf zurückzuführen sein, dass neben den Schwingspulenmagneten auch der Magnet aus dem Spindelmotor mituntersucht wurde.

Alle hier vorgestellten Resultate sind indikativ, da die Stichprobengröße nicht repräsentativ war.

### 3.3. Mechanische Vorbehandlung

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

### 3.4. Kosten

Tabelle 13 zeigt die Kosten für die manuelle Freilegung von Neodym-Magneten abgeschätzt. Die Zerlegekosten beruhen auf einem Stundensatz von 40 EUR/h. Der Preis für Nd Magneten aus EoL basiert auf [6] und wurde mit 12 EUR/kg angenommen.

## 4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Hinblick auf eine möglichst hohe Rückgewinnungsrate kritischer Metalle bestätigen die Untersuchungen zu Indium die zentrale Bedeutung einer auf die *Freilegung* der kritischen Metalle ausgerichteten Vorbehandlung. Da bei der mechanischen Verarbeitung das Indium mit anderen Stoffen vermischt und dadurch der Indiumgehalt in den Fraktionen stark verdünnt wird, resultieren einerseits Ausbeuteverluste und andererseits werden die Aufwendungen für die Rückgewinnung aufgrund der geringeren Indium

Tabelle 13: Kosten für die Freilegung von Magneten

	Zeitaufwand Freilegung <sup>1,2</sup>	Zerlegekosten	M <sub>0</sub> Magneten pro Gerät	Erlös pro Magnet	Verhältnis Erlös/Zerlegekosten
	min	EUR	g	EUR	
Festplattenlaufwerk, Desktop-PC	10,9	7,3	12,0	0,12	1:59
Festplattenlaufwerk, Laptop	12,3	8,2	5,0	0,06	1:137
optisches Laufwerk, Desktop-PC	10,3	6,9	6,6	0,08	1:87
optisches Laufwerk, Laptop	5,8	3,6	1,5	0,02	1:211
Passivlautsprecherboxen	13,6	9,1	2,7	0,03	1:278
Aktivlautsprecherboxen	15,5	10,3	1,5	0,02	1:578
On-Ear Kopfhörer	11,4	7,6	5,8	0,07	1:109
In-Ear Kopfhörer	8,6	5,8	0,6	0,01	1:867
Lautsprecher, Laptop	4,4	2,9	3,7	0,04	1:65
Lautsprecher, Handy	9,7	6,4	0,5	0,01	1:1141
Lautsprecher Smartphone	16,1	10,7	0,4	0,00	1:2187
Vibrationsalarm, Handy	8,8	5,8	0,2	0,00	1:3200
Vibrationsalarm, Smartphone	14,0	9,4	0,1	0,00	1:6771

<sup>1</sup> Zeit für den Ausbau von Festplattenlaufwerken und optischen Laufwerken nicht mitgerechnet

<sup>2</sup> Preis schwankt in Abhängigkeit vom Massenanteil Dysprosium

Konzentrationen deutlich erhöht. Die stoffliche Ausbeute liegt bei einer manuellen Zerlegung um etwa Faktor 8 höher. Ohne Berücksichtigung der Vorbehandlungsstufe, welche als Hauptzweck die Entfernung der quecksilberhaltigen Hintergrundbeleuchtungen hat, sind die Kosten der Rückgewinnung des Indiums bei der mechanischen Vorbehandlung damit um Größenordnungen höher. Die resultierenden Kosten der Indiumrückgewinnung aus einer manuellen Vorbehandlung erreichen kleiner 0,20 EUR/Gerät.

Bei den Versuchen zur Freilegung von neodymhaltigen Komponenten aus Elektronikgeräten zeigte es sich, dass der Zerlegeaufwand erheblich ist und sich dieser aufgrund der gegenwärtigen Preissituation beim Neodym nicht aus der Wertschöpfung finanzieren lässt. Allerdings besteht noch ein Optimierungspotential durch Erhöhung der manuellen Zerlegeeffizienz (das Zerlegepersonal hatte keine Erfahrung im Ausbau von Magneten) oder durch semi-automatische Vorbehandlung. Ein Vergleich mit einer direkten mechanischen Vorbehandlung war in diesem Fall nicht möglich, weil diese in einem erst von kurzem gestarteten Zusatzprojekt untersucht wird. Im Zentrum steht dabei die Frage, wie die stoffliche Ausbeute bei der mechanischen Vorbehandlung gegenüber einer manuellen Zerlegung abschneidet und wie hoch die Gesamtkosten ausfallen. Es ist denkbar, dass sich bei Neodym die mechanische Vorbehandlung gegenüber der manuellen Zerlegung aufgrund des hohen Arbeitsaufwandes als vorteilhaft erweist. Dies sofern die Entmagnetisierung kostengünstig durchgeführt und die Neodym-Ausbeute aus den mechanischen Prozessen genügend hoch ist.

Wie die Beispiele Indium und Neodym zeigen, wird in den meisten Fällen die Rückgewinnung von kritischen Metallen aus Elektro- und Elektronikgeräten Zusatzkosten verursachen, welche nicht durch den Wertstofftertrag allein gedeckt werden können. Nebst dem Vergleich der ökologischen Vor- oder Nachteile der Rückgewinnung von kritischen Metallen aus Produkten gegenüber der Primärgewinnung in Minen stellt sich deshalb als zentrale Frage, wie diese Zusatzkosten finanziert werden können. Abschätzungen für Indium zeigen, dass der Verkaufspreis der Produkte aufgrund der geringen Gehalte an kritischen Metallen nur unwesentlich erhöht werden müsste, um eine Indiumrückgewinnung zu finanzieren. Es stellt sich zwangsläufig die Frage, ob die Hersteller in ihrer Preisgestaltung in den Kosten für das Recycling nicht auch die Kosten für die Rückgewinnung kritischer Metalle berücksichtigen müssten.

Im Projekt e-Recmet wird der ökologische Nutzen der Indium- und Neodymrückgewinnung aus Elektronikgeräten mittels Ökobilanz abgeschätzt. Zudem wird die Mengen- und Kostenentwicklung mit einem systemdynamischen Modell untersucht. Auf der Basis der Resultate stellt sich für Hersteller und Rücknahmesysteme die Frage, wie ein Businessmodell aussehen könnte, welches die Rückgewinnung einiger kritischer Metalle berücksichtigt. Resultate zum Gesamtprojekt werden im Laufe von 2015 vorliegen.

## 5. Literatur

- [1] Erdmann, L.; Graedel, T.: The Criticality of Non-Fuel Minerals: A Review of Major Approaches and Analyses; *Environmental Science & Technology* 45, 2011, S. 7620-7630
- [2] Fröhlich, K.; Rasenack, K.: r<sup>3</sup> Verbundprojekt InAccess. Urban Mining Kongress & r<sup>3</sup> Statusseminar, Strategische Metalle. Innovative Ressourcentechnologien 11./12.06.2014, Messe Essen
- [3] Rasenack, K. Goldmann, T.: Herausforderungen des Indium-Recyclings aus LCD-Bildschirmen und Lösungsansätze. In: Thomé-Kozmiensky, K.-J.; Goldmann, D. (Hrsg.): *Recycling und Rohstoffe*, Band 7. Nietwerder: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014. S. 205-215
- [4] Reuter, M. A.; Hudson, C.; van Schaik, A.; Heiskanen, K.; Meskers, C.; Hagelüken, C. *Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International UNEP Resource Panel*. 2013
- [5] SENS, Swico, SLRS. Fachbericht 2014. 2014, S. 9-11
- [6] Sprecher, B.; Kleijn, R.; Karmer, J.: Recycling potential of Neodymium: The case of computer hard disk drives. *Environmental Science & Technology* 48, 2014, S. 9506-9513
- [7] Thiébaud, E.: Dynamische Modellierung von Indium und Neodym in Elektronikschrott. Projekt e-Recmet – Recycling kritischer Metalle im Elektronikschrott. Arbeitsbericht 1.2. Entwurf 24.04.14
- [8] U.S. Securities and Exchange Commission: SEC Adopts Rule for Disclosing Use of Conflict Minerals. 2012, [www.sec.gov/news/press/2012/2012-163.htm](http://www.sec.gov/news/press/2012/2012-163.htm)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann (Hrsg.):  
**Recycling und Rohstoffe – Band 8**

ISBN 978-3-944310-20-6 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky  
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2015  
Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,  
Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky  
Erfassung und Layout: Ginette Teske, Sandra Peters, Carolin Bienert, Janin Burbott,  
Max Müller, Cordula Müller  
Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk-sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.