

Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten

LANUV-Fachbericht 38



Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten

LANUV-Fachbericht 38

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Recklinghausen 2012

IMPRESSUM

Herausgeber: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW)
Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
Telefax 02361 305-3215
E-Mail: poststelle@lanuv.nrw.de

Der vorliegende Fachbericht ist der Abschlussbericht einer Studie, die vom
Öko-Institut Freiburg im Auftrag des LANUV NRW durchgeführt wurde.

Autoren: Matthias Buchert (m.buchert@oeko.de), Andreas Manhart, Daniel Bleher, Detlef Pingel
Öko-Institut e.V., Geschäftsstelle Freiburg,
Merzhauser Str. 173, 79100 Freiburg
Telefon 0761 452950, E-Mail: info@oeko.de



Redaktion: Klaus-Dieter Koß, Dr. Michael Oberdörfer (LANUV NRW)

Titelfoto: Hauptplatine eines Notebooks (Öko-Institut e.V.)

ISSN: 1864-3930 LANUV-Fachberichte

Informations-
dienste: Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und
Verbraucherschutz unter
• www.lanuv.nrw.de

Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im
• WDR-Videotext Tafeln 177 bis 179

Bereitschafts-
dienst: Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV NRW
(24-Std.-Dienst): Telefon 0201 714488

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur unter Quellenangaben und Überlassung von
Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet.
Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund und Zielstellung	5
2	Flachbildschirme	7
2.1	Indium	7
2.2	Seltene Erden	9
2.3	Edelmetalle	12
2.4	Zusammenfassung kritischer Metalle in Flachbildschirmen	13
2.5	Marktdaten Flachbildschirme	15
2.6	Lebensdauer und Erfassungsraten Flachbildschirme	19
2.7	Stand der Vorbehandlungstechnik für Flachbildschirme	20
2.8	Optimierungspotenziale in der Recyclingkette	21
3	Notebooks	23
3.1	Edelmetalle	24
3.2	Tantal	26
3.3	Indium	28
3.4	Seltene Erden	28
3.5	Kobalt	30
3.6	Zusammenfassung kritische Metalle in Notebooks	31
3.7	Marktdaten Notebooks	33
3.8	Lebensdauer und Erfassungsraten Notebooks	36
3.9	Stand der Vorbehandlungstechnik für Notebooks	36
3.10	Optimierungspotenziale in der Recyclingkette	38
4	Smartphones	40
4.1	Edelmetalle	41
4.2	Indium, Gallium, Tantal	41
4.3	Kobalt	41
4.4	Seltene Erden	41
4.5	Zusammenfassung kritischer Metalle in Smartphones	42
4.6	Marktdaten Smartphones	42
4.7	Erfassungsraten Smartphones	43
4.8	Stand der Recyclingtechnik für Smartphones	43
4.9	Optimierungspotenziale in der Recyclingkette	43
5	LED-Leuchten	44
5.1	Seltene Erden, Gallium und Indium	48
5.2	Zusammenfassung kritischer Metalle in LED-Leuchten	54
5.3	Marktdaten LED-Leuchten	55
5.4	Erfassungsraten LED-Leuchten	60
5.5	Stand der Recyclingtechnik für LED-Leuchten	60
5.6	Optimierungspotenziale in der Recyclingkette	60

6	Raffinerieprozesse für ressourcenrelevante Elektronikschrottfraktionen	61
6.1	Edelmetalle	61
6.2	Kobalt	63
6.3	Seltene Erden	64
6.4	Gallium, Indium	65
6.5	Tantal	66
7	Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen	67
	Literatur	76
	Abbildungsverzeichnis	81
	Tabellenverzeichnis	83

1 Hintergrund und Zielstellung

Vor dem Hintergrund der großen Bedeutung, die bestimmten Metallen und anderen Rohstoffen für viele Zukunftstechnologien zukommt, und der gleichzeitigen Knappheit dieser Ressourcen, wurde von der Europäischen Kommission eine Auswahl von vierzehn Rohstoffen als besonders bedeutend und kritisch eingestuft (EC 2010). Im Hinblick auf mögliche oder zu erwartende Schwierigkeiten bei der Versorgung mit diesen kritischen Rohstoffen spielt die Rückgewinnung der Rohstoffe aus Altprodukten eine umso wichtigere Rolle. An diesem Punkt setzt das Projekt „Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten“ an: für vier ausgewählte Elektronik-Geräte - Flachbildschirm, LED-Lampe, Notebook und Smartphone - soll eine Sachbilanz zum Vorkommen der kritischen Rohstoffe in diesen Produktgruppen erarbeitet und Recyclingoptionen für die Altgeräte zur Rückgewinnung der kritischen Rohstoffe entwickelt werden. Die Untersuchung des Öko-Instituts hat ergeben, dass für die vier betrachteten Produktgruppen von den 14 „kritischen“ Rohstoffen der EC-Studie die folgenden Metalle bzw. Metallgruppen eine hohe Relevanz aufweisen:

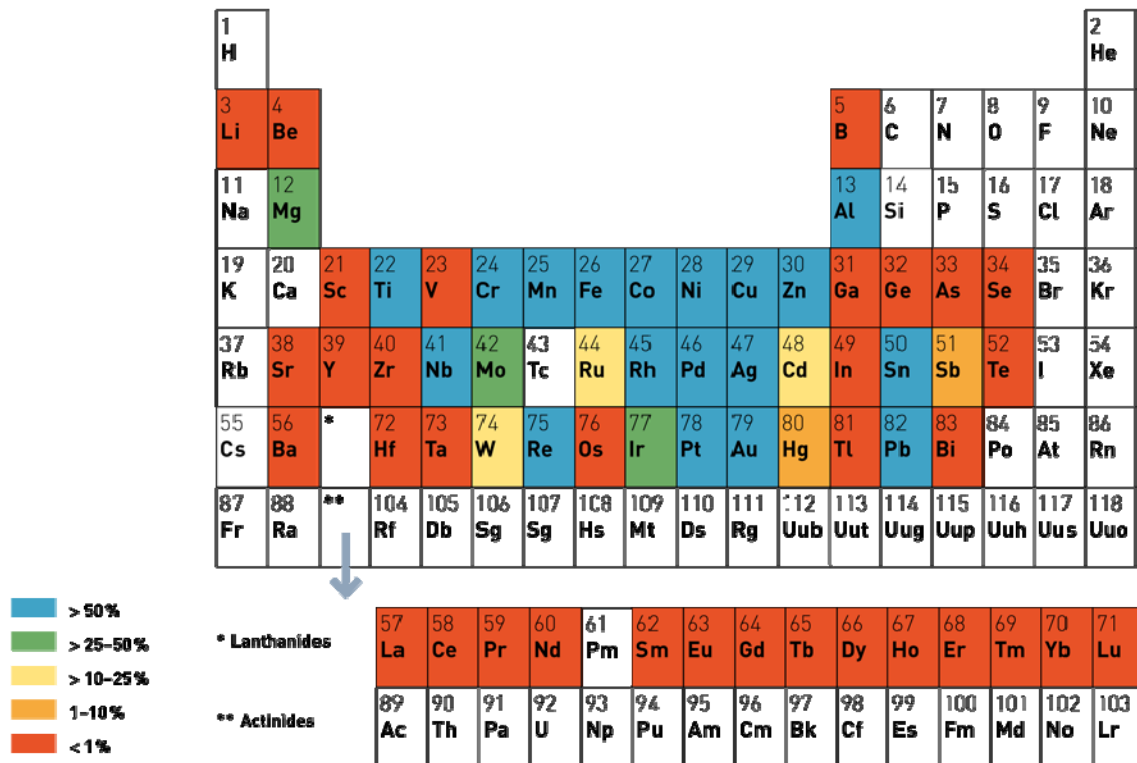
- Kobalt,
- Gallium,
- Germanium,
- Indium,
- Platingruppenmetalle,¹
- Seltene Erden,²
- Tantal.

In der nachfolgenden Abbildung sind in einer Gesamtübersicht die aktuellen End-of-Life Recyclingraten von 60 Metallen aufgeführt (Graedel et al. 2011). Diese Bandbreiten repräsentieren jedoch die globale Situation und umfassen alle Anwendungen der Metalle.

Viele der in dieser Arbeit untersuchten kritischen Metalle wie vor allem Seltene Erden (Lanthanide plus Scandium und Yttrium) sowie Tantal, Gallium und Indium weisen demnach globale End-of-Life Recyclingraten von unter 1% auf. Deutlich besser ist die Recycling-situation bei den Edelmetallen (Platin, Palladium, Gold, Silber) sowie Kobalt mit Raten über 50%. Für diese Metalle existieren bereits ausgereifte Recyclingverfahren und zumindest für einige Anwendungen (z.B. Industriekatalysatoren, Speziallegierungen) funktionierende Erfassungssysteme.

¹ Die Platingruppenmetalle umfassen die Elemente Platin, Palladium, Iridium, Rhodium, Ruthenium und Osmium.

² Die Seltenen Erden (häufig auch als Seltenerdmetalle benannt) umfassen die Elemente Yttrium, Scandium, und die sogenannten Lanthaniden (Lanthan, Cer, Praseodym, Neodym, Promethium, Samarium, Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium und Lutetium).

Abbildung 1 Globale End-of-Life Recyclingraten von 60 Metallen (Graedel et al. 2011)

In der Arbeit für das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen werden weiterhin die wichtigen Edelmetalle Gold und Silber zusätzlich in den Fokus genommen. Diese begehrten und wertvollen Metalle sind nur mit großem Aufwand aus den natürlichen Erzen zu gewinnen. Daher sind sie wichtige Treiber für Recyclingaktivitäten insbesondere im Bereich Elektronikprodukte. Vor allem Silber wird von vielen Experten – obgleich nicht in der Liste der 14 Rohstoffe der EC - als kritischer Rohstoff eingestuft (Buchert et al. 2011). Ziel der vorliegenden Untersuchung für das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen ist es, eine Potenzialanalyse für die kritischen Metalle hinsichtlich der untersuchten Produktgruppen zu erstellen und darauf aufbauend Defizite bei den Recyclinginfrastrukturen und -technologien zu identifizieren und für diesen Bereich erste Vorschläge und Handlungsempfehlungen für eine zukünftig optimierte Kreislaufwirtschaft in Nordrhein-Westfalen zu unterbreiten.

2 Flachbildschirme

Großformatige Flachbildschirme kommen im Wesentlichen im Bereich der TV-Geräte und der Computermonitore zum Einsatz. Weitere Einsatzbereiche beinhalten digitale Anzeigen, digitale Bilderrahmen, Tablet-PCs sowie bei kleineren Formaten Handys, Smartphones, E-Book-Reader und eine Vielzahl weiterer Geräte. In der folgenden Analyse wird insbesondere auf Flachbildschirme im TV- und Computerbereich eingegangen.

Insgesamt sind derzeit drei verschiedene Displaytechnologien im Einsatz:

Tabelle 1 Displaytechnologien und ihre Hauptanwendungsbereiche

Displaytechnologie	Hauptanwendungsbereiche	Hintergrundbeleuchtung
LCD (Liquid Crystal Display)	Desktop-PCs, Notebooks, TV-Geräte	Ja
PDP (Plasma Display Panel)	TV-Geräte	Nein
OLED (Organic Light Emitting Diode)	Handys, Notebooks	Nein

Hinsichtlich kritischer Rohstoffe sind vor allem folgende Gerätekomponten relevant:

- Display
- Hintergrundleuchten
- bestückte Leiterplatten

In den folgenden Kapiteln werden diese Komponenten detailliert hinsichtlich der Gehalte kritischer Ressourcen untersucht.

2.1 Indium

Indium wird in der Form von Indium-Zinn-Oxid (ITO) als Elektrodenmaterial in Flachbildschirmen verwendet. Dabei hat Indium-Zinn-Oxid die Vorteile, dass es durchsichtig, leitfähig und weitgehend hitzebeständig ist. Die in den Bildschirmen aufgetragenen ITO-Schichten bestehen zu 90% aus In_2O_3 und 10% SnO_2 , was einem Massenanteil von 78% Indium entspricht (Böni & Widmer 2011). Während in LCD-Displays zwei ITO-Lagen aufgebracht sind, weisen OLED-Displays nur eine Lage auf. Über Schichtdicke und Indium-Gehalte von Flachbildschirmen existieren verschiedene, teilweise stark voneinander abweichende Literaturangaben (siehe Tabelle 2). Bei LCD-Displays mit LED-Hintergrundbeleuchtung findet Indium außerdem als Bestandteil des LED-Halbleiterchips Verwendung, der im Wesentlichen aus Indiumgalliumnitrid besteht. Die dadurch zusätzlich anfallenden Mengen an Indium pro Display sind in Tabelle 8 angegeben. Sie liegen etwa eine Größenordnung unter den Masseanteilen an Indium, die durch die Verwendung von ITO als Elektrodenmaterial anfallen.

Tabelle 2 Literaturwerte zu Schichtdicke und Indium-Gehalt von LCD-Displays

	ISI 2009	Socolof et al. 2005	Martin 2009	Becker et al. 2003	Becker et al. 2003	Bogdanski 2009	Bogdanski 2009	Böni & Widmer 2011
mg ITO/ m ²	4.000	7.176	700	192	240	72	192	300
nm/layer	1.667	2.990	292	80	100	30	80	125
mg In/m ²	3.120	5.597	546	150	187	56	150	234

Quelle: Böni & Widmer 2011

Für den Recyclingstrom von Displays wurden von FEM & IUTA 2011 durchschnittliche Indium-Gehalte von 174g/t Displayschrott ermittelt. Bezieht man diesen Wert auf die einzelnen Bildschirmgeräte, so weist diese Näherungsrechnung auf Durchschnittsgehalte zwischen 464 und 864 mg/m² hin (siehe Tabelle 3), sodass im Folgenden von einem mittleren Wert von 700 mg/m² für LCD-Displays ausgegangen wird. Für Plasma-Bildschirme, die im TV-Bereich einen Marktanteil von knapp 10% erreichen, wird von einem vergleichbaren Wert ausgegangen.

Tabelle 3 Näherungsrechnung zu Indium-Gehalten in LCD-Displays

	Mittleres Displaygewicht [g]	Mittlerer In- Gehalt [g/t]	Mittlerer In- Gehalt pro Gerät [mg]	Mittlere Bildschirmfläche [cm ²]	Mittlerer In- Gehalt [mg/ m ²]
Notebook	250	174	43,5	552	788
LCD-Monitor	300		52,2	1126	464
LCD-Fernseher	1800		36,3	3626	864

Datenquellen: FEM & IUTA 2011, Displaybank 2011 (Größen der Displays)

Insgesamt können daher für die betrachteten Displaygeräte folgende mittlere Indium-Gehalte abgeschätzt werden:

Tabelle 4 Mittlere Indium-Gehalte verschiedener Displaygeräte

	Mittlere Bildschirmfläche [cm ²]	Mittlerer In-Gehalt pro Gerät [mg]
Notebook	552	39
Computer-Monitor	1.126	79
Fernseher	3.626	254

Diese Werte korrespondieren sehr gut mit herstellerbasierten Angaben bezüglich des Indium-Gehaltes von Notebookdisplays der Größe 15,4-Zoll (686cm²). Laut Daten von Prakash et al. (2011) beinhalten diese in etwa 0,5g Indium-Zinn-Oxid, was einem Indium-Gehalt von 0,39g entspricht.

2.2 Seltene Erden

Seltene Erden (auch als Seltenerdmetalle bezeichnet) werden in Leuchtstoffen von Bildschirmen eingesetzt. Je nach Displaytechnologie werden die Seltenen Erden entweder in den Displays selbst (PDP- und OLED-Technologie), oder der Hintergrundbeleuchtung (LCD-Technologie) eingesetzt. Die verfügbaren Daten zum Einsatz von Seltenen Erden sind in diesem Bereich sehr allgemein, da jedwede produktspezifische Informationen zu Mengen und Konzentrationen in der Regel Betriebsgeheimnissen unterliegen. Insgesamt können dennoch folgende Aussagen getroffen werden:

- Bei Leuchtstoffen kann in Trägermatrix und den eigentlichen Leuchtstoffen (Aktivatoren) unterschieden werden. Für die Trägermatrix kommen neben einigen Verbindungen ohne Seltene Erden v.a. Verbindungen mit Yttrium (Y_2O_3), Cer ($\text{CeMgAl}_{11}\text{O}_{19}$) und Lanthan (La_2O_3) zum Einsatz (Schüler et al. 2011). Daten des U.S. Department of Energy (US DoE 2010), Guarde et al. (2010) und Gambardella et al. (2010) zeigen, dass diese drei Metalle die größten Mengenanteile von allen Seltenen Erden in Leuchtmitteln aufweisen. Gambarella et al. (2010) geben den Anteil von Yttrium, Lanthan und Cer an allen in Leuchtmitteln verwendeten Seltenen Erden mit 69,2%, 11,0% und 8,5% an – gefolgt von Europium (4,9%), Terbium (4,6%) und Gadolinium (1,8%).
- Als eigentliche Leuchtstoffe kommen Europium, Terbium und Gadolinium in verschiedenen Verbindungen zum Einsatz. Samarium, Erbium, Dysprosium, Thulium und Lutetium spielen eine mengenmäßig untergeordnete Rolle (Schüler et al. 2011; Gambardella et al. 2010).
- Für Plasma Displays werden laut Rieger (2009) folgende Seltene-Erden-Verbindungen eingesetzt:

Rot: $(\text{Y}, \text{Gd})\text{BO}_3:\text{Eu}$

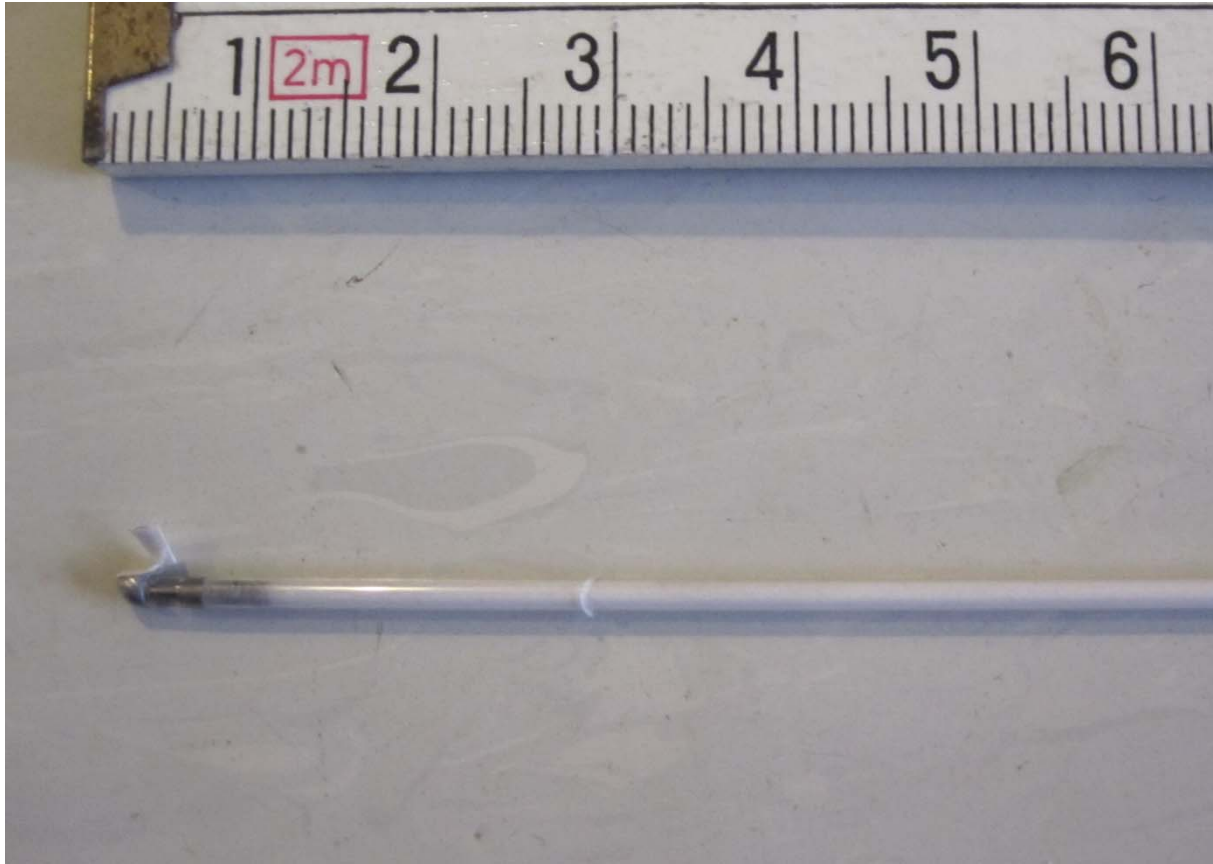
$(\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+})$

Grün: $(\text{Y}, \text{Gd})\text{BO}_3:\text{Tb}$

Blau: $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}$

- Für die LCD-Hintergrundbeleuchtung kommen insbesondere bei älteren Geräten Kaltkathodenröhren (CCFL) zum Einsatz. Während in Notebooks in der Regel nur ein bis zwei Leuchten eingesetzt werden, sind Fernsehgeräte mit bis zu 82 Kapillarröhren ausgestattet (FEM & IUTA 2011). Die Kaltkathodenröhren eines Notebooks haben Durchmesser von ca. 1,5mm und wiegen weniger als 1g (siehe Abbildung 2).

Abbildung 2 CCFL-Kapillarröhre eines Notebook-Bildschirms (eigene Aufnahme Öko-Institut)



Eine Einschätzung von Mengen pro Einheit ist nur mit allgemein zugänglichen Daten möglich, die insbesondere in ihrer Kombination beträchtliche Unsicherheiten aufweisen. Dennoch kann insbesondere für LCD-Bildschirme mit CCFL-Hintergrundbeleuchtung eine Abschätzung auf folgender Datenbasis getroffen werden:

Tabelle 5 Annahmen und Daten zur Abschätzungen der Seltenen Erden Gehalte der CCFL-Hintergrundbeleuchtung von LCD-Bildschirmen

	Durchschn. Gewicht einer CCFL-Kapillarröhre [g]	Durchschn. Anzahl der Kapillarröhren pro Gerät	Massenanteil Leuchtstoffe an Kapillarröhre [%]	Massenanteil an den Leuchtstoffen [%]						
				Y	Eu	La	Ce	Tb	Gd	Pr
Notebook	1	1	2,1	8,7	0,6	0,5	0,3	0,1	0,0	< 0,01
Monitor	1,5	6		2	4	4	6	8	5	
Fernseher	4	15								

Datenquellen: Eigene Messungen und Abschätzungen, Hamidovic 1997 zitiert nach Martens 2011, Guarde et al. 2010.

Aufgrund dieser Daten können folgende Mengenabschätzungen getroffen werden:

Tabelle 6 Geschätzte durchschnittliche Seltenen Erden Gehalte von LCD-Displays mit CCFL-Hintergrundbeleuchtung

	Yttrium [mg]	Europium [mg]	Lanthan [mg]	Cer [mg]	Terbium [mg]	Gadolinium [mg]
Notebook	1,8	0,13	0,11	0,076	0,038	0,011
Monitor	16,0	1,20	1,00	0,680	0,340	0,095
Fernseher	110,0	8,10	6,80	4,500	2,300	0,630

Neuere LCD-Monitore sind teilweise bereits mit einer Hintergrundbeleuchtung auf Basis weißer LEDs ausgestattet (siehe Abschnitt 5). Im Jahr 2010 lag der Marktanteil von mit LED ausgestatteten LCD-Monitoren und LCD-Fernsehgeräten bei etwa 30%, während bereits etwa 90% aller neuen Notebooks mit LED-Hintergrundbeleuchtung versehen waren (Young 2011). Auch bei Verwendung von weißen LEDs kommt, ähnlich wie bei CCFL-Röhren, ein Leuchtstoff zum Einsatz, der das in der LED erzeugte kurzwellige Licht in das sichtbare Spektrum konvertiert. Dessen Trägermatrix besteht in der Regel aus Yttrium-Aluminium-Granat (YAG) mit nennenswerten Beimischungen von Gadolinium. Die Dotierung wird mit einigen Gewichtsprozent Cer und teilweise auch Europium vorgenommen. Der eigentliche Halbleiter-Chip der LED, in dem das Licht erzeugt wird, setzt sich aus Indiumgalliumnitrid zusammen (siehe auch Abschnitt 5.1). Damit ergibt sich für LCD-Monitore, LCD-Fernsehgeräte und Notebooks mit LED-Hintergrundbeleuchtung eine gegenüber Tabelle 6 etwas veränderte Zusammensetzung bezüglich der Seltenen Erden, welche in der Tabelle 8 angegeben ist (Indium und Gallium sind in dieser Aufstellung mit eingeschlossen). Es finden dabei die in Tabelle 7 angegebenen Mengenanteile der kritischen Metalle in weißen LEDs Verwendung (siehe auch Tabelle 30 in Abschnitt 5.1). Die für die Hochrechnung benötigte Anzahl der in einem Monitor verbauten weißen LEDs ist eine herstellerspezifische Größe und kann für eine allgemeine Betrachtung nur abgeschätzt werden. Basierend auf beispielhaften Angaben in Young (2011) wird von 100 LEDs für einen LCD-PC-Monitor, 150 LEDs für ein LCD-Fernsehgerät und 50 LEDs für ein Notebook-Display ausgegangen (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7 Annahmen und Daten zur Abschätzungen der Seltenen Erden Gehalte (inkl. Indium und Gallium) der LED-Hintergrundbeleuchtung von LCD-Bildschirmen

	Durchschn. Anzahl der weißen LEDs pro Gerät	Leuchtstoff: Masse pro LED [µg]					Halbleiterchip Masse pro LED [µg]	
		Y	Eu	Ce	Tb	Gd	In ³	Ga
Notebook	50	32,0	0,6	2,0	0,0	32,5	29,0	32,5
Monitor	100							
Fernseher	150							

³ nur Anteil der LED-Hintergrundbeleuchtung

Tabelle 8 Geschätzte durchschnittliche Seltene Erden Gehalte (inkl. Indium und Gallium) von LCD-Displays mit LED-Hintergrundbeleuchtung

	Yttrium [mg]	Europium [mg]	Cer [mg]	Terbium [mg]	Gadolinium [mg]	Indium ¹ [mg]	Gallium [mg]
Notebook	1,6	0,03	0,1	0,0	0,75	1,5	1,6
Monitor	3,2	0,06	0,2	0,0	1,50	2,9	3,3
Fernseher	4,9	0,09	0,3	0,0	2,30	4,4	4,9

Zusätzlich zu den Seltenen Erden der Hintergrundbeleuchtung können in einigen Geräten Permanentmagnete auf Basis Seltener Erden verbaut sein (siehe Kapitel 3.4). Als mögliche Anwendungen kommen dabei vor allem Lautsprecher von Fernsehgeräten in Frage. Daten zur Anwendungshäufigkeit von Seltenen Erden Magneten in Fernsehern sowie deren Stückgewichte liegen allerdings nicht vor, sodass diese in der vorliegenden Arbeit unberücksichtigt bleiben.

2.3 Edelmetalle

Flachbildschirme beinhalten eine oder mehrere Leiterplatten die mit elektronischen Komponenten sowie Steckverbindungen bestückt sind. Sowohl in den Komponenten, den Steckverbindungen als auch in den Loten sind relevante Mengen an Edelmetallen enthalten.

Tabelle 9 Gewicht und Edelmetallkonzentrationen von Leiterplatten in Flachbildschirmen

	Gewicht pro Einheit [g]	Ag [mg/kg]	Au [mg/kg]	Pd [mg/kg]	Datenquelle
Leiterplatte eines LCD-Monitors	400	1.300	490	99	FEM & IUTA 2011, Huismann et al. 2007
Leiterplatte eines LCD-Fernsehers	2.300	250	60	19	FEM & IUTA 2011, Huismann et al. 2007

Aus den Daten aus Tabelle 9 kann die Gesamtmenge in den Leiterplatten eines Notebooks abgeschätzt werden:

Tabelle 10 Edelmetallmengen in den Leiterplatten von Flachbildschirmen

	Ag [mg]	Au [mg]	Pd [mg]
Leiterplatte eines LCD-Monitors	520	196	40
Leiterplatte eines LCD-Fernsehers	575	138	44

2.4 Zusammenfassung kritischer Metalle in Flachbildschirmen

Die Ergebnisse der Analysen aus Kapitel 2.1 bis 2.3 sind in Tabelle 12 und Tabelle 13 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Werte vor allem orientierenden Charakter haben und keinesfalls auf alle Einzelmodelle und Größen anwendbar sind. So leiten sich viele Werte von Messungen an Altgeräten ab. Aufgrund veränderten Produktdesigns können sich hier bei neueren Gerätegeneration Verschiebungen ergeben, die in diesen Daten noch nicht berücksichtigt werden konnten, da sie vielfach der betrieblichen Geheimhaltung unterliegen bzw. noch nicht in aggregierter Weise für ein Durchschnittsprodukt berechnet wurden. Tabelle 11 fasst die zur Hochrechnungen der Mengenangaben bezüglich der im Jahre 2010 in Deutschland verkauften PC- und TV-Displays verwendeten Größen zusammen. Bei der Hochrechnung der Mengenangaben bezüglich der in 2010 auf dem deutschen Markt verkauften Geräte werden die in Abschnitt 2.5 zitierten Angaben zu den entsprechenden Verkaufszahlen als Basis genommen. Diese schließen zwar auch PC-Monitore mit Elektronenröhren-Bildschirmen (CRT-Bildschirm) mit ein. Deren Marktanteil kann jedoch als in der Gesamtbilanz vernachlässigbar gesehen werden. Für den Marktanteil der im Jahr 2010 verkauften TV-Geräte und PC-Monitore mit LED-Hintergrundbeleuchtung wird ein Wert von 30% angenommen (Young 2011). Für die Konzentrationen der Seltenen Erdmetalle sowie von Gallium und Indium in LCD-Geräten mit LED-Hintergrundbeleuchtung wird von den Angaben in Tabelle 8 ausgegangen. Dabei wurde angenommen, dass ein durchschnittlicher LCD-Monitor 100 weiße LEDs und ein LCD-Fernsehergerät 150 weiße LEDs in der Hintergrundbeleuchtung enthält (siehe Young 2011). Für PDP-Fernsehergeräte werden für die weitere Potenzialberechnung die Daten des LCD-Fernsehers zu Grunde gelegt.

Tabelle 11 Absatzzahlen von Geräten mit LCD-Display (Deutschland 2010), der Marktanteil von Geräten mit Hintergrundbeleuchtung mittels weißer LEDs (WLEDs) und die angenommene Anzahl der pro Gerät in der Hintergrundbeleuchtung verbauten WLEDs (siehe auch Abschnitt 5.3)

Gerätekategorie	Anzahl der in 2010 in D verkauften Geräte	Marktanteil Hintergrundbeleuchtung mit WLEDs	Anzahl WLEDs pro Gerät
LCD-PC-Monitor	2.576.000	30%	100
LCD-TV-Gerät	8.258.000	30%	150

Aus Tabelle 12 lässt sich entnehmen, dass über alle in Deutschland verkauften LCD-PC-Monitore vor allem Silber (gut 1,3 Tonnen/a) und Gold (rund eine halbe Tonne/a) derzeit in die Nutzungsphase gelangen, die nach Ablauf der Nutzungsphase ein interessantes Potenzial für die Kreislaufwirtschaft darstellen. Es folgen Indium (rund 200 kg/a) und das Edelmetall Palladium (rund 100 kg/a). Die diversen Seltenen Erden und Gallium sind nur in geringen Mengen in den LCD-Monitoren enthalten.

Tabelle 12 Durchschnittlicher Gehalt kritischer Rohstoffe in LCD-PC-Monitoren (privater Markt)

Metall		Gehalt je LCD-Monitor (CCFL ⁴) [mg]	Gehalt je LCD-Monitor (LED ⁵) [mg]	Gehalt in allen 2010 in D verkauften LCD-Monitoren [kg]	Vorkommen
Silber	Ag	520	520	1.340	Leiterplatte & Kontakte (100%)
Gold	Au	200	200	505	Leiterplatte & Kontakte (100%)
Indium	In	79	82	206	Displayinnenbeschichtung (100%)
Palladium	Pd	40	40	102	Leiterplatte & Kontakte (100%)
Yttrium	Y	16	3,20	32	Hintergrundbeleuchtung (100%)
Gallium	Ga	0,000	3,30	2,51	LED-Hintergrundbeleuchtung
Europium	Eu	1,200	0,06	2,23	Hintergrundbeleuchtung (100%)
Lanthan	La	1,000	0,00	1,84	CCFL-Hintergrundbeleuchtung
Cer	Ce	0,680	0,20	1,38	Hintergrundbeleuchtung (100%)
Gadolinium	Gd	0,096	1,50	1,33	Hintergrundbeleuchtung (100%)
Terbium	Tb	0,340	0,00	0,61	CCFL-Hintergrundbeleuchtung
Praseodym	Pr	< 0,019	0,00	<0,05	CCFL-Hintergrundbeleuchtung

Tabelle 13 Durchschnittlicher Gehalt kritischer Rohstoffe in LCD-Fernsehern

Metall		Gehalt je LCD-Fernseher (CCFL ⁶) [mg]	Gehalt je LCD-Fernseher (LED ⁷) [mg]	Gehalt in allen 2010 in D verkauften LCD-Fernsehern [kg]	Vorkommen
Silber	Ag	580	580	4.748,35	Leiterplatte & Kontakte (100%)
Indium	In	260	260	2.157,86	Displayinnenbeschichtung (100%)
Gold	Au	140	140	1.139,60	Leiterplatte & Kontakte (100%)
Yttrium	Y	110	4,8	647,02	Hintergrundbeleuchtung (100%)
Palladium	Pd	44	44	360,87	Leiterplatte & Kontakte (100%)
Europium	Eu	8,10	0,09	46,84	Hintergrundbeleuchtung (100%)
Lanthan	La	6,80	0,00	39,33	CCFL-Hintergrundbeleuchtung (100%)
Cer	Ce	4,50	0,30	26,96	Hintergrundbeleuchtung (100%)
Terbium	Tb	2,30	0,00	13,11	CCFL-Hintergrundbeleuchtung (100%)
Gallium	Ga	0,00	4,90	12,08	LED-Hintergrundbeleuchtung (100%)
Gadolinium	Gd	0,63	2,30	9,22	Hintergrundbeleuchtung (100%)
Praseodym	Pr	< 0,13	0,00	<1,07	CCFL-Hintergrundbeleuchtung (100%)

Die entsprechenden Daten für LCD-TV-Geräte sind in Tabelle 13 aufgeführt. Silber (gut 4,7 Tonnen/a), Indium (gut 2,1 Tonnen/a) und Gold (gut 1,1 Tonnen/a) werden über LCD-

⁴ LCD-Monitore (PC) mit CCFL-Hintergrundbeleuchtung (in 2010 ca. 70% aller neuen LCD-Monitore)

⁵ LCD-Monitore (PC) mit LED-Hintergrundbeleuchtung (in 2010 ca. 30% aller neuen LCD-Monitore)

⁶ LCD-Fernseher mit CCFL-Hintergrundbeleuchtung (in 2010 ca. 70% aller neuen LCD-Fernseher)

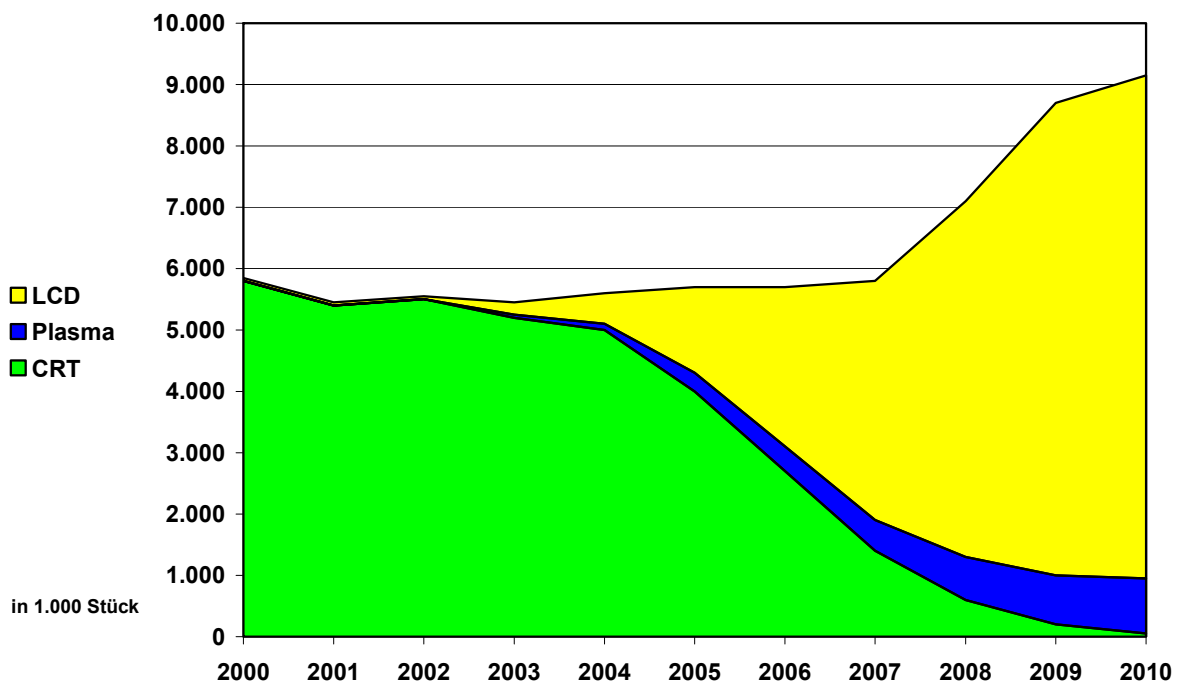
⁷ LCD-Fernseher mit LED-Hintergrundbeleuchtung (in 2010 ca. 30% aller neuen LCD-Fernseher)

Fernseher im Tonnenbereich jährlich auf den deutschen Markt gebracht. Allein der Goldgehalt entspricht nach heutigen Marktpreisen rund 40 Mio. Euro. Yttrium als Vertreter der Seltenen Erden und das Edelmetall Palladium werden jeweils zu mehreren hundert Kilogramm pro Jahr über LCD-Fernseher in Deutschland mitverkauft. Gallium und die anderen Seltenen Erden weisen eine geringere Mengenrelevanz auf.

2.5 Marktdaten Flachbildschirme

Der deutsche Markt für TV-Geräte wird hauptsächlich durch die Umsätze mit TV-Flachbildschirmen auf LCD-Basis dominiert. Nach CEMIX (2011) wurden aus dieser Produktgruppe im Jahr 2010 etwa 8.3 Millionen TV-Geräte und damit 9,3% mehr als im Vorjahr verkauft (siehe Tabelle 14). Dieser Trend zu steigenden Stückzahlen und auch steigendem Umsatz (fast 5,5 Mrd. € in 2010, 3,9% Steigerung gegenüber 2009) wird auch durch einen sinkenden Durchschnittspreis angeheizt. Deutlich kleiner ist der Markt für Plasma-TV-Geräte, dessen Absatz und Umsatz in 2010 nur etwa 10% des LCD-TV-Marktes ausmachte. Dies ist auch durch einen höheren Durchschnittspreis der Plasma-TV-Geräte bedingt, zusammen mit den stetig verbesserten Bildeigenschaften der LCD-TV-Geräte. Über die letzten Jahre scheinen sich Plasma-TV-Geräte in Deutschland in einer kleinen, aber offenbar beständigen Nische zu etablieren (GfK & gfu 2011, siehe Abbildung 3). Für die Verwendung als PC-Monitore spielen die Plasma-Bildschirme gegenwärtig keine Rolle. Plasma-Bildschirme werden in der Regel erst ab einer Diagonalen von etwa 37 Zoll gefertigt und sind daher nahezu ausschließlich für den TV-Bereich relevant.

Abbildung 3 Absatz von TV-Geräten in Deutschland, nach bildgebender Technologie (LCD-, Plasma-, Röhren-TV-Gerät), nach GfK & gfu (2011)



Der Wachstumstrend auf dem gesamten TV-Gerätemarkt resultiert in einen Bestand von geschätzten 50 Millionen TV-Flachbildgeräten in privaten Haushalten in 2010 (GfK & gfu (2011)). Damit ist jeder Haushalt in Deutschland mit etwa 1,5 Fernsehgeräten ausgestattet. Neben der Erweiterung des verfügbaren HDTV-Angebots haben auch die neu verfügbare 3D-Technologie für TV-Geräte (Absatz 2010: 200.000 Stück) und sogenannte Smart-TV-Geräte mit Internetanbindung (Absatz 2010: 2 Mio. Stück) die Nachfrage nach neuen TV-Flachbildfernsehern angehoben. Auch die für den 30. April 2012 vorgesehene Abschaltung der analogen TV-Satellitenübertragung wirkt fördernd auf die Nachfrage nach neuen TV-Geräten. Angesichts dieser neuen, sich gerade etablierenden Technologien wird auch für die nächsten Jahre mit einer positiven Marktentwicklung gerechnet (GfK & gfu (2011)). TV-Geräte mit Elektronenröhren als bildgebende Komponente (CRT-Geräte) spielen hingegen zumindest bei Neukäufen in 2010 kaum noch eine Rolle, was den langjährigen Trend hin zu einem Verschwinden vom Markt fortsetzt (siehe Abbildung 3).

Tabelle 14 Absatz, Durchschnittspreise und Umsätze für TV-Geräte (privater Markt) in 2010 , nach CEMIX (2011)

Produktgruppe	LCD-TV-Bildschirme	Plasma-TV-Bildschirme	CRT-TV-Bildschirme	PC-Monitore ⁸
Absatz 2010 in 1.000 Stück	8.258	812	34	2.576
Veränderung gegen 2009	9,30%	8,00%	-77,10%	-20,80%
Durchschnittspreis in 2010 [€] ⁹	665	804	120	180

Von Bedeutung für den Einsatz von Rohstoffen ist der seit mehreren Jahren anhaltende Trend zu größeren Formaten bei TV-Geräten. Abbildung 4 zeigt die Entwicklung der Umsätze, die in den letzten Jahren in Deutschland mit TV-Geräten verschiedener Bildschirm-diagonalen erzielt wurden. Es lässt sich ein eindeutiger Trend hin zu größeren TV-Bildschirmen erkennen. Anders als bei PC-Monitoren, bei denen die Bildschirmgröße aufgrund der Maße eines typischen PC-Arbeitsplatzes nach oben begrenzt ist, gibt es auch für TV-Bildschirme, die deutlich größer als bisher sind, eine aus der Sicht der Unterhaltungselektronik-Industrie sinnvolle Verwendung und damit eine Nachfrage auf dem Markt. Die durchschnittliche Größe des LCD-Panels eines Anfang 2010 verkauften Flachbildschirmes beträgt etwa 3626 cm² für TV-Bildschirme und etwa 1126 cm² für PC-Monitore, entsprechend etwa der Größe eines 37-Zoll-TV-Bildschirms beziehungsweise eines 20-Zoll-PC-Bildschirms. Diese Angaben basieren auf Daten über die relativen Anteile verschieden großer LCD-Panels auf dem Weltmarkt (Displaybank (2011)). Es wird für die Hochrechnungen zur Gesamtmenge der kritischen Metalle in LCD-Flachbildschirme in der deutschen Abfallwirt-

⁸ CRT+TFT, nur privater Sektor

⁹ Inkl. Mehrwertsteuer

schaft in Abschnitt 2.4 angenommen, dass die verschiedenen großen Flachbildschirm-Varianten ähnlich große Anteile am deutschen Markt wie am Weltmarkt haben. Daraus resultiert dann auch eine übereinstimmende mittlere Größe der Bildschirmflächen.

Abbildung 4 Entwicklung des Umsatzes in Deutschland für TV-Geräte nach Bildschirmgröße

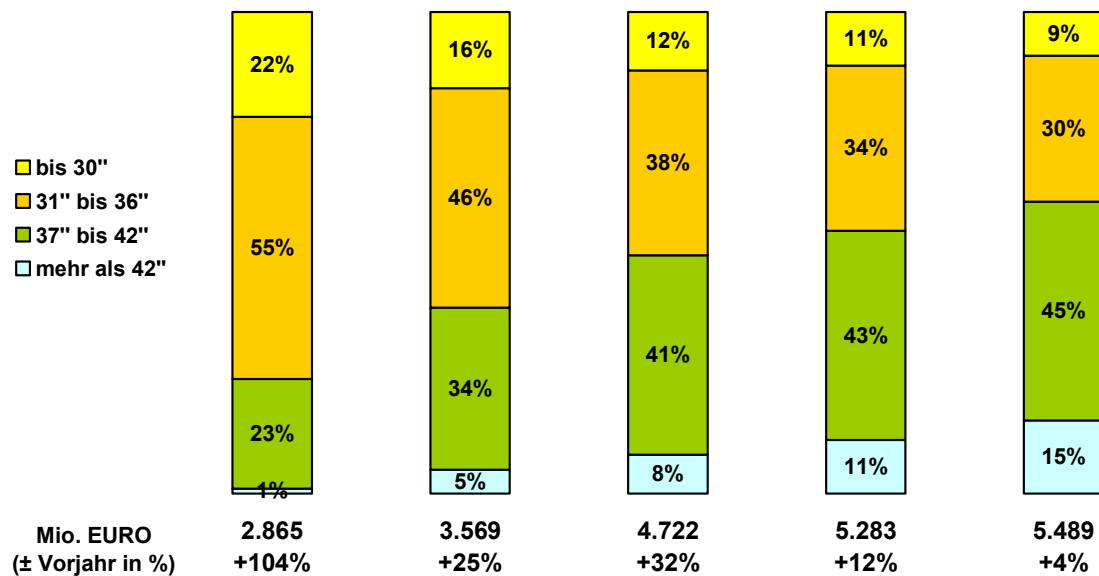
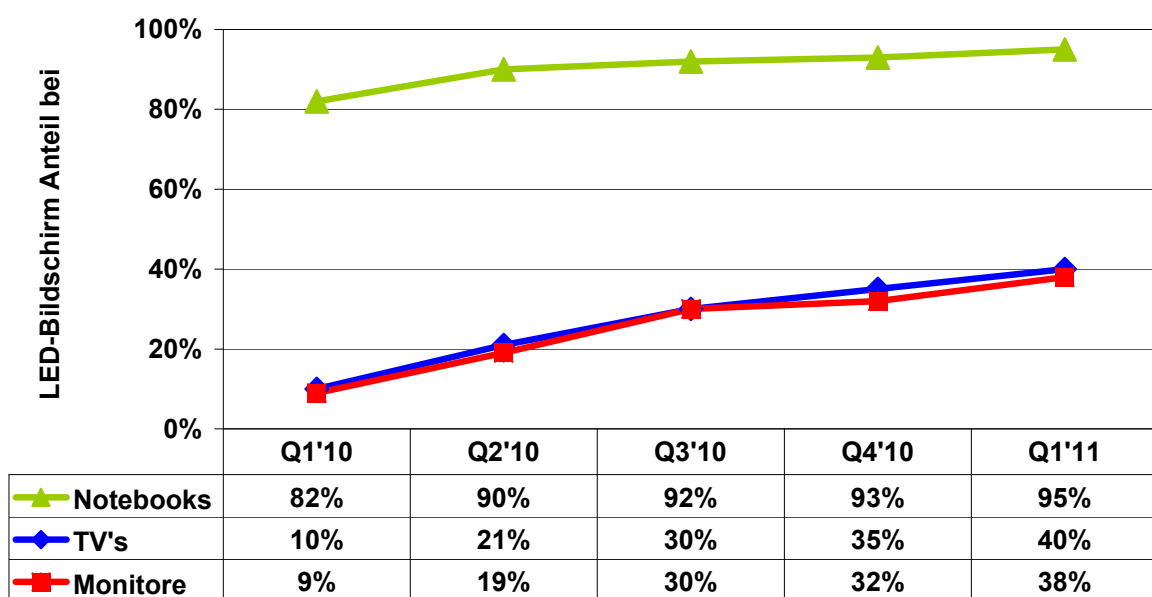


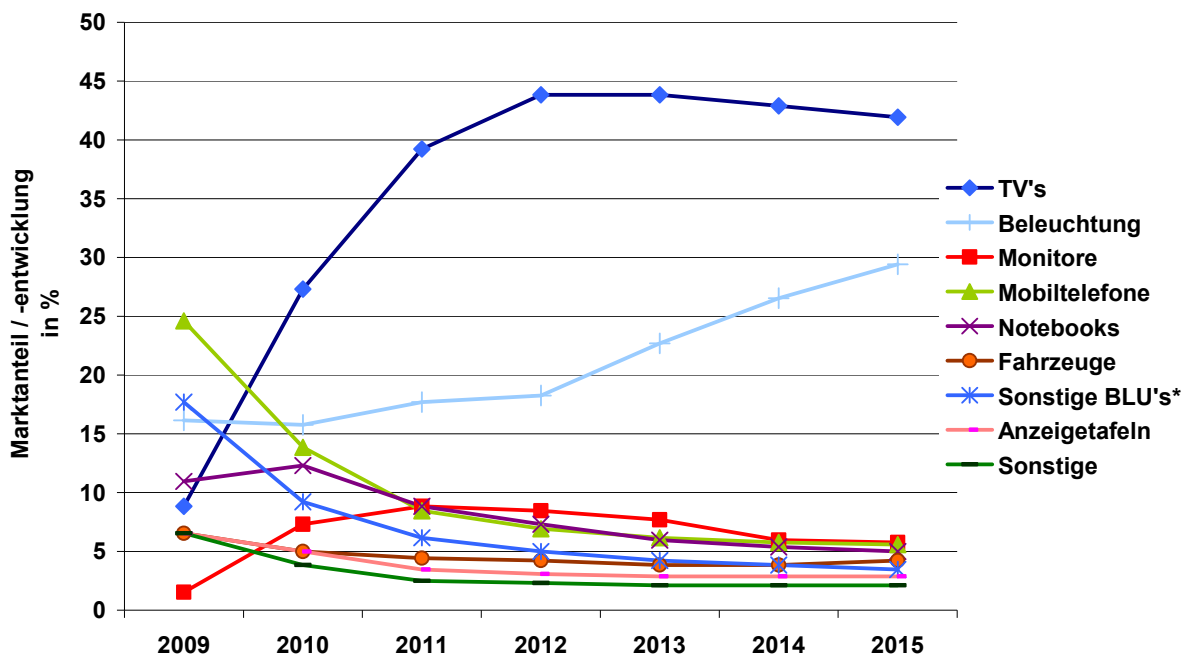
Abbildung 5 Marktanteile von Geräten mit LCD-Bildschirmen und LED-Hintergrundbeleuchtung (nach Young 2011)



Im Unterschied zu Plasma-Bildschirmen ist bei Bildschirmen auf LCD-Basis eine Hintergrundbeleuchtung nötig. Dafür wird neben den bisher hauptsächlich verwendeten Kaltkathoden-Röhren (CCFL) zunehmend weiße LEDs (WLEDs) eingesetzt. Abbildung 5 zeigt den im letzten Jahr zunehmenden Anteil von Geräten mit LCD-Bildschirmen, in denen WLEDs als Hintergrundbeleuchtung zum Einsatz kommen (Young 2011). Dieser Anteil betrug für Anfang 2011 gefertigte TV-Flachbildschirme bereits 40%.

Bereits 2010 dominierte der Umsatz, der mit WLEDs für TV-Flachbildschirme erzielt wurde, mit einem Wert von ca. 28% alle anderen Verwendungszwecke für WLEDs (siehe Abbildung 6). Für die nächsten Jahre wird ein starkes weiteres Wachstum bis hin zu über 40% in 2012 vorhergesagt (Young 2011).

Abbildung 6 Marktanteile und Projektion der Marktentwicklung für weiße LEDs nach Verwendungszweck (Young 2011).



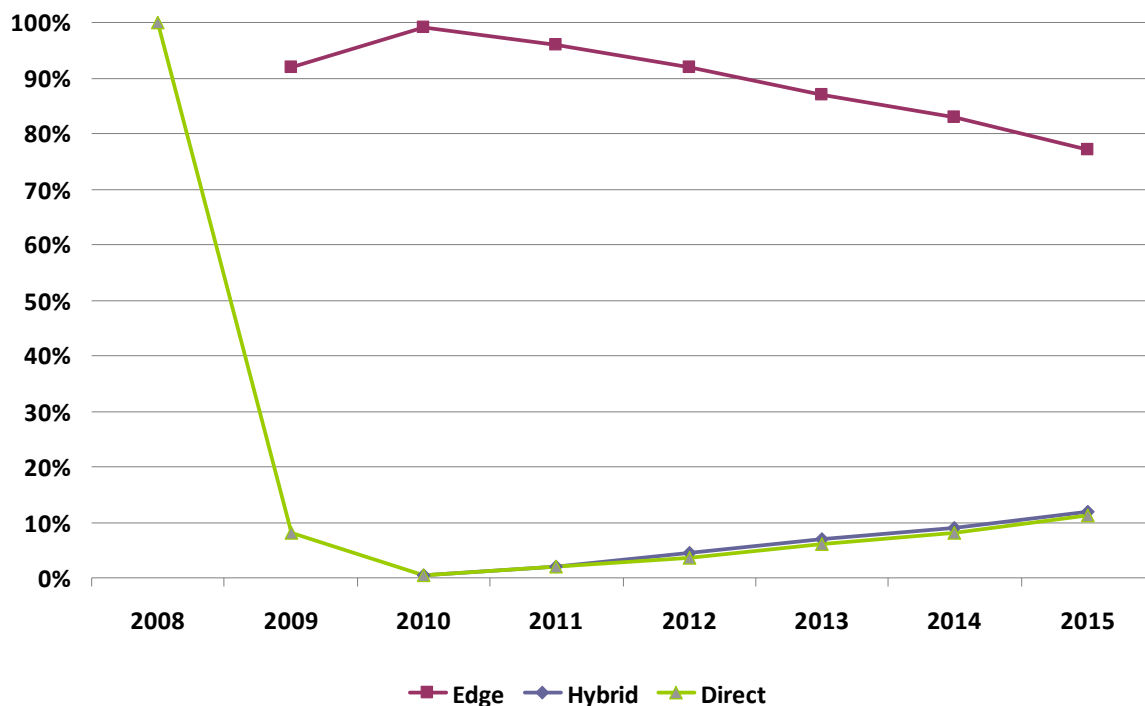
* BLU = Hintergrundbeleuchtung (backlight unit)

In TV-Bildschirmen wird überwiegend eine indirekte Beleuchtungsmethode genutzt, bei der die WLEDs als Lichtleiste am Rande der Monitorfläche platziert werden, und der Lichtstrom über Lichtleiter auf die Gesamtfläche verteilt wird. Dagegen sind bei Monitoren mit sogenannter direkter Hintergrundbeleuchtung die LEDs einzeln über die Fläche verteilt und jeweils mit einem eigenen Linsensystem zur Streuung des Lichtes versehen. Dabei werden mindestens dreimal mehr LEDs benötigt als bei der indirekten Beleuchtung (Young 2011). Auch Hybride aus diesen beiden Konstruktionsprinzipien werden gefertigt.

Verbesserung in der Lichtausbeute der weißen LEDs, der Qualität der Lichtleiter und Erhöhung der Durchlässigkeit der eigentlichen LCD-Schicht haben dazu geführt, dass sich die

Anzahl der durchschnittlich in einen LCD-Panel als Hintergrundbeleuchtung verbauten LEDs von 2009 bis 2010 in etwa halbiert. Sie lag 2010 bei etwa 100 LEDs pro Bildschirm. Es wird allerdings erwartet, dass sich diese gegenwärtige Entwicklung hin zu weniger LEDs abschwächen oder gar umkehren könnte, da der Trend in Richtung zunehmend größerer Flachbildschirme geht (siehe auch Abbildung 4). Für deren Hintergrundbeleuchtung wird eine größere Zahl an LEDs erforderlich. Neben großen Bildschirmen erfordern auch 3D-fähige Flachbildschirme eine verstärkte Hintergrundbeleuchtung: Beide für 3D-TV-Geräte hauptsächlich verwendeten Technologien, die shutter-Methode wie auch die Verwendung von Polarisationsfiltern, bewirken eine Reduktion der Helligkeit um 80% beziehungsweise 60%. Der Helligkeitsverlust muss daher durch eine verstärkte Hintergrundbeleuchtung aufgefangen werden (Young 2011). Diesen erhöhten Anforderungen an die Stärke der Hintergrundbeleuchtung werden voraussichtlich vor allen direkte Beleuchtungsmethoden bzw. Hybridkonstruktionen gerecht werden. Deren Marktanteile liegen 2010 zwar noch bei nur wenigen Prozent, vor allem bedingt durch hohe Fertigungskosten. Es wird jedoch erwartet dass er sich bis 2015 auf jeweils etwa 15% erhöhen wird (siehe Abbildung 7).

Abbildung 7 Marktanteile von LCD-TV-Geräten mit indirekter („Edge“), direkter („Direct“) und hybrider („Hybrid“) Hintergrundbeleuchtung (nach Young 2011)



2.6 Lebensdauer und Erfassungsraten Flachbildschirme

Die Lebensdauer von Computerbildschirmen wurde im Rahmen des europäischen Ökodesign-Prozesses auf durchschnittlich 6,6 Jahre geschätzt (EuP 2007). In dieser Zahl ist sowohl die Erstnutzung, als auch die Länge einer durchschnittlichen Zweitnutzung enthalten.

Für die Lebensdauer von Fernsehgeräten kann laut Zangl et al. (2009) von durchschnittlich 10 Jahren ausgegangen werden.

Im Jahr 2008 wurden in Deutschland 319.983 t der WEEE-Produktkategorie 3 (IT- und Telekommunikationsgeräte) sowie 192.224 t der WEEE-Produktkategorie 4 (Geräte der Unterhaltungselektronik) in Verkehr gebracht. Im gleichen Zeitraum wurden 155.007 t der Kategorie 3 sowie 130.620 t der Kategorie 4 durch die offiziellen Rücknahme- und Sammelsysteme für das geregelte Recycling und Entsorgung erfasst (BMU 2009). Geht man davon aus, dass diese Werte repräsentativ auf Bildschirme übertragen werden können, kann die Erfassungsrate für Computerbildschirme in Deutschland mit knapp 50%, für Fernsehgeräte mit knapp 85% abgeschätzt werden¹⁰. Verglichen mit Daten auf EU-Ebene (40,5% für Flachbildschirme), liegt Deutschland damit über dem europäischen Durchschnitt (Huisman et al. 2007). Über den Verbleib der restlichen Geräte existieren keine belastbaren Daten. Insgesamt kommen folgende Möglichkeiten in Betracht:

- Zeitverzögerte Entsorgung (Aufbewahrung der Altgeräte durch den Nutzer)
- Entsorgung über den Hausmüll
- Export in andere Länder

Insbesondere beim letzten Punkt ist bekannt, dass sowohl Fernsehgeräte als auch Computermonitore oftmals als Gebrauchtware nach Osteuropa oder West-Afrika exportiert werden, wo die Geräte zum Teil Instand gesetzt werden und an lokale oder regionale Abnehmer verkauft werden (Prakash & Manhart 2010, Manhart et al. 2011).

2.7 Stand der Vorbehandlungstechnik für Flachbildschirme

Gemäß Anhang II der Richtlinie 2002/96/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Januar 2003 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte müssen Flüssigkristallanzeigen mit einer Oberfläche von mehr als 100 Quadratzentimetern und hintergrundbeleuchtete Anzeigen mit Gasentladungslampen beseitigt oder verwertet werden. Es müssen die erforderlichen Maßnahmen getroffen werden, damit die Abfälle nicht die menschliche Gesundheit gefährden oder die Umwelt schädigen. Insbesondere bei Gasentladungslampen sieht die Richtlinie 2002/96/EG explizit eine Entfernung des Quecksilbers vor.

Somit werden Flachbildschirme in Deutschland und der EU nach der Sammlung einer gesonderten Verwertung zugeführt, die insbesondere die Rückgewinnung des Quecksilbers aus Gasentladungslampen (LCD-Displays mit CCFL-Hintergrundbeleuchtung) zum Ziel hat.

Diese Rückgewinnung kann am besten durch manuelle Entnahme der Kapillarröhren erreicht werden. Dieses Verfahren wird zwar in verschiedenen Betrieben praktiziert, aufgrund der Quecksilberemissionen von beschädigten Lampen, sollte dieses Verfahren aber nur unter Einhaltung strenger Arbeitsschutzstandards angewendet werden. Insgesamt muss bei

¹⁰ Diese Werte beinhalten allerdings keine zeitlichen Verzögerungen durch die Nutzungsphase der Geräte. Es handelt sich daher lediglich um eine Abschätzung der tatsächlichen Erfassungsraten.

diesem Vorgang davon ausgegangen werden, dass 5-20% der Kapillarröhren bei der Demontage beschädigt werden, sodass Quecksilber austritt (Böni & Widmer 2011).

Bei der vollständigen manuellen Demontage von LCD-Bildschirmen mit CCFL-Hintergrundbeleuchtung¹¹ werden folgende Fraktionen erzeugt:

- Kunststofffraktion (z.T. aufgliedert nach verschiedenen Polymertypen)
- Stahl- und Aluminiumbleche
- Leiterplatten
- CCFL-Lampen
- Displays

Die Kunststofffraktion, Stahl, Aluminium und Leiterplatten werden an entsprechende Absatzmärkte zur stofflichen Wiederverwertung weitergegeben. Auf die Rückgewinnung von Edelmetallen aus Leiterplatten wird in Kapitel 3.9 und 6.1 eingegangen. Die CCFL-Lampen werden dem allgemeinen Lampenrecycling zugeführt, wobei v.a. der sachgerechte Umgang mit Quecksilber im Vordergrund steht. Zudem werden das Glas und z.T. die metallischen Bestandteile der Fassungen einer stofflichen Verwertung zugeführt. Die Leuchtstoffe selbst sowie eventuelle Verunreinigungen durch Glasbruch, Quecksilber und anderen Stoffen werden i.d.R. Untertage deponiert (Martens 2011). Die in den Leuchtstoffen enthaltenen Seltenen Erden werden gegenwärtig nicht zurück gewonnen (siehe Kapitel 6.3).

Alternativ zur manuellen Demontage kann die vollständige oder teildemontierte Displayeinheit einer mechanischen Vorbehandlung zugeführt werden, wobei die Geräte in einem luftdicht abgeschirmten Shredder zerkleinert werden und das Quecksilber aus der Prozessluft abgeschieden wird. Dennoch bleiben auch bei diesem Verfahren offene Fragen, da laut Böni & Widmer (2011) der vollständige Verbleib des Quecksilbers nicht abschließend geklärt ist.

Als weitere Option wird die thermische Behandlung ganzer oder teildemontierter Displayeinheiten praktiziert (Böni & Widmer 2011, Martens 2011).

Die Displays werden überwiegend thermisch in Abfallverbrennungsanlagen oder im Wälzverfahren für Stahlwerksstäube verwertet. Dabei werden die organischen Bestandteile (Flüssigkristalle, Polarisationsfilter, Harze) verbrannt und das Glas zusammen mit den oxidierten Metallen in einer inerten Schlacke eingebunden (Martens 2011). Das in den Displays enthaltene Indium geht dabei dissipativ verloren.

2.8 Optimierungspotenziale in der Recyclingkette

Aus Ressourcensicht ist eine manuelle Vorbehandlung mit vollständiger Entnahme der bestückten Leiterplatten mit anschließender Rückgewinnung der Edelmetalle (siehe Kapitel

¹¹ Bei Flachbildschirmen fallen derzeit im Abfallstrom v.a. LCD-Bildschirme mit CCFL-Hintergrundbeleuchtung an. Neuere Technologien wie LCD-Displays mit LED-Hintergrundbeleuchtung oder OLED-Bildschirme sind mengenmäßig im Abfallstrom noch nicht relevant.

6.1) zu empfehlen. Hierbei lassen sich v.a. die Synergien mit der oftmals praktizierten manuellen Entnahme der quecksilberhaltigen CCFL-Lampen nutzen.

Hinsichtlich einer Rückgewinnung des Indiums aus den Displayeinheiten sowie der Seltenen Erden aus der Hintergrundbeleuchtung existieren derzeit noch keine geeigneten Abtrenn- und Raffinerieprozesse (siehe Kapitel 6.3 und 6.4), sodass diese Stoffe bislang nicht Ziel der stofflichen Wiederverwertung waren. In Anbetracht der sich abzeichnenden Entwicklungen auf diesem Gebiet, kann aber eine Einlagerung der Displayeinheiten sowie der Leuchtstoffe zur späteren Verwertung in Betracht gezogen werden. Diese Maßnahmen sind insofern als machbar einzustufen, da diese beiden Fraktionen bereits jetzt als konzentrierte Fraktionen in Zerlegeprozessen anfallen¹².

¹² Das Hauptaufkommen von Leuchtstoffen sind dabei allerdings nicht die Hintergrundbeleuchtungen von Flachbildschirmen, sondern andere Leuchtmittel (v.a. Leuchtstoffröhren) und Bildschirmtechnologien (Kathodenstrahlröhren).

3 Notebooks

Notebooks sind aus mehreren Komponenten und 1800 bis 2000 Einzelteilen zusammengesetzt (Manhart & Gießhammer 2006). Diese beinhalten insgesamt eine Vielzahl von Elementen. Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die wesentlichen, aus Recyclingsicht relevanten Komponenten:

Abbildung 8 Die wesentlichen, aus Recyclingsicht relevanten Komponenten eines Notebooks (eigene Aufnahme Öko-Institut)



A: Hauptplatine & kleinere Leiterplatten (z.B. Touchpad)

B: LCD-Bildschirm

C: Akkublock

D: Optisches Laufwerk (CD / DVD / blu-ray)

E: Festplattenlaufwerk

F: Stahlbleche, Kühlelemente & Lüfter

G: Tastatur

H: Kunststoffteile

Hinsichtlich knapper Ressourcen sind vor allem Leiterplatten (A), der LCD-Bildschirm (B), der Akkublock (C), das Festplattenlaufwerk (D) und das optische Laufwerk (E) relevant¹³.

In den folgenden Kapiteln werden diese Komponenten detailliert hinsichtlich der Gehalte knapper Ressourcen untersucht.

3.1 Edelmetalle

Notebooks beinhalten verschiedene Leiterplatten, die mit verschiedenen elektronischen Komponenten sowie Steckverbindungen bestückt sind. Sowohl in den Komponenten, als auch in den Steckverbindungen und Lötungen sind relevante Mengen an Edelmetallen enthalten. Die folgende Liste gibt einen Überblick über die Hauptanwendung von Edelmetallen in bestückten Leiterplatten:

- Gold: Kontakte, Bonding-Drähte, Mikrochips
- Silber: (bleifreie) Lote
- Palladium: Kondensatoren

Gold, Silber und Palladium werden im Raffinerieprozess mit hoher Effizienz zurück gewonnen. Da die Vergütung der Kupfer- und Edelmetallhütten an den Materialwert der gelieferten Leiterplatten gekoppelt ist, liegen sehr genaue Analysedaten für verschiedene Arten bestückter Leiterplatten vor.

Tabelle 15 Gewicht und Edelmetallkonzentrationen von Leiterplatten in Notebooks

Komponente	Gewicht pro Einheit [g] ¹⁴	Ag [mg/kg]	Au [mg/kg]	Pd [mg/kg]	Datenquelle
Hauptplatine	310	800	180	80	Umicore 2011
Speicherkarten	20	1.650	750	180	Umicore 2011
Kleine Leiterplatten	28	800	180	80	Umicore 2011
Leiterplatte der Festplatte	12	2.600	400	280	Umicore 2011
Leiterplatte des optischen Laufwerks	25	2.200	200	70	Umicore 2011
Leiterplatte aus Display	37	1.300	490	99	Chancerel & Rotter 2009

Mit Hilfe der Daten aus Tabelle 15 kann die Gesamtmenge in den Leiterplatten eines Notebooks abgeschätzt werden:

¹³ Die verbleibenden Komponenten sind teilweise hinsichtlich weniger kritischer Rohstoffe relevant. So sind die Gehäuseteile von Notebooks z.T. mit Kupferfolien ausgekleidet die in den gängigen Vorbehandlungsverfahren nicht sauber vom Kunststoff getrennt werden können.

¹⁴ Datenquellen der Gewichtsangaben: Eigene Recherchen und Messungen des Öko-Instituts.

Tabelle 16 Edelmetallmengen in den Leiterplatten eines Notebooks

	Ag [mg]	Au [mg]	Pd [mg]
Hauptplatine	248	56	25
Speicherkarten	33	15	4
Kleine Leiterplatten	22	5	2
Leiterplatte der Festplatte	31	5	3
Leiterplatten des optischen Laufwerks	55	5	2
Leiterplatte aus Display	48	18	4
Gesamt	438	104	39

Neben der Leiterplatte weisen zudem die Festplattenscheiben gewisse Edelmetallkonzentrationen auf. Diese befinden sich überwiegend auf der Oberfläche der Datenträger. In Notebooks kommen überwiegend Festplatten im 2,5-Zoll Format zum Einsatz. Einige neuere Geräte sind allerdings mit halbleiterbasierten Flashspeichern ausgestattet. Diese, als *Solid State Disk (SSD)* bezeichneten Speichermedien liegen noch preislich über den Festplatten und erreichen zudem noch nicht dieselbe Speicherkapazität. Sie weisen allerdings den Vorteil auf, dass sie hinsichtlich physischer Beanspruchung (Schläge, Stöße) weniger anfällig sind. Zudem benötigen sie weniger Strom in Betrieb, was insbesondere bei Mobilgeräten hinsichtlich der Erhöhung der Akkulaufzeit Vorteile aufweist. Bei tendenziell sinkenden Stückpreisen und höheren Speicherkapazitäten ist davon auszugehen, dass Notebooks in Zukunft vermehrt mit SSD ausgestattet werden¹⁵.

Generell können die Festplattenscheiben hinsichtlich ihres Trägermaterials in glas- und aluminiumbasierte Scheiben unterteilt werden. Während aluminiumbasierte Scheiben zumeist in 3,5-Zoll-Formaten zur Anwendung kommen, sind 2,5-Zoll-Festplatten zumeist mit zwei oder drei glasbasierten Scheiben ausgestattet¹⁶. Das Gewicht einer einzelnen glasbasierten Scheibe im 2,5-Zoll-Format beträgt in etwa 4,8g.

Für die Edelmetalle liegen Analysedaten von Umicore für beide Typen vor:

Tabelle 17 Edelmetallkonzentration von Festplattenscheiben

	Ag [mg/kg]	Au [mg/kg]	Pt [mg/kg]	Pd [mg/kg]	Rh [mg/kg]	Ru [mg/kg]
Aluminiumbasiert	850	21	0	14	0	<7
Glasbasiert	<3	<6	38	<2	<3	<6

Quelle: Umicore 2011

¹⁵ Zur Materialzusammensetzung von Solid State Disks liegen derzeit noch keine verlässlichen Daten vor. Hinsichtlich kritischer Rohstoffe kann aber davon ausgegangen werden, dass diese halbleiterbasierten Speicher vor allem hinsichtlich der Edelmetalle relevant sind. Die Auswirkung auf die Gesamt mengen an Edelmetallen in Notebooks kann derzeit nicht ermittelt werden. Da aber gleichzeitig edelmetallhaltige Bauteile wegfallen (Leiterplatte der Festplatte), wird vereinfachend von einer gleichbleibenden Edelmetallmenge ausgegangen. Veränderungen ergeben sich allerdings für die Gehalte an Seltenen Erden, da SSD-Laufwerke ohne entsprechende Permanentmagnete auskommen (siehe Kapitel 3.4).

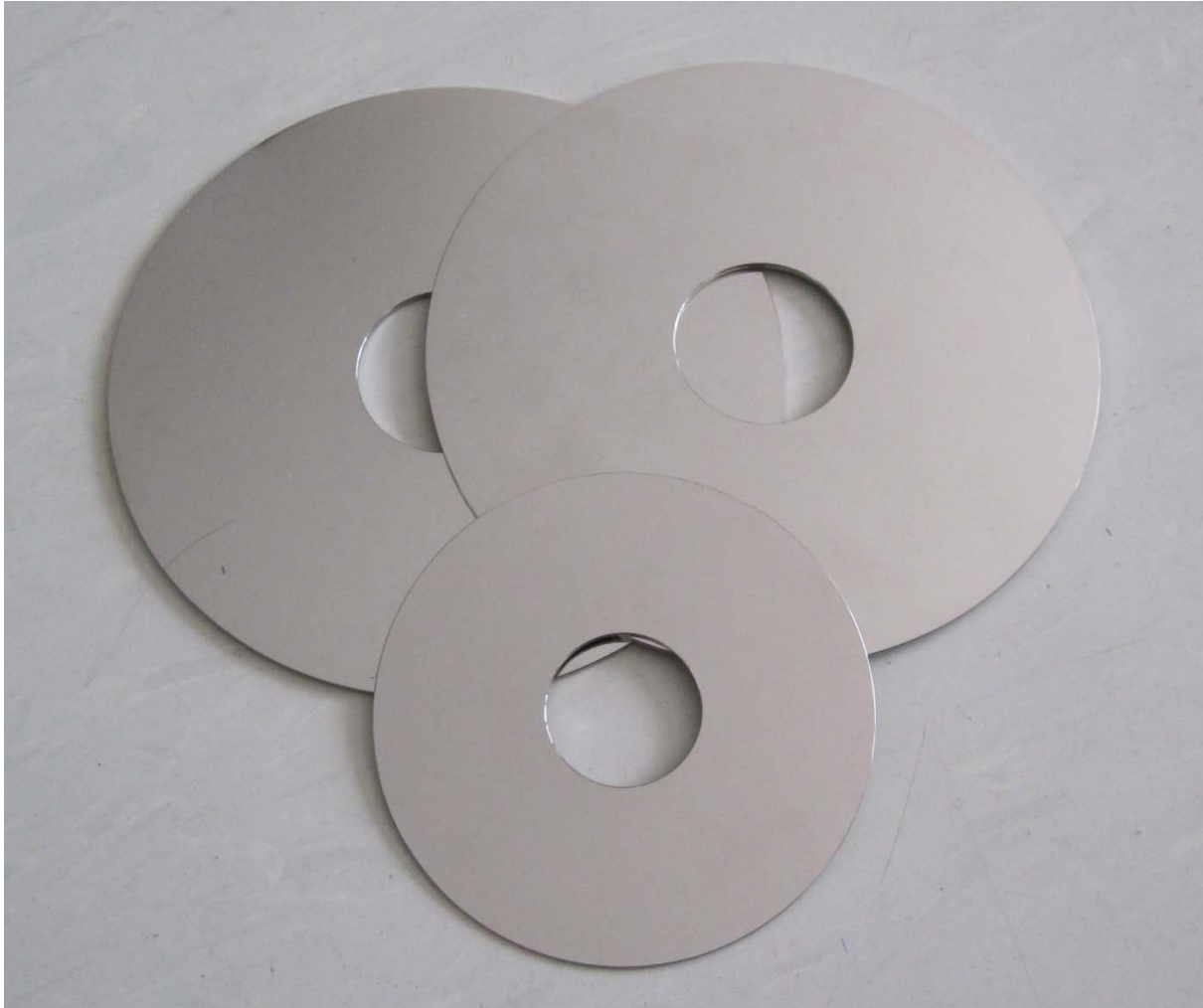
¹⁶ Da Festplatten mit zwei Datenscheiben flachere Bauformen aufweisen als Festplatten mit drei Scheiben, kommen bei modernen dünnen Notebooks vor allem Festplatten mit zwei Datenscheiben zum Einsatz.

Insgesamt können daher für Notebook-Festplattenscheiben folgende Gesamtkonzentrationen abgeschätzt werden:

Tabelle 18 Edelmetallmengen in den Festplattenscheiben eines Notebooks

Ag [mg]	Au [mg]	Pt [mg]	Pd [mg]	Rh [mg]	Ru [mg]
< 0,1	< 0,1	0,4	< 0,1	< 0,1	< 0,1

Abbildung 9 Festplattenscheiben im 3,5- und 2,5-Zoll-Format (eigene Aufnahme Öko-Institut)

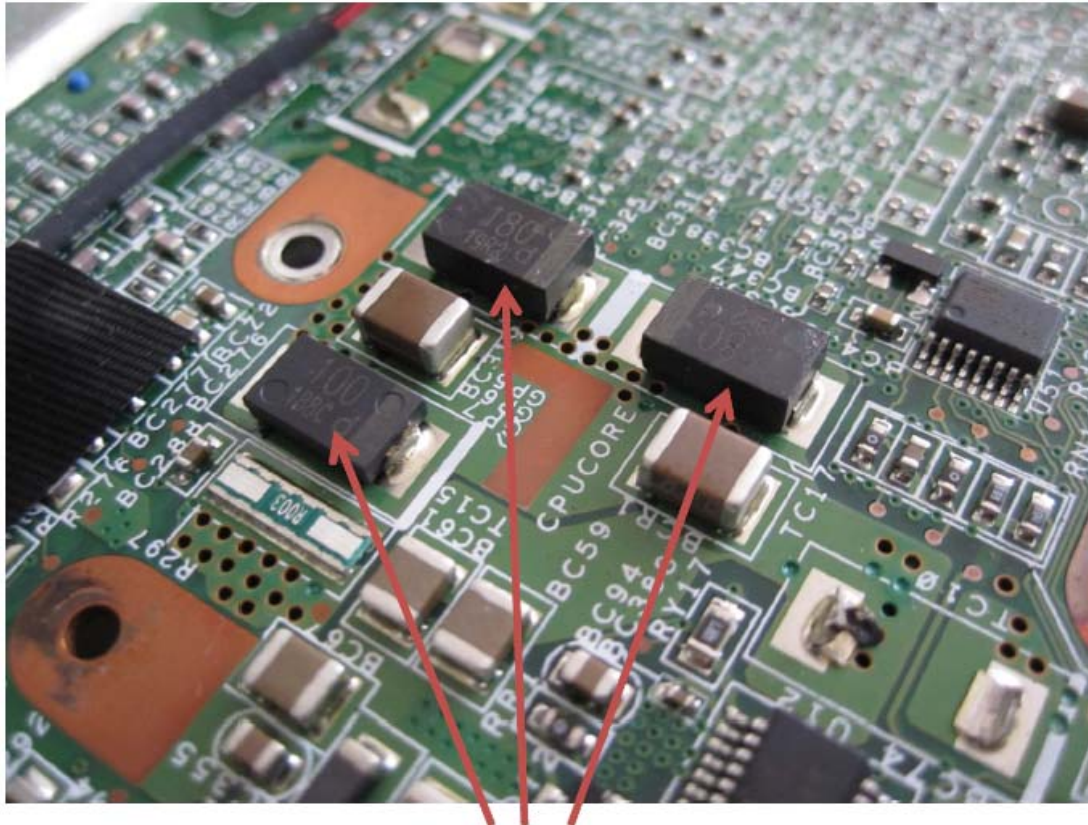


3.2 Tantal

Zusätzlich zu den Edelmetallen beinhalten bestückte Leiterplatten noch eine Vielzahl weiterer Metalle. Hinsichtlich kritischer Rohstoffe ist dabei vor allem Tantal von gewisser Relevanz. Tantal kommt in Kondensatoren mit hoher Kapazität zum Einsatz. Da Tantal in den Raffinerieprozessen für Edelmetalle nicht zurück gewonnen werden kann, liegen keine zu Tabelle 15 und Tabelle 16 vergleichbaren Daten vor. Zwar geben ältere Quellen einen Gewichtsanteil von 0,0157% oder 4,71g für einen Desktop PC an (ACRR ohne Datum), die

Grundlage dieses Werts ist aber weitgehend unbekannt. Zudem bezieht sich dieser Wert auf Gerätegenerationen der 90er Jahre und sollte deshalb mit großer Vorsicht behandelt werden.

Abbildung 10 Tantal-Kondensatoren auf der Hauptplatine eines Notebooks (eigene Aufnahme Öko-Institut)



Ta-Kondensatoren

Andererseits ist bekannt, dass Ta-Kondensatoren typischerweise Ta-Konzentrationen zwischen 24,4% und 42,6% und einem Mittelwert von 36,7% aufweisen (ZVEI 2003). Im Post-Consumer-Recycling von Ta-Kondensatoren wurde ein Ta-Gewichtsanteil von 28% ermittelt (Schöps 2011). Auf allen Leiterplatten eines Notebooks konnten Ta-Kondensatoren mit einem Gesamtgewicht von 4,63g identifiziert werden, was - bei einem mittleren Ta-Gehalt von ca. 36,7% einen Ta-Gesamt von in etwa 1,7g entspricht. Dabei ist anzumerken, dass in der Analyse nur Kondensatoren ab einer Mindestgröße von ca. 2 x 2 x 3mm berücksichtigt wurden. Werden zudem alle kleineren Ta-Kondensatoren berücksichtigt, liegt der Ta-Gehalt u.U. geringfügig höher. Des Weiteren ist anzumerken, dass – je nach Rohstoffpreisen – Ta-Kondensatoren auch teilweise durch andere Kondensatortypen substituiert werden können. Somit ist davon auszugehen, dass der Ta-Gehalt von Notebooks je nach Baujahr und Gerätegeneration stark variiert.

3.3 Indium

Indium kommt in Form von Indium-Zinn-Oxid (ITO) in LCD-Displays vor. Die Datenlage und Unsicherheiten beim Indium-Gehalt von Displays sind in Kapitel 2.1 näher beschrieben. Im Weiteren wird mit einem Indium-Gehalt von 700mg/m² LCD-Displayfläche ausgegangen.

Bei einer Displayfläche von 552cm² bei einem 14-Zoll-LCD-Bildschirm beträgt somit der Gesamtindiumgehalt in etwa 39mg.

3.4 Seltene Erden

Seltene Erden werden in Notebooks vor allem in Permanentmagneten und Leuchtmitteln eingesetzt. Die Seltenen Erden in den Leuchtmitteln des Displays werden ausführlich in Kapitel 2.2 behandelt.

Permanentmagnete auf Basis Seltener Erden – auch als Neodym-Eisen-Bor (NIB) Magnete bezeichnet – kommen in Notebooks in folgenden Komponenten zum Einsatz:

- Schwingspulenbetätiger der Festplatte (siehe Abbildung 11)
- Spindelmotor der Festplatte (siehe Abbildung 12)
- Spindelmotor des optischen Laufwerks (siehe Abbildung 12)¹⁷
- Lautsprecher

Die Gewichte der Magnete sind in Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19 Anwendungen und Gewicht von Seltenen-Erd-Magneten in Notebooks.

Magnetanwendung	Anzahl der Magnete pro Notebook	Durchschnittliches Gesamtgewicht pro Notebook [g]
Schwingspulenbetätiger einer 2,5-Zoll-Festplatte	meist 2, seltener 1	3,0
Spindelmotor der Festplatte	1 Ringmagnet	1,1
Spindelmotor des optischen Laufwerks	1 Ringmagnet	1,6
Lautsprechermagnete	2	2,5

Die Seltenen Erden Gehalte dieser Magnete werden von VAC (2011) wie folgt angegeben:

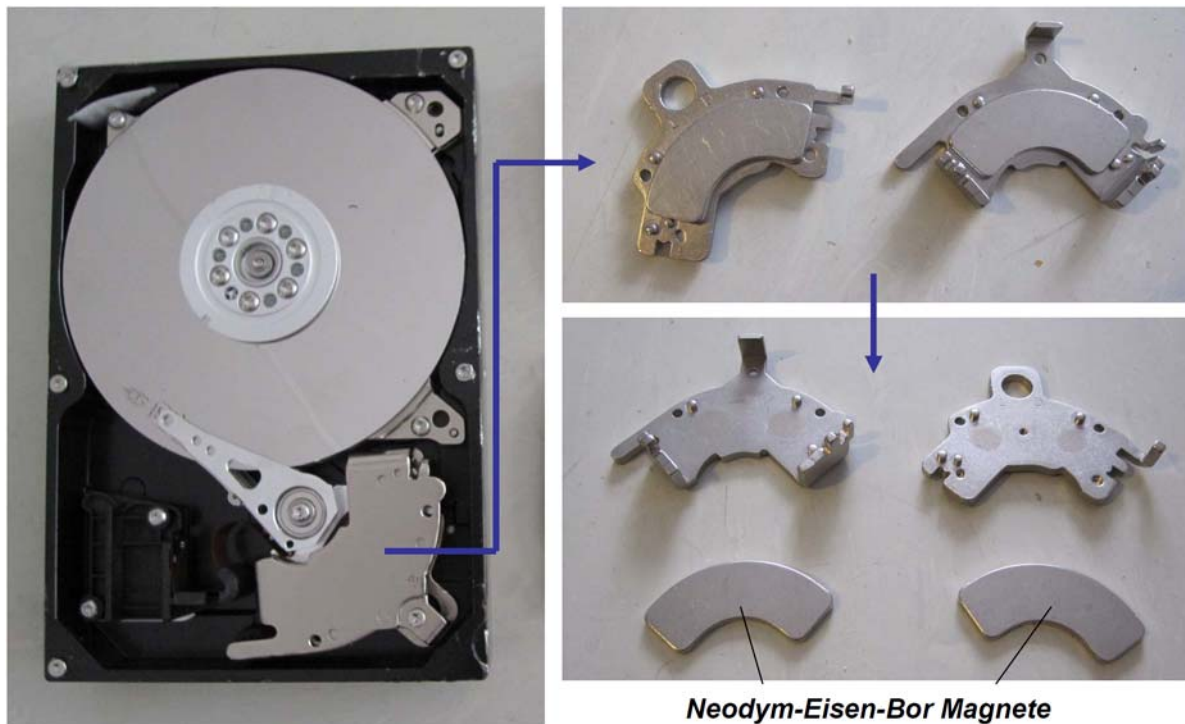
Tabelle 20 Seltene Erden Konzentrationen von Magneten in Notebooks

	Nd [%]	Pr [%]	Dy [%]
Magnete des Schwingspulenbetätigers	zusammen 29%		2%
Ringmagnet e der Spindelmotoren	29%	0%	0%
Magnete der Lautsprecher	zusammen 31%		0%

Quelle: VAC 2011

¹⁷ Beim optischen Laufwerk wird aus technologischer Sicht in CD-, DVD und blu-ray-Laufwerke unterschieden. Bauform und prinzipieller mechanisch-elektronischer Aufbau unterscheiden sich allerdings nur geringfügig, sodass die hier ermittelten Werte repräsentativ für alle Typen angesehen werden können.

Abbildung 11 Seltene Erden Magnete des Schwingspulenbetätigers (eigene Aufnahmen Öko-Institut)



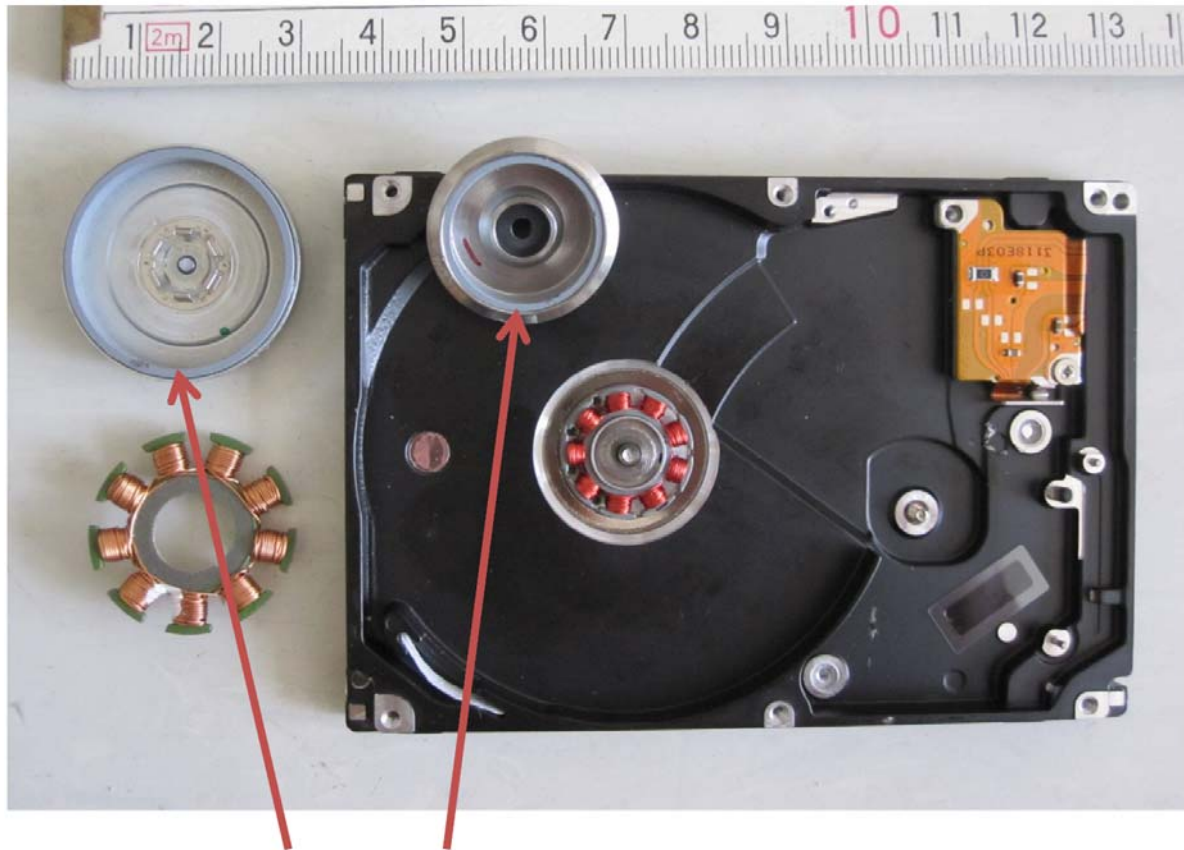
Bezüglich der Angaben zu Neodym und Praseodym in den Magneten des Schwingspulenbetätigers und der Lautsprecher ist anzumerken, dass Neodym von manchen Herstellern aus Preisgründen teilweise durch das etwas günstigere Praseodym substituiert wird. Dies ist aber laut Hatch (2011) nur bis zu einem Mischverhältnis von maximal 3:1 sinnvoll, da bei höheren Praseodymgehalten die Eigenschaften der Magnete leiden würden. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass das durchschnittliche Verhältnis aus Neodym zu Praseodym 5:1 beträgt.

Insgesamt können daher für Magnete in Notebooks folgende Konzentrationen abgeschätzt werden:

Tabelle 21 Seltene Erden Gehalte von Magneten in Notebooks

	Nd [mg]	Pr [mg]	Dy [mg]
Magnete des Schwingspulenbetätigers	725	145	60
Ringmagnet des Spindelmotors der Festplatte	319	0	0
Ringmagnet des Spindelmotors im optischen Laufwerk	464	0	0
Magnete der Lautsprecher	646	129	0
Gesamt	2.136	274	60

Abbildung 12 Geöffnete Spindelmotoren mit Ringmagneten von optischem Laufwerk (links) und Festplatte (rechts), (eigene Aufnahme Öko-Institut)



Ringmagnete von Spindelmotoren

3.5 Kobalt

Kobalt kommt vor allem in den Notebook-Akkus zum Einsatz. Der Akkublock von Notebooks ist in der Regel mit sechs bis acht Lithium-Ionen-Batteriezellen ausgestattet (siehe Abbildung 13).

Andere Batterietypen wie z.B. NiMH spielen bei Notebooks nur noch eine untergeordnete Rolle. Die positive Elektrode von Lithium-Ionen-Zellen von Notebooks besteht in aller Regel aus Lithium-Kobalt-Oxid (LiCoO_2) (Lauwigi et al. 2011). Zwar können sich je nach Technologie und Bauform Variationen hinsichtlich des Kobaltgehaltes ergeben, Hagelücken & Buchert (2008) geben aber einen Durchschnittsgehalt von 65g pro Akkublock eines Notebooks an. Diese Angabe wird durch Analysewerte von Umicore Battery Recycling (2011) gestützt, nach denen gemischte Lithium-Ionen-Akkublöcke kleiner und mittlerer Größen einen durchschnittlichen Kobalt-Anteil von 13,8% aufweisen. Bei einem Stückgewicht von ca. 350g pro Notebook-Akkublock liegt demnach der Co-Gehalt mit knapp 50g in der gleichen Größenordnung.

Abbildung 13 Batteriezellen des Akkublocks (eigene Aufnahme Öko-Institut)

3.6 Zusammenfassung kritische Metalle in Notebooks

Die Ergebnisse der Analysen aus Kapitel 3.1 bis 3.5 sind in Tabelle 23 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Werte vor allem orientierenden Charakter haben und keinesfalls auf alle Einzelmodelle und Größen anwendbar sind. So leiten sich viele Werte von Messungen an Altgeräten ab. Aufgrund veränderten Produktdesigns können sich hier bei neueren Gerätegeneration Verschiebungen ergeben, die in diesen Daten noch nicht berücksichtigt werden konnten, da sie vielfach der betrieblichen Geheimhaltung unterliegen bzw. noch nicht in aggregierter Weise für ein Durchschnittsprodukt berechnet wurden. Bei den Hochrechnung zu den im Jahre 2010 in Deutschland verkauften Geräten (Tabelle 23) wurde berücksichtigt, dass die Hintergrundbeleuchtung der neu verkauften Notebooks teils auf Basis von CCFL-Röhren, teils mittel weißer LEDs ausgestattet ist. Tabelle 22 fasst die für diese Hochrechnungen verwendeten Größen zusammen. Für die Absatzzahlen von Notebooks und den Marktanteil neuer Notebooks mit LED-Hintergrundbeleuchtung wurden dabei die in Abschnitt 2.2 angeführten Werte zugrunde gelegt. Die durchschnittliche Anzahl der in einem LCD-Notebook-Display verbauten weißen LEDs ist herstellerspezifisch. Daher liegen keine allgemeingültigen Angaben vor. Ausgehend von exemplarischen Falluntersuchungen zu verschiedenen Technologien der Hintergrund-Beleuchtungen in LCD-Displays (Young 2011) scheint jedoch eine Annahme von 50 WLEDs pro Notebook-Display ein orientierender Wert zu sein.

In Tabelle 23 sind die Gehalte kritischer Rohstoffe der in Deutschland 2010 verkauften Notebooks aufgeführt. Kobalt (über 460 Tonnen/a), Neodym (gut 15 Tonnen/a), Tantal (gut 12 Tonnen/a), Silber (gut 3 Tonnen/a) und Praseodym (fast 2 Tonnen/a) weisen die höchste Mengenrelevanz auf. Aber auch Indium, die Edelmetalle Gold, Palladium und Platin sowie weitere Seltene Erden wie Dysprosium sind für die Recyclingwirtschaft von Interesse.

Tabelle 22 Absatzzahlen von privat genutzten Notebooks (Deutschland 2010), der Marktanteil von Geräten mit Hintergrundbeleuchtung mittels weißer LEDs (WLEDs) und die angenommene Anzahl der pro Gerät in der Hintergrundbeleuchtung verbauten WLEDs (siehe auch Abschnitt 3.7)

Gerätekategorie	Anzahl der 2010 in D verkauften Geräte ¹⁸	Marktanteil Hintergrundbeleuchtung mit WLED in 2010	Anzahl WLEDs pro Gerät
Notebook (privater Sektor)	7.097.000	90%	50

Tabelle 23 Durchschnittlicher Gehalt kritischer Rohstoffe in Notebooks (inkl. LCD-Monitor)

Metall		Gehalt je Notebook (CCFL ¹⁹) [mg]	Gehalt je Notebook (LED ²⁰) [mg]	Gehalt in allen 2010 in D verkauften Notebooks [kg]	Vorkommen
Kobalt	Co	65.000	65.000	461.305	Lithium-Ionen-Akkus (100%)
Neodym	Nd	2.100	2.100	15.159	Spindelmotoren (37%), Schwingspulenbetätiger (34%), Lautsprecher (30%)
Tantal	Ta	1.700	1.700	12.065	Kondensatoren der Hauptplatine (90%), Kondensatoren sonstiger Leiterplatten (10%)
Silber	Ag	440	440	3.106	Hauptplatine (57%) sonstige Leiterplatten (43%)
Praseodym	Pr	270	270	1.945	Schwingspulenbetätiger (53%), Lautsprecher (47%)
Gold	Au	100	100	736	Hauptplatine (54%) sonstige Leiterplatten (46%)
Dysprosium	Dy	60	60	426	Schwingspulenbetätiger (100%),
Indium	In	40	40	286	Display & Hintergrundbeleuchtung (100%)
Palladium	Pd	40	40	280	Hauptplatine (64%) sonstige Leiterplatten (36%)
Platin	Pt	4	4	28,40	Festplattenscheiben (100%)
Yttrium	Y	1,80	1,60	11,50	Hintergrundbeleuchtung (100%)
Gallium	Ga	0,00	1,60	10,30	LED-Hintergrundbeleuchtung (100%)
Gadolinium	Gd	0,01	0,75	4,80	Hintergrundbeleuchtung (100%)
Cer	Ce	0,08	0,10	0,69	Hintergrundbeleuchtung (100%)
Europium	Eu	0,13	0,03	0,28	Hintergrundbeleuchtung (100%)
Lanthan	La	0,11	0,00	0,08	CCFL-Hintergrundbeleuchtung (100%)
Terbium	Tb	0,04	0,00	0,03	CCFL-Hintergrundbeleuchtung (100%)

Es ist unbedingt hervorzuheben, dass dies nur das Potenzial der an private Kunden verkauften Notebooks umfasst; d.h. die Gesamtzahl an verkauften Notebooks (wichtige Gerätegruppe für den Businessbereich) ist in Deutschland pro Jahr noch erheblich höher als

¹⁸ Diese Verkaufszahlen umfassen nur den privaten Sektor!

¹⁹ mit CCFL-Hintergrundbeleuchtung (2010 ca. 10% aller neuen Notebooks)

²⁰ mit LED-Hintergrundbeleuchtung (2010 ca. 90% aller neuen Notebooks)

die oben genannten 7.097.000 Einheiten im Jahr 2010 und damit das Gesamtpotenzial an kritischen Metallen. Schließlich ist hervorzuheben, dass z.B. Kupfer in erheblich größeren Mengen in Notebooks enthalten ist. Kupfer spielt sowohl aus technischen Gründen (Sammlermetall für Edelmetalle im Refining) als auch aus ökonomischen Gründen in der Recyclingwirtschaft eine wichtige Rolle. Insgesamt bestätigen die Daten für Notebooks das große Potenzial dieser Produktklasse für Recycling von kritischen Metallen.

3.7 Marktdaten Notebooks

Der Markt für Notebooks und andere mobile Endgeräte ist zeitlich sehr variabel, unter anderem weil er vor allem durch die private Nachfrage gesteuert wird. Diese reagiert sehr sensibel auf Preisveränderungen, technische Neuerungen und das Auftreten neuer Produktklassen auf dem Markt, wie den Tablet-PCs und Smartphones. In den letzten Jahren haben sich Notebooks und andere mobile Endgeräte zu den treibenden Größen auf dem deutschen Markt für Computer entwickelt. Seit 2005 ist der Absatz an den mobilen Computern im privaten Bereich nach CEMIX (2011) um etwa den Faktor 3-4 gestiegen und betrug im ersten Quartal Anfang 2011 etwa 1,8 Millionen Stück, im Vergleich zu einem Absatz von etwa 630.000 Geräten im gleichen Quartal in 2007 (siehe Abbildung 14). Der mittlere Preis eines Notebooks sank im gleichen Zeitraum um rund die Hälfte, was mit einer immer leistungsfähigeren Ausstattung der Geräte die Nachfrage angetrieben hat. Insgesamt wurden in Deutschland im Jahr 2010 im Privatsektor 7.097.000 Notebooks verkauft (siehe Tabelle 24), wobei in diese Statistik die in diesem Jahr erstmalig auf dem Markt verfügbaren Tablet-PCs eingeschlossen sind (CEMIX (2011)). Die Dominanz der Notebooks ist nicht auf den privaten Konsumsektor beschränkt: Nach Auskunft des Marktforschungsunternehmens Gartner stellen auch bei Einschluss des Geschäftssektors Notebooks etwa 68% der etwa 9 Millionen in Deutschland verkauften Computer dar (Gartner 2011a). Dabei ist zu berücksichtigen, dass Gartner im Unterschied zu CEMIX die Tablet-PCs aus der Statistik für Computer ausschließt.

Tabelle 24 Absatz und Durchschnittspreise für Notebooks auf dem deutschen Markt (privater Sektor) in 2010, nach CEMIX (2011)

Produktgruppe	Notebook
Absatz 2010 in 1000 Stück	7.097
Veränderung gegen 2009	12,3%
Durchschnittspreis in 2010 [€] ²¹	583

²¹ Inkl. Mehrwertsteuer

Abbildung 14 Verkaufszahlen, mittlerer Preis (inkl. Mehrwertsteuer) und Umsatz von Notebooks pro Quartal (nur privater Sektor), nach CEMIX

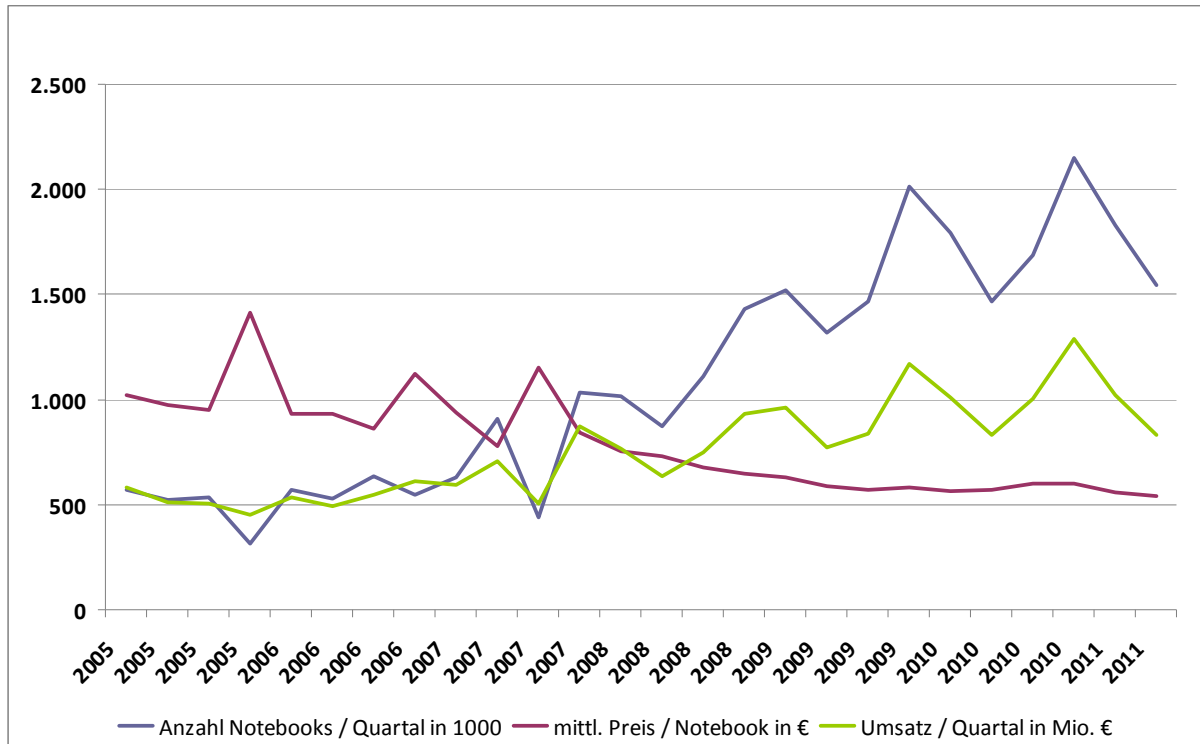
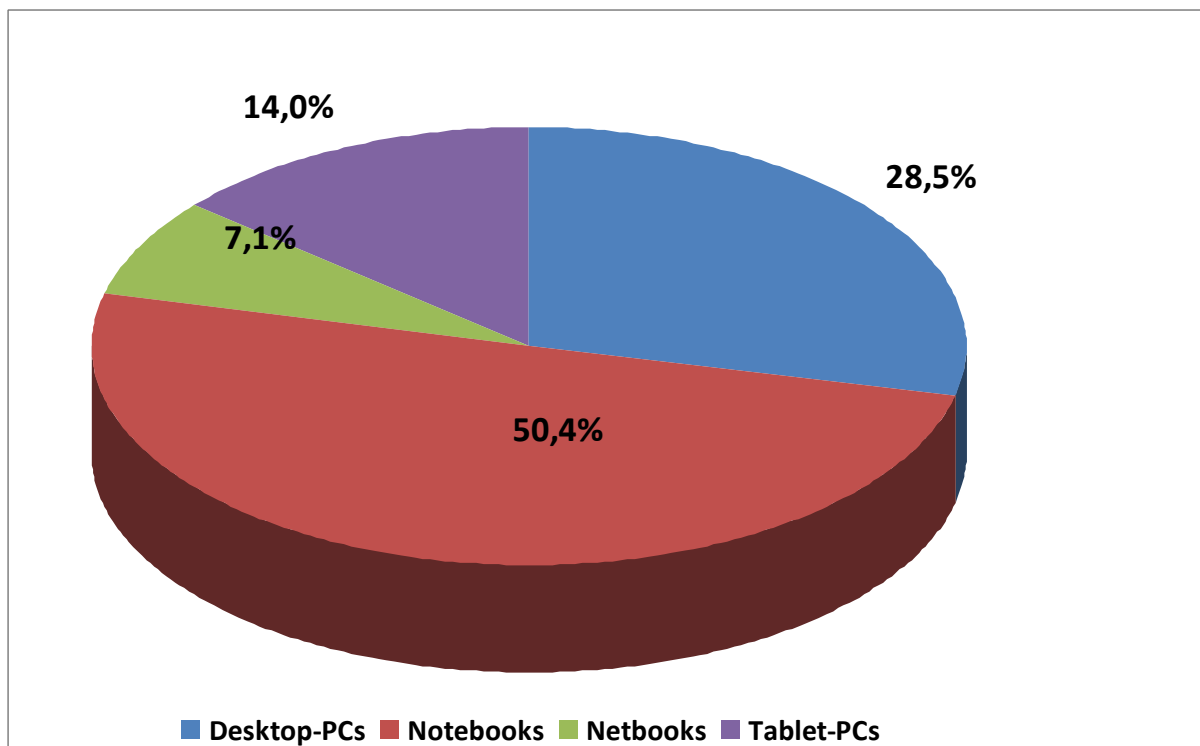


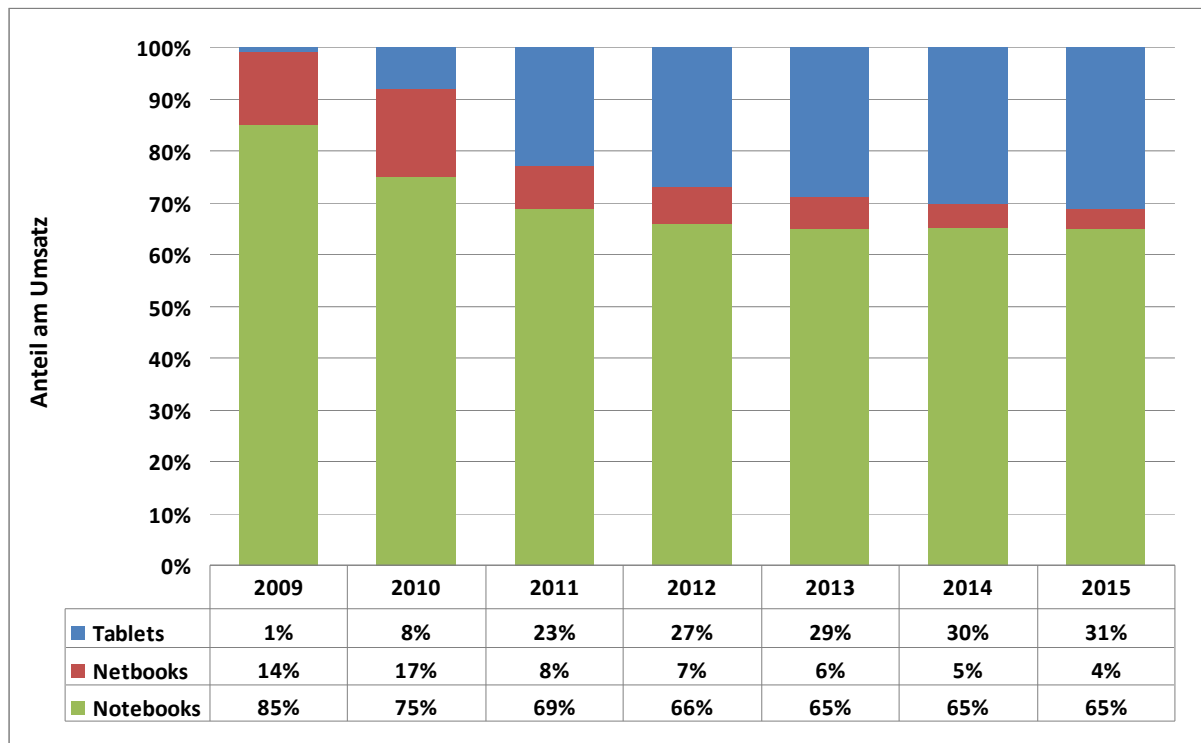
Abbildung 15 Anteile verschiedener Computer-Bauformen auf dem deutschen Markt, 2. Quartal 2011 (nach Heise 2011)



Diese erobern jedoch seit etwa Mitte 2010 zusammen mit Smartphones den Markt der mobilen Computer. Nach Young (2011) wurden bereits 2010 weltweit bereits 8% der Umsätze durch Tablet-PCs erzielt (siehe Abbildung 16), in Deutschland hatten sie im zweiten Quartal 2011 einen Marktanteil von bereits 14% (siehe Abbildung 15). Auf klassische Desktop-PCs fielen in Deutschland dagegen nur noch von 28,5%, auf Notebooks 50,4% und auf Netbooks 7,1%. Bezogen nur auf das klassische PC-Business liegen Note- und Netbooks bei zusammen rund zwei Dritteln (Heise 2011, in Übereinstimmung mit Gartner 2011a).

Es besteht für die Tablet-PCs nach Young (2011) eine Aussicht auf einen Anteil von bis zu 30% im Jahr 2013 (siehe Abbildung 16). Der Markt für Netbooks, der 2010 noch für ca. 17% des weltweiten Umsatzes verantwortlich war, scheint dagegen bereits in die Sättigung über zu gehen. Es wird erwartet, dass der Anteil am Umsatz bis 2013 auf nur noch ca. 5% sinkt (Young 2011). In dieser Entwicklung äußert sich auch die Entscheidung vieler privater Konsumenten, bei Kaufentscheidungen zunehmend eher einen Tablet-PC anstelle eines Notebooks zu wählen. So brach der Umsatz für Computer im Privatkundenbereich (ohne Tablet-PCs) in Deutschland im dritten Quartal 2011 um 17% gegenüber dem Vorjahr ein. Dabei fiel auf den Notebook-Sektor ein noch größerer Rückgang, während der Absatz von Desktop-PCs etwas stabiler blieb (Gartner 2011b). Auch für den Rest des Jahres 2011 prophezeit Gartner noch keine Erholung des Marktes. So könnten Engpässe bei der Lieferung von Festplatten und anderen elektronischen Bauteilen aufgrund der lang anhaltenden Überschwemmungen in Thailand die Preise für alle Arten von Computer steigen und in Folge die Nachfrage und den Umsatz weiter sinken lassen.

Abbildung 16 Anteile von Notebooks, Netbooks und Tablet-PCs am Umsatz mobiler Rechner (Ab 2011 Projektion; nach Young 2011)



Anders als bei LCD-TV-Geräten werden bei Notebooks schon jetzt hauptsächlich weiße LEDs für die Hintergrundbeleuchtung eingesetzt. Der entsprechende Marktanteil lag weltweit 2010 bei etwa 92% mit immer noch leicht ansteigendem Trend (siehe Abbildung 5, Young 2011). Interessant in Hinblick auf die Verwendung kritischer Rohstoffe ist dabei der Umstand, dass Tablet-PCs eine etwa 60% hellere Hintergrundbeleuchtung als konventionelle Notebooks benötigen. Dadurch werden relativ mehr LEDs pro Gerät benötigt. Auch die immer höhere Auflösung der in den Tablet-PCs verbauten Bildschirme erfordert eine hellere Hintergrundbeleuchtung (Young 2011).

3.8 Lebensdauer und Erfassungsraten Notebooks

Die Lebensdauer von Notebooks wurde im Rahmen des europäischen Ökodesign-Prozesses auf durchschnittlich 5,6 Jahre geschätzt (EuP 2007). In dieser Zahl ist sowohl die Erstnutzung, als auch die Länge einer durchschnittlichen Zweitnutzung enthalten. Im Jahr 2008 wurden in Deutschland 319.983 t der WEEE-Produktkategorie 3 (IT- und Telekommunikationsgeräte) in Verkehr gebracht. Im gleichen Zeitraum wurden 155.007 t dieser Kategorie durch die offiziellen Rücknahme- und Sammelsysteme für das geregelte Recycling und Entsorgung erfasst (BMU 2009). Geht man davon aus, dass diese Werte repräsentativ auf Notebooks übertragen werden können, kann die Erfassungsrate für Notebooks in Deutschland mit knapp 50% abgeschätzt werden²². Über den Verbleib der restlichen Geräte existieren keine belastbaren Daten. Insgesamt kann aber davon ausgegangen werden, dass der Verbleib von Notebooks vergleichbaren Dynamiken unterliegt wie bei Flachbildschirmen (siehe Abschnitt 2.6).

3.9 Stand der Vorbehandlungstechnik für Notebooks

Anhang II der Richtlinie 2002/96/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Januar 2003 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte listet diejenigen Werkstoffe und Bauteile auf, die bei der Entsorgung von Altgeräten selektiv behandelt werden müssen. Bezüglich Notebooks sind dabei folgende Bauteile relevant:

- Leiterplatten mit einer Mindestfläche von 10 cm²;
- Displays einschließlich der verwendeten Gasentladungslampen (ggf. zusammen mit dem Gehäuse)²³;
- Batterien.

²² Dieser Wert beinhaltet allerdings keine zeitliche Verzögerung durch die Nutzungsphase der Geräte. Es handelt sich daher lediglich um einen Schätzwert für die tatsächliche Erfassungsrate.

²³ Hier sieht die Richtlinie einen Schwellwert von 100qcm Displayfläche vor. Alle Displays größer 100qcm, müssen selektiv behandelt werden.

Entsorgungsbetriebe in der EU sind daher gesetzlich verpflichtet, sowohl die Bildschirm-einheit als auch den Akkublock in einem ersten, als „Detoxifizierung“ bezeichneten Schritt manuell zu entnehmen und einer gesonderten Behandlung zuzuführen. Die Hauptplatine wird in vielen Fällen nicht manuell entnommen, sondern zusammen mit den restlichen Gerätekomponenten einer mechanischen Vorbehandlung (i.d.R. Schredder mit anschließender mechanischer Sortierung) zugeführt. Eine tiefer gehende manuelle Zerlegung wird nur in einigen wenigen, zumeist kleineren Betrieben durchgeführt.

Insgesamt führen die gängigen Detoxifizierungsschritte und die mechanische Vorbehandlung und Sortierung zur Erzeugung folgender Fraktionen:

- Lithium-Ionen Akkus (ungeschreddert)
- Displayeinheiten (ungeschreddert)
- Kunststofffraktion (z.T. aufgegliedert nach verschiedenen Polymertypen)
- Stahlfraktion
- Aluminiumfraktion
- Leiterplatten
- Schredderleichtfraktion (Glas, Elastomere, sonstige Materialien)

Die Lithium-Ionen-Akkus werden einem pyrometallurgischen Raffinerieprozess zur Rückgewinnung von Kobalt und zugeführt (siehe Kapitel 6.2). Die Displayeinheiten werden wie in Kapitel 2.7 beschrieben entsorgt. Die Kunststofffraktion, Stahl, Aluminium und Leiterplatten werden an entsprechende Absatzmärkte zur stofflichen Wiederverwertung weitergegeben. Bei der besonders ressourcenrelevanten Leiterplattenfraktion steht die Rückgewinnung von Kupfer, Gold, Silber und Palladium im wirtschaftlichen Vordergrund. Zwar werden in diesem Prozess noch eine Reihe weiterer Metalle mit z.T. guten Rückgewinnungsraten gewonnen, andere kritische Metalle wie z.B. Tantal gehen in diesem Prozess aber verloren (siehe Kapitel 6.1). Eine erfolgreiche Rückgewinnung von Tantal würde eine vorherige Abtrennung und Ausgliederung der Ta-Kondensatoren erfordern, was derzeit nur von sehr wenigen Betrieben pilotweise praktiziert wird (siehe Kapitel 6.5).

Insgesamt muss für die mechanischen Aufbereitungs- und Sortierverfahren angemerkt werden, dass diese die komplexen Materialverflechtungen in nur sehr ungenügender Weise auftrennen können, sodass viele ressourcenrelevante Bauteile und Komponenten nur teilweise in die richtigen Fraktionen sortiert werden. Dies führt bezüglich kritischer Rohstoffe zu sehr hohen Rohstoffverlusten²⁴. So wiesen Chancerel & Rotter (2009) für einen, als weitgehend repräsentativ zu betrachtenden Schredderbetrieb nach, dass in der mechanischen Aufbereitung 74,4% des enthaltenen Goldes und Palladiums und 88,5% des Silbers in Fraktionen verbracht werden, in denen keine Edelmetallrückgewinnung möglich ist. Geht

²⁴ Die Verluste treten dabei v.a. an der Schnittstelle von der Vorbehandlung zu den Raffinerieprozessen auf. Werden rohstoffrelevante Fraktionen wie Fragmente bestückter Leiterplatten in andere Fraktionen (z.B. Aluminium oder Stahl) sortiert, so gehen die darin enthaltenen Edel- und Sondermetalle in den nachgelagerten Raffinerieprozess dissipativ verloren.

man davon aus, dass in einigen Betrieben schonendere Vorbehandlungsmethoden angewandt werden (z.B. manuelle Entnahme der Hauptplatinen), so kann näherungsweise von Edelmetallverlusten von 70% ausgegangen werden.

Den besonders rohstoffrelevanten Festplatten kommt wegen ihrer Datengehalte oftmals eine besondere Aufmerksamkeit in der Entsorgung zu. Insbesondere Firmenkunden machen eine garantierte Datenlöschung oftmals zur Vertragsbedingung für die Entsorgungsbetriebe. Die Datenlöschung kann entweder per Software, starken Magnetfeldern oder durch physische Zerstörung (Schreddern) der Datenträger erfolgen. Insgesamt kann aber davon ausgegangen werden, dass ein gewisser Prozentsatz der Festplatten als gesonderter Abfallstrom behandelt wird.

Hinsichtlich der Rückgewinnung kritischer Rohstoffe aus Festplatten ist von Relevanz, dass die rohstoffrelevanten Fraktionen (v.a. Leiterplatten und Magnete) nur schwer vom sonstigen Material (v.a. Edelstahl und Aluminium) getrennt werden können. Dies liegt insbesondere an der sehr kompakten Bauweise und der Verwendung uneinheitlicher Schraubformate. Hinzu kommt, dass der Festplattendeckel (i.d.R. aus Edelstahl) zusätzlich zu den Schraubverbindungen fest mit dem Aluminiumgehäuse verklebt ist. Dies führt dazu, dass eine manuelle Öffnung von Festplatten und eine sortenreine Trennung der rohstoffrelevanten Bauteile sehr arbeitsintensiv sind und nur zum Teil mechanisiert werden können. Am einfachsten lassen sich noch die Leiterplatten entnehmen, da diese in den meisten Fällen auf die Unterseite der Platten von außen aufgeschraubt sind und somit ohne Öffnung des Deckels abmontiert werden können.

Mögliche Mechanisierungsschritte beinhalten die folgenden Maßnahmen:

- Verwendung von Bohrmaschinen zum Aufbohren von Schraubverbindungen
- Erhitzen der Leiterplatten zum Lösen der Klebverbindung (Scrap 2011)

Aus diesem Grund werden Festplatten von den meisten Entsorgungsbetrieben zusammen mit anderen Geräteteilen einer mechanischen Zerkleinerung und Sortierung zugeführt, sodass ein Großteil der darin enthaltenen kritischen Rohstoffe im weiteren Prozess dissipativ verloren gehen. Während die Verluste bei Edelmetallen auf über 70% geschätzt werden können (siehe Ausführung auf vorheriger Seite), liegen die Verluste bei Seltenen Erden bei 100%, da die Magnete in der Sortierung an Stahlteilen anhaften und somit vollständig in die Stahlfraktion sortiert werden.

3.10 Optimierungspotenziale in der Recyclingkette

Aus Gründen des Ressourcenschutzes ist eine möglichst tiefe manuelle Zerlegung von Notebooks zu empfehlen. Neben der gesetzlich vorgeschriebenen Detoxifizierung (Entnahme der Displays und der Akkus) sollten dabei v.a. die bestückte Hauptplatine sowie ggf. die Leiterplatten der Laufwerke und Festplatten entnommen und einer sachgerechten Verwertung zugeführt werden (siehe Kapitel 6.1).

Zudem kommt der Verwertung der Festplatten aus Ressourcenschutzgründen eine besondere Bedeutung zu: Nach Kara et al. (2010) wurden 2008 über 30% des weltweit verwendeten Neodyms für Festplattenmagnete aufgewendet. Im Jahr 2003 lag der Anteil noch

bei etwa 35%. Dies hat zur Folge, dass Festplatten eine bedeutende potenzielle Sekundärrohstoffquelle für Neodym (und teilweise auch Praseodym und Dysprosium) darstellt. Dies ist daher relevant, da andere neodymhaltige Applikationen wie Windturbinen, Hybrid- und Elektrofahrzeuge derzeit noch nicht in größerem Umfang das End-of-Life-Stadium erreicht haben.

So ist generell zu empfehlen, Festplatten – soweit wirtschaftlich möglich – einer manuellen Demontage zuzuführen (siehe Kapitel 3.9). Neben der Entnahme der Magnete würde diese Maßnahme auch zu einer deutlichen Qualitätssteigerung bei der Aluminium-, Edelstahl- und Leiterplattenfraktion führen. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass großformatige Festplatten deutlich größere Mengen an relevanten Rohstoffen enthalten als Notebook-Festplatten. Die manuelle Demontage sollte deshalb primär auf 3,5-Zoll-Festplatten (Festplatten aus Desktop-PCs und Rechenzentren) fokussiert sein²⁵.

Da die stoffliche Verwertung von Seltenen Erden aus Magneten noch nicht im industriellen Maßstab etabliert ist (siehe Kapitel 6.3), sollten die dadurch erhaltenen Magnete zwischengelagert werden.

²⁵ Während 2,5-Zoll Festplatten ein Durchschnittsgewicht von 109g aufweisen, wiegen 3,5-Zoll Festplatten 529g (eigene Messung an fünf 2,5-Zoll- und zehn 3,5-Zoll Festplatten).

4 Smartphones

Smartphones haben in den letzten drei Jahren bis heute mit hohem Tempo vielfach die klassischen Mobiltelefone ersetzt. Mobiltelefone werden in vielen Veröffentlichungen zu kritischen Metallen gerne als Beispiele angeführt, da sie, wenn auch meist in geringen absoluten Mengen, zahlreiche Metalle, davon viele kritische Metalle enthalten (UNEP 2009). Dies gilt nicht weniger für Smartphones, die gegenüber klassischen Mobiltelefonen zahlreiche zusätzliche neue Anwendungen („Apps“) für den Nutzer bereithalten – und dies bei einem vergleichsweise geringen Gewicht und Volumen. Entsprechende Leistungsfähigkeiten von elektronischen Geräten gehen oft mit einem relativ hohen Gehalt an Spezial- und Edelmetallen einher. Im Rahmen eines derzeit noch laufenden Projekts zu Smartphones wurden folgende Metalle bzw. Metallgruppen aus der Liste der „EC 14-Metalle“ als relevant für Smartphones identifiziert (prosuite 2011):

- Kobalt,
- Gallium,
- Indium,
- Niob,
- Tantal,
- Wolfram,
- Platingruppenmetalle und
- Seltene Erden.

Hinzu kommen auf jeden Fall noch Metalle wie Kupfer, Nickel, Blei, Bismut, Lithium (Akku) und nicht zuletzt die wichtigen Edelmetalle Silber und Gold. Von den kritischen Metallen können die Seltenen Erden dem Permanentmagneten, Kobalt dem Akku, Indium dem LCD-Display und Tantal, Gallium sowie die Edelmetalle der bestückten Leiterplatte zugeordnet werden (prosuite 2011). Quantitative Daten für den Gehalt kritischer Metalle konnten trotz intensiver Recherche für Smartphones nicht ermittelt werden. Es wird im Zusammenhang mit Smartphones jedoch auf den zukünftig steigenden Galliumbedarf für immer leistungsfähigere Prozessoren (GaAs oder GaN) hingewiesen (Achzet 2001).

Daher wird für einige wichtige Edelmetalle auf Erfahrungswerten von Mobiltelefonen aufgesetzt. Recyclingexperten gehen jedoch davon aus, dass die relativen Gehalte in Smartphones eher höher liegen (Umicore 2011), d.h. die folgenden Angaben für Edelmetallgehalte sind als konservativ aufzufassen. Die Edelmetalle sind aufgrund ihres hohen Wertes und relativ hohen Gehaltes der wesentliche Treiber für das Recycling von Mobiltelefonen und damit auch für das zukünftige Recycling von Smartphones.

4.1 Edelmetalle

Hagelüken und Buchert (2008) geben auf Basis von Analysewerten von Umicore für Mobiltelefone folgende Edelmetallgehalte²⁶ je Gerät an:

- Silber: 250 mg
- Gold 24 mg
- Palladium 9 mg

Unter der Annahme eines durchschnittlichen Gewicht eines Mobiltelefons (ohne Akku) von 90 g und des durchschnittlichen Gewichts eines Smartphones von 110 g (ebenfalls ohne Akku) kann auf den Mindestgehalt an Edelmetallen in Smartphones linear skaliert werden:

- Silber: 305 mg
- Gold 30 mg
- Palladium 11 mg

Diese Edelmetallmengen je Einheit mögen gering erscheinen. Es sei jedoch am Beispiel von Palladium darauf verwiesen, dass mit 100 ppm der Palladiumgehalt in Mobiltelefonen/Smartphones mindestens 10 mal so hoch ist als in den natürlichen Erzen, die zum Abbau von Platingruppenmetallen herangezogen werden. Weiterhin bieten sich durch das Recycling von Smartphones viele Synergien durch die mögliche Rückgewinnung von weiteren Metallen wie Kupfer, Blei, Nickel, Bismut etc.

4.2 Indium, Gallium, Tantal

Es liegen keine quantitativen Daten für den Gehalt dieser kritischen Metalle in Smartphones vor. Hier besteht grundsätzlicher Untersuchungsbedarf, um die zukünftige Relevanz in Smartphones und mögliche Optionen für die Recyclingwirtschaft festzustellen.

4.3 Kobalt

Die Akkumulatoren von gängigen Mobiltelefonen wiegen rund 20 g, darin sind ca. 3,8 g Kobalt enthalten (Hagelüken & Buchert 2008). Aus eigenen Tests wurde durch das Öko-Institut bei einem Smartphone ein Akkumulatorgewicht von 33 g ermittelt. Daraus lässt sich eine Kobaltmenge von rund 6,3 g in den Akkumulatoren je Smartphone errechnen.

4.4 Seltene Erden

Zum Gehalt Seltener Erden in Smartphones waren ebenfalls keine quantitativen Angaben zu erhalten. Bekannt ist, dass auch Mobiltelefone und Smartphones kleine Lautsprecher mit Neodym-Eisen-Bor-Magneten enthalten. Das Öko-Institut ermittelte aus einem Mobiltelefon einen entsprechenden Permanentmagneten mit einem Gewicht von 190 mg. Unter der

²⁶ In Mobiltelefonen werden zwar auch Spuren von Platin gefunden. Jedoch sind diese Konzentrationen im Vergleich zu Silber, Gold und Palladium vernachlässigbar.

Annahme von einer Zusammensetzung wie in den Notebook-Lautsprechern (31% Anteil Seltener Erden) ergibt sich ein Gehalt an Seltener Erden je Smartphone von 60 mg mit einem Verhältnis von Neodym zu Praseodym von ca. 5 zu 1.

4.5 Zusammenfassung kritischer Metalle in Smartphones

Für eine ganze Reihe von kritischen Metallen wie Gallium, Indium, Tantal konnte trotz Heranziehung von Daten von Mobiltelefonen keine quantitativen Angaben gefunden werden. Für die folgenden kritischen Metalle können Daten für Smartphones abgeschätzt werden:

Tabelle 25 Gehalt wichtiger kritischer Metalle in Smartphones (eigene Schätzung Öko-Institut e.V.)

Metall	Metall je Smartphone in g	Komponente
Kobalt	6,300 g	Akku
Silber	0,305 g	Leiterplatte
Gold	0,030 g	Leiterplatte
Palladium	0,011 g	Leiterplatte
Neodym	0,050 g	Lautsprechermagnet
Praseodym	0,010 g	Lautsprechermagnet

4.6 Marktdaten Smartphones

Smartphones treten wie Tablet-PCs gegenwärtig global einen Siegeszug bei den Kunden an, nicht zuletzt bei der wichtigen jüngeren Konsumentengruppe. So wurden allein in Deutschland im Jahr 2010 rund 7.702.000 Smartphones verkauft; das Wachstum betrug gegenüber 2009 +161,4% (GfK, gfu 2011). Damit ergibt sich für das Jahr 2010 ein Potenzial für die folgenden kritischen Metalle in Deutschland über die verkauften Smartphones:

Tabelle 26 Potenzial wichtiger kritischer Metalle in Smartphones in 2010

Metall	Metall je Smartphone in g	Metallpotenzial über verkaufte Smartphones in D 2010 in kg	Komponente
Kobalt	6,300 g	48.500	Akku
Silber	0,305 g	2.350	Leiterplatte
Gold	0,030 g	230	Leiterplatte
Palladium	0,011 g	85	Leiterplatte
Neodym	0,050 g	385	Lautsprechermagnet
Praseodym	0,010 g	77	Lautsprechermagnet

Wie aus Tabelle 26 hervorgeht, beträgt das Potenzial an Kobalt (Akkus) über die 2010 in Deutschland verkauften Smartphones gut 48 Tonnen. Hinzu kommen über 2 Tonnen Silber sowie über zweihundert Kilogramm Gold. Wie mehrfach angemerkt befinden sich in Smartphones noch weitere interessante Metalle, allen voran größere Mengen Kupfer. Über

das Kupferrecycling werden heute schon aus alten Mobiltelefonen die Edelmetalle Silber, Gold und Palladium zurückgewonnen. Dies ist auch in Zukunft für Smartphones zu erwarten. Für Elektronikprodukte wie Smartphones ist von einer relativ kurzen tatsächlichen Gebrauchsdauer von höchstens drei bis vier Jahren auszugehen, nicht zuletzt getrieben durch die Anschaffung immer neuer und leistungsfähiger Gerätegenerationen. Dies bedeutet, dass die in den letzten drei Jahren extrem angestiegene Anzahl von Smartphones in der Nutzungsphase sehr bald die Nachgebrauchsphase und damit die Kreislaufwirtschaft in Deutschland erreichen wird.

4.7 Erfassungsraten Smartphones

Laut Berechnungen von Chancerel (2010) wurden im Jahr 2007 2.273 t Mobiltelefone obsolet, wovon nur 110 t durch die offiziellen Rücknahme- und Sammelsysteme erfasst wurden. Dies bedeutet, dass in Deutschland nur ca. 5% aller Handys einem geregelten Recycling zugeführt werden. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass dieser Wert auch für Smartphones Gültigkeit hat. Ähnlich wie bei Flachbildschirmen und Notebooks kann der Verbleib der restlichen Geräte nicht abschließend quantifiziert werden. Insgesamt kann aber davon ausgegangen werden, dass ein Großteil der nicht erfassten Mobiltelefone über längere Zeiträume von den Nutzern aufbewahrt werden, so dass ein zeitlich verzögertes End-of-life Management zu erwarten ist. Zudem spielt die „Mülltonnengängigkeit“ von Kleingeräten eine Rolle, die eine unsachgemäße Entsorgung über den Hausmüll erleichtert.

4.8 Stand der Recyclingtechnik für Smartphones

Das Recycling von Smartphones – obgleich als vergleichsweise neue Produktgruppe noch nicht massiv in der Nachgebrauchsphase angekommen - ist vergleichbar dem Recycling von Mobiltelefonen und vergleichsweise einfach. Wichtig ist eine Entnahme der kobalthaltigen Lithium-Ionen-Akkumulatoren, um diese separat in geeignete Batterierecyclinganlagen zu überführen (siehe Abschnitt 6). Mobiltelefone werden üblicherweise – ohne weitere Zerlegung – in pyrometallurgische Anlagen wie z.B. von Umicore in Belgien eingespeist. Dort werden vor allem Metalle wie Kupfer, Blei, Nickel, Zinn und Edelmetalle wie Gold, Silber, Palladium in hoher Ausbeute zurückgewonnen.

4.9 Optimierungspotenziale in der Recyclingkette

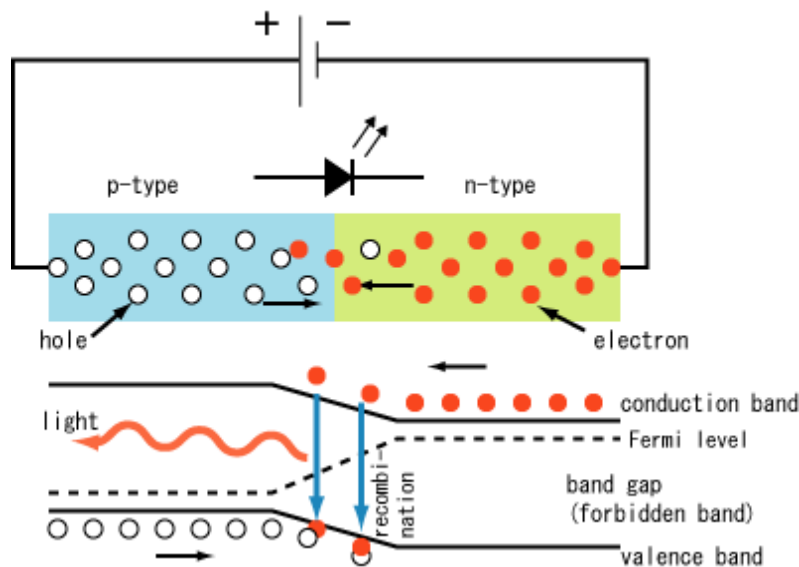
Wichtigste Maßnahme zur Erhebung von Optimierungspotenzialen in der Recyclingkette von Smartphones ist eindeutig die Erhöhung der bislang sehr niedrigen Erfassungsquote. Weiterhin muss immer auf eine Entnahme der kobalthaltigen Akkus Wert gelegt werden. Durch das Recycling über die bewährte Kupferschiene können neben Kupfer die Edelmetalle Silber, Gold, Palladium mit Rückgewinnungsraten um 95% zurückgewonnen werden. Für Kobalt aus den Lithiumionen-Akkus existieren inzwischen vergleichbar effiziente Verfahren. Bzgl. der weiteren enthaltenen kritischen Metalle wie Tantal, Gallium, Indium, Neodym, Praseodym besteht grundlegender Untersuchungsbedarf: hinsichtlich der enthaltenen Mengen und der Frage, ob diese Metalle trotz der wahrscheinlich geringen absoluten Mengen mit vertretbarem Aufwand zurück gewonnen werden können.

5 LED-Leuchten

In den letzten Jahren finden zunehmend weiße LEDs als Beleuchtungsmittel Verbreitung. Die Vorteile dieser neuen Leuchtmittel sind zahlreich: So bieten sie durch eine hohe Lichtausbeute von gegenwärtig 50-80 lm/W eine sehr energiesparende Beleuchtung. Ihr Licht ist qualitativ hochwertig mit einem Farbwiedergabeindex von 80-90 und einem kontinuierlichen Spektrum. Sie weisen eine lange Lebensdauer von bis zu 50.000 Stunden auf, eine gute Schaltfestigkeit und Aufstartzeit (Zeitspanne zwischen Beginn des Stromflusses durch die LED und Erreichen ihrer maximalen Leuchtstärke) und sind sehr stoß- und vibrationsfest. Ihre kleine Bauform erlaubt zudem neue Designlösungen. Dies ermöglicht eine Vielzahl von Einsatzbereichen, etwa in der Automobilindustrie. Mit den durch technologischen Fortschritt stetig steigenden Werten für die Lichtausbeute und der Möglichkeit, LEDs mit weißem Licht zu bauen, werden LEDs auch für die Raumbeleuchtung attraktiv.

Der grundsätzliche Aufbau von LEDs ähnelt dem einer Halbleiterdiode: Bei Dioden handelt es sich um elektronische Bauelemente, die nur in einer Richtung durchlässig für elektrischen Strom sind. In einer Halbleiterdiode befinden sich im Dioden-Chip direkt aneinander grenzende Schichten eines n- und p-dotierten Halbleiters. Einen n-dotierten Halbleiter kann man sich als eine Substanz vorstellen, in der einzelne Elektronen als Ladungsträger fungieren können. Bei einem p-dotierten Halbleiter sind es dagegen gerade die fehlenden Elektronen („Löcher“).

Abbildung 17 Funktionsprinzip einer Halbleiterdiode (Quelle: wikipedia, 05.12.2011, Urheber: User:S-kei)



Wird die Halbleiterdiode nun in Durchlassrichtung geschaltet, strömen Elektronen von der n-dotierten Seite auf die p-dotierte Seite (siehe Abbildung 17). Bei diesem Übergang wird Energie freigesetzt, deren Größe von den Kristalleigenschaften des verwendeten Halbleiters abhängig ist. Im Unterschied zu den einfachen Halbleiterdioden, bei denen diese Energie in

Form von Gitterschwingungen (=Wärme) freigesetzt wird, findet bei den LEDs ein sogenannter strahlender Übergang statt, bei dem elektromagnetische Strahlung ausgesendet wird. Bei dieser kann es sich um infrarotes, sichtbares oder ultraviolettes Licht handeln, abhängig von der sog. Bandlücke des Halbleiters (siehe Abbildung 18).

Abbildung 18 Abhängigkeit der Farbe des LED-Lichtes vom verwendeten Halbleitermaterial (schematisch)

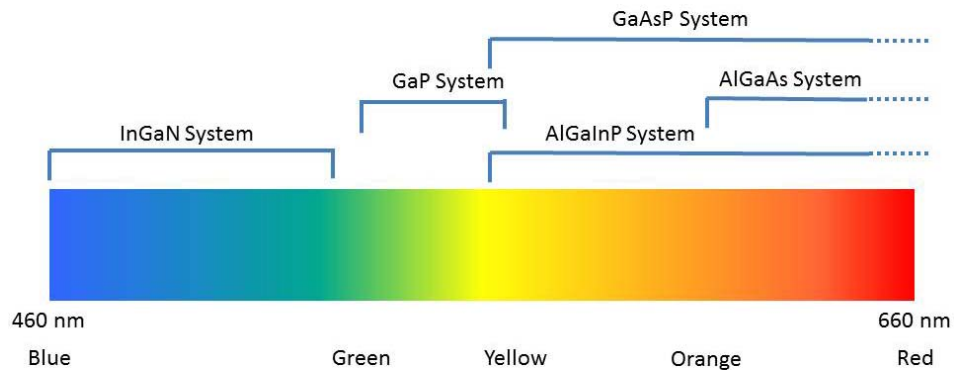
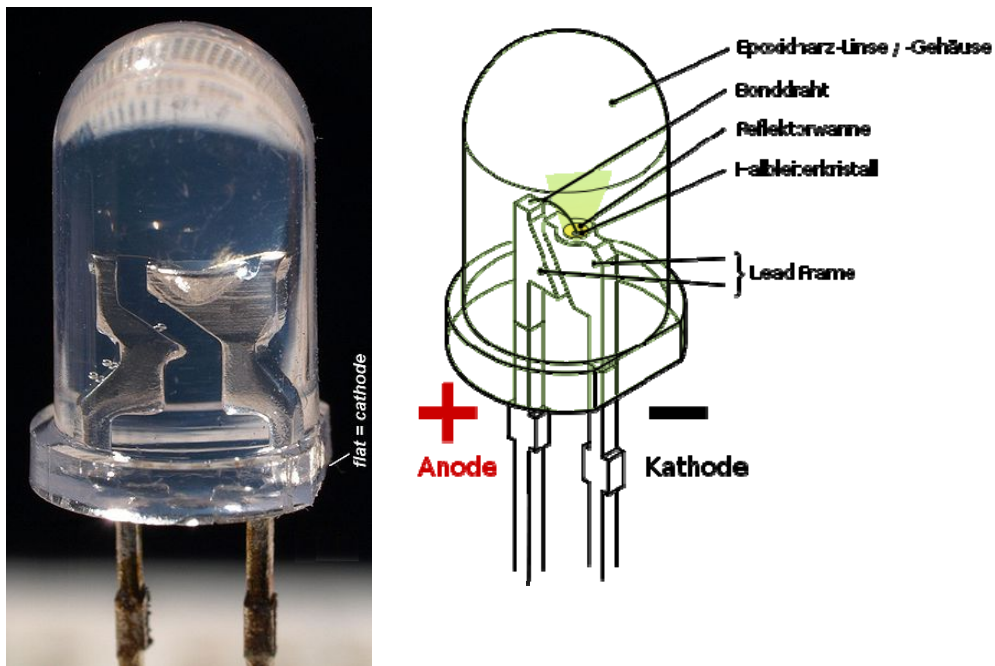


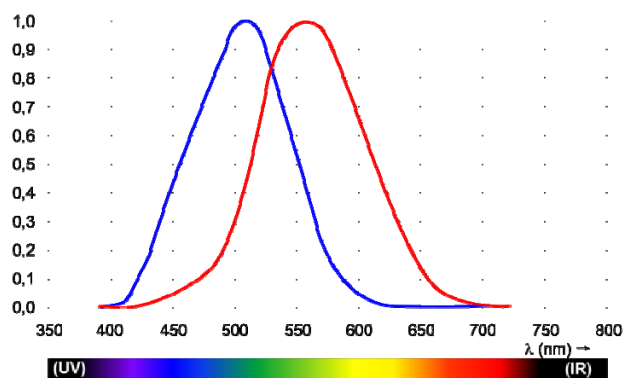
Abbildung 19 Foto und Schema einer LED (Quelle wikipedia, wikipedia, 05.12.2011; Urheber: Grapetonix; Inductiveload)



Je größer die Bandlücke ist, desto kürzer ist die Wellenlänge der emittierten Strahlung. Strahlende Übergänge sind jedoch nur bei bestimmten Werten einiger Gitterparameter des verwendeten Halbleiters möglich. Diese Parameter sind vor allem bei den sogenannten III-VI-Halbleitern gegeben, die aus Elementen der 3. und 5. Hauptgruppe des Periodensystems zusammengesetzt sind. Grundlage dieser Verbindung ist oft Gallium in Verbindung mit Arsen, Phosphor oder Stickstoff. Das Licht einer LED ist zunächst weitgehend einfarbig. Um nun ein weißes Licht zur Verwendung in der Raumbeleuchtung zu erzeugen, gibt es grundsätzlich zwei Methoden: Man kann das Licht mehrerer farbiger LEDs überlagern und so zu weißem Licht mischen. Dies hat den Vorteil, dass eine relativ gute Lichtausbeute erzielt wird (diese ist für LEDs im sichtbaren Bereich in der Regel größer als für LEDs in Nah-IR oder Nah-UV). Zum anderen erlauben sie eine sehr gezielte Einstellung der Farbtemperatur.

Daher werden sie vor allem in Bereichen eingesetzt, in denen diese Eigenschaft wichtig ist und der Nachteil des hohen Preises nicht sehr ins Gewicht fällt, etwa für die Beleuchtung bei TV-Aufnahmen, für Bühnenbeleuchtung etc. Für den Allgemeingebrauch ist eher die zweite Bauform weißer LEDs verbreitet: Diese basiert auf einer blauen LED, deren Licht, ähnlich wie bei Leuchtstoffröhren, durch einen aufgetragenen Leuchtstoff teilweise in Richtung längerer Wellenlängen verschoben wird. Die Zusammensetzung der Leuchtstoffschicht und deren Dicke bestimmen dabei wesentlich die Farbtemperatur des resultierenden weißen Lichtes (kaltweiß/tageslichtähnlich: 5.500-6.000K, warmweiß: 2.700-300 K). Zur besseren Farbwiedergabe werden dabei in der Regel verschiedene Leuchtstoffe kombiniert. Als Halbleiter wird dabei in der Regel Galliumnitrid (GaN) benutzt. Ein Nachteil dieser Art von Erzeugung weißen Lichtes ist allerdings eine Einbuße in der Lichtausbeute.

Abbildung 20 Helligkeits-Empfindlichkeitskurve des menschlichen Auges, Tagsehen (rot), Nachtsehen (blau) (Quelle [Wikipedia](http://de.wikipedia.org), 05.12.2011; Urheber: Hhahn)



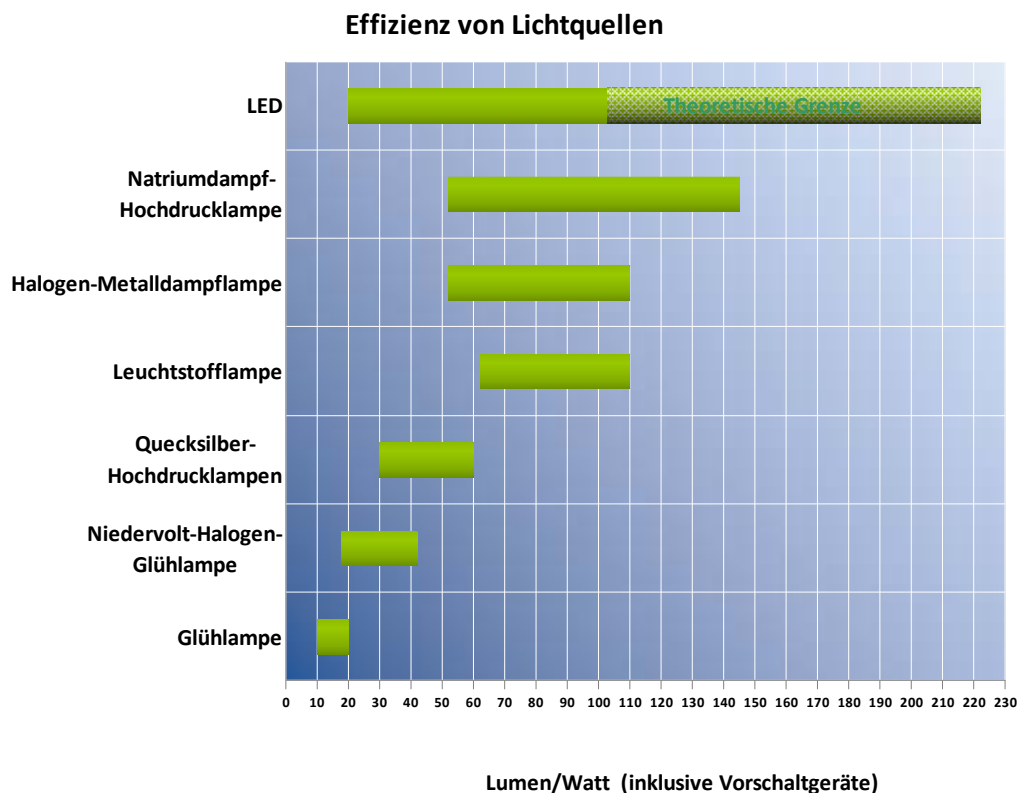
Halbleiterchip und Leuchtstoff befinden sich in einer industriellen LED in der Regel in einer metallischen Wanne, die zum einen das in verschiedene Richtungen austretende Licht bündelt, zum anderen aber auch zur Ableitung der anfallenden Wärme dient. Diese Komponenten werden für den praktischen Einsatz in der Regel in Epoxidharz eingeschmolzen und über die Zuleitungsdrähte (Anode und Kathode) mechanisch auf einer Platine befestigt (siehe auch Abbildung 19). Eine neuere Entwicklung ist die SMD-LED (surface-mounted-

device LED), bei der die LED direkt auf der Platine montiert wird. Sie erlauben eine kleine Bauform und werden ausschließlich industriell gefertigt.

Um die subjektive Helligkeit einer Lichtquelle zu quantifizieren, lässt sich deren sogenannter Lichtstrom, gemessen in Lumen (lm), angeben. Der Lichtstrom ergibt sich aus der Gewichtung des spektralen Strahlungsflusses der Lichtquelle (die pro Zeiteinheit abgestrahlte elektromagnetische Energie) mit der Empfindlichkeitskurve des menschlichen Auges. Diese hat ihr Maximum im grünen Bereich (siehe Abbildung 20).

Leuchtet also eine Lichtquelle gerade in diesem Spektralbereich (grünes Licht), so wird das Licht vom Auge als heller wahrgenommen als das einer Lichtquelle gleicher Leistung, aber anderer Lichtfarbe. Die sogenannte Lichtausbeute einer Lichtquelle gibt das Verhältnis aus Lichtstrom und Leistungsaufnahme der Lichtquelle an und hat die Einheit [lm/W]. Je größer die Lichtausbeute also ist, desto heller erscheint die Lichtquelle bei gleicher Leistungsaufnahme. Wenn umgekehrt gleiche Helligkeit gefordert ist, lässt sich eine Lichtquelle mit hoher Lichtausbeute mit einer geringeren Leistung betreiben, spart also elektrische Energie. Die Lichtausbeute verschiedener gebräuchlicher Lichtquellen variiert naturgemäß je nach Funktionsprinzip der Leuchten (siehe Abbildung 21).

Abbildung 21 Lichtausbeute einiger Lichtquellen (nach [Stadtwerke Düsseldorf](#), 05.12.2011)



Während eine konventionelle Glühbirne eine Lichtausbeute von maximal 20 lm/W hat, erreichen Leuchtstoffröhren und Energiesparlampen Werte von über 100 lm/W. Eine typische Natriumdampf-Hochdrucklampe hat zwar eine sehr hohe Lichtausbeute von bis zu

140 lm/W, kommt aber wegen ihres beinahe monochromatischen Emissionsspektrums im gelben Bereich nicht im Wohnbereich zum Einsatz. Weiße LEDs haben bereits unter Laborbedingungen bewiesen, dass Lichtausbeuten im Bereich 200-250 lm/W technisch möglich sind (Cree 2010, Nichia 2010, Cree 2011), was bereits in den Bereich der physikalisch möglichen maximalen Lichtausbeute von 350 lm/W für kaltweißes Licht (Farbtemperatur 6700 K) kommt. Bereits heute sind LED-Lampen mit einer Lichtausbeute von über 100 lm/W kommerziell verfügbar.

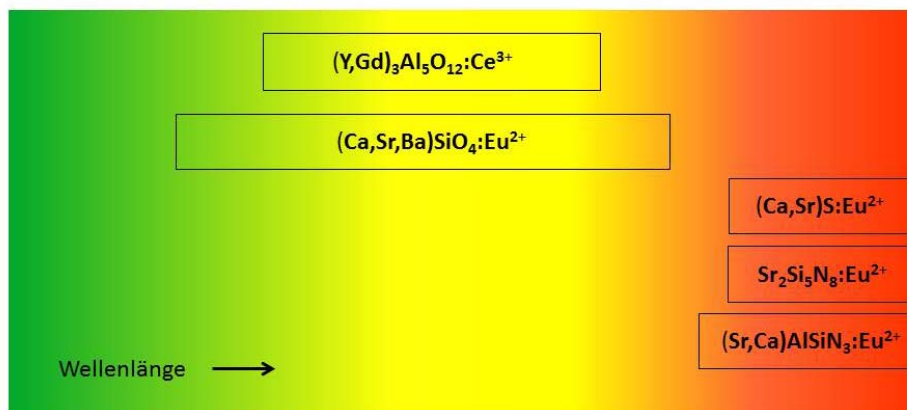
Eine wesentliche Größe bei der Abschätzung der Menge an kritischen Metallen in WLEDs ist die Größe (und damit die Masse) des eigentlichen Halbleiterchips. Diese ist im Wesentlichen bauformabhängig und variiert abhängig vom Hersteller. Auch in der Produktpalette eines einzelnen Herstellers gibt es je nach Anforderung unterschiedliche Dimensionierungen des Chips. Im Allgemeinen ermöglichen größere LED-Chips eine geringe Stromdichte und damit eine etwas höher Lichtausbeute. Allerdings ist die Größe des Chips nach oben begrenzt, da in größeren Halbleiterkristallen die Wahrscheinlichkeit für Gitterfehler, die die Funktionsfähigkeit der LED beeinträchtigen, größer ist.

Da Lampen mit LED-Leuchtmitteln erst seit Kurzem in nennenswerten Umfang auf dem Markt sind, sind Daten, aus denen eine realistische Abschätzung der typischen Lebensdauer einer Lampe zu ermitteln wäre, rar. In Laborumgebung lässt sich die Lebensdauer einer einzelnen weißen LED zu etwa 50.000 Stunden bestimmen. Dabei verlieren LEDs mit der Zeit allmählich an Helligkeit (d.h. die Lichtausbeute reduziert sich langsam), anders als Glühlampen, deren Lebensende durch den Abriss der Glühwendel genau definiert ist. Bei LED-Lampen entscheiden in der Praxis auch andere Faktoren über die tatsächliche Lebensdauer: so verkürzt sich diese durch zu hohe Temperaturen des LED-Halbleiterchips, etwa durch unzureichende Wärmeableitung durch das. Auch zu hohe Stromdichten in der LED begrenzen deren Lebensdauer. Eine limitierende Größe ist auch die Vorschalt elektronik, die bei LED-Lampen zur Stromstabilisierung nötig ist. Je nach deren Ausführung und Qualität kann sie unter Umständen eine kürzere Lebensdauer als die eigentliche LED haben. Da LED und Vorschalt elektronik in zunehmenden Maße zusammen ein einziges Modul bilden, würden auch die LEDs einer Leuchte beim Ausfall der Vorschalt elektronik entsorgt werden müssen.

5.1 Seltene Erden, Gallium und Indium

Unter den in einer durchschnittlichen LED verbauten Materialien (siehe Abbildung 23) befinden sich auch eine Reihe kritischer Metalle. Seltene Erden finden in LEDs hauptsächlich in dem Leuchtstoff Verwendung, welches das hochfrequente blaue oder Nah-UV-Licht aus dem eigentlich LED-Chip in ein kontinuierliches Spektrum im sichtbaren Wellenlängenbereich konvertiert. Die Zusammensetzung des Leuchtstoffs ist essentiell für die Leistungsfähigkeit einer WLED. Herstellerangaben zu den genauen Zusammensetzungen der verwendeten Leuchtstoffe werden in der Regel nicht veröffentlicht und sind daher kaum erhältlich. Die folgenden Angaben in diesem Abschnitt beruhen auf Erfahrungswerten aus der fachlichen Praxis.

Abbildung 22 Spektralbereiche verschiedener Trägersubstanzen und Dotierungen in Leuchtstoffen weißer LEDs.



Kaltweiße LEDs enthalten in der Regel nur einen gelben Leuchtstoff, während für warmweiße LEDs zusätzlich ein roter Leuchtstoff beigemischt wird. Grundlage des gelben Leuchtstoffs ist bei weißen LEDs überwiegend Ce^{3+} -dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat (YAG) bzw. Gadolinium-Aluminium-Granat $(\text{Y,Gd})\text{AG}:\text{Ce}^{3+}$ als gelben Leuchtstoff. Der in warmweißen LEDs beigemischte Leuchtstoff erhält sein rötliches Farbspektrum durch das Aktivator-Ion Eu^{2+} als Dotierung. Dieses kann je nach Trägersubstanz allerdings auch im gelb-orangen Spektralbereich emittieren (siehe Abbildung 22).

Bei kaltweißen LEDs werden typischerweise 0,1 mg des gelben Leuchtstoffs verwendet. Tabelle 27 zeigt den Anteil der einzelnen Elemente in einem gelben Leuchtstoff der chemischen Zusammensetzung $(\text{Y}_{0,77}\text{Gd}_{0,2}\text{Ce}_{0,03})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$.

Tabelle 27 Zusammensetzung eines typischen gelben Leuchtstoffs einer WLED.

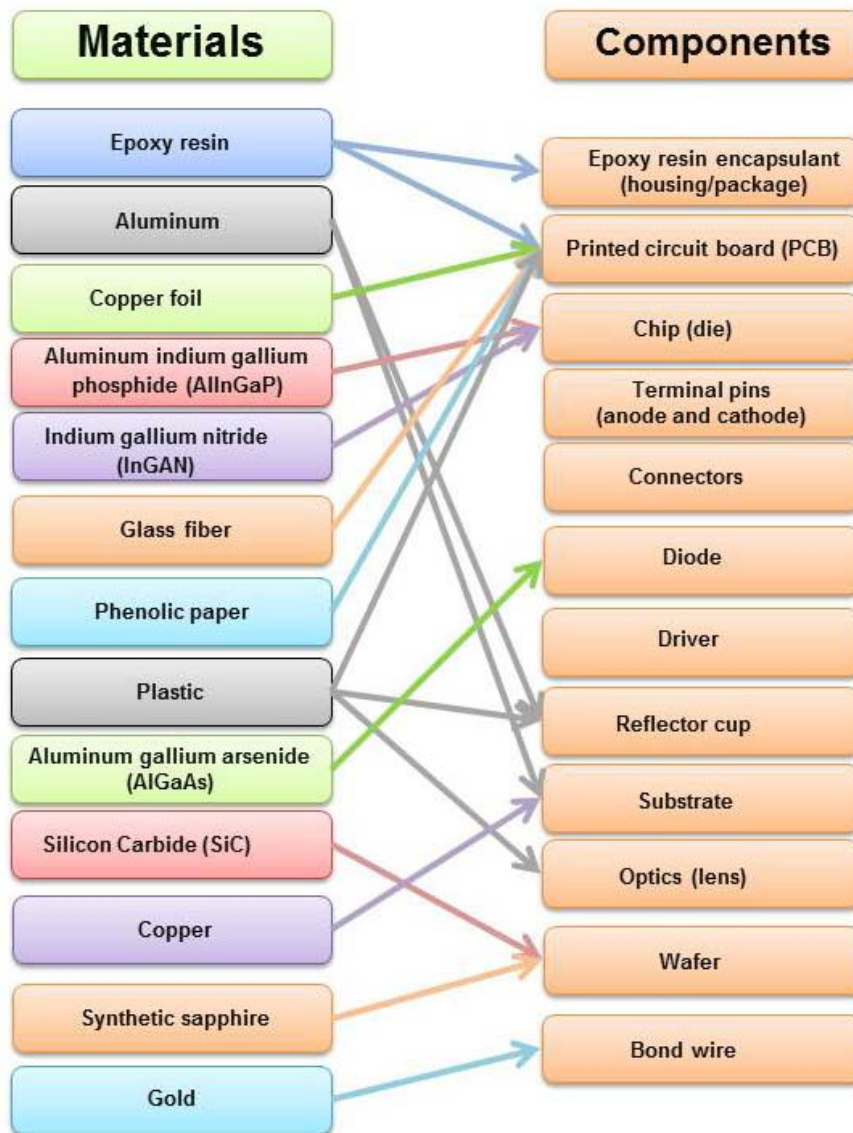
Element	Y	Gd	Ce	Al	O	$(\text{Y}_{0,77}\text{Gd}_{0,2}\text{Ce}_{0,03})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$
Molare Masse (g/mol)	88,91	157,25	140,12	26,98	16,00	639,24
Koeffizient	2,31	0,6	0,09	5	12	1
Masseanteil (gerundet)	32 %	15 %	2 %	21 %	30 %	100 %
Masse pro LED [μg]	32	15	2	21	30	100

Tabelle 28 Zusammensetzung eines typischen rötlichen Leuchtstoffs einer WLED.

Leuchtstoff	Molare Masse (g/mol)	Koeffizient für Eu^{2+}	Massenanteil Eu^{2+}	Masse Eu^{2+} pro LED [μg]
$\text{Ca}_{0,5}\text{Sr}_{0,45}\text{Eu}_{0,05}\text{S}$	99,14	0,05	8 %	0,9
$(\text{Sr}_{0,95}\text{Eu}_{0,05})_2\text{Si}_5\text{N}_8$	434,12	0,10	4 %	0,4
$\text{Ca}_{0,5}\text{Sr}_{0,45}\text{Eu}_{0,05}\text{AlSiN}_3$	168,14	0,05	5 %	0,6

Für warmweiße LEDs werden zusätzlich zu den 100 µg des gelben Leuchtstoffs ca. 10 µg des rötlichen, Europium enthaltenden Leuchtstoffs hinzugemischt. Geht man von einer Dotierung von 5 mol% Europium ($M = 151,96 \text{ g/mol}$) aus, so erhält man Mengen von 0,4 µg bis 0,9 µg Europium in einer WLED (siehe Tabelle 28).

Abbildung 23 Komponenten einer LED und die darin verbauten Materialien (nach CGGC)



Gallium ist einer der wesentlichen Bestandteile des eigentlichen LED-Chips. Die Halbleiter Galliumnitrid (GaN) und Indiumgalliumnitrid (InGaN) emittieren in einer LED Licht im blaugrünen bis ultravioletten Frequenzbereich, welches durch einen auf den Chip aufgetragenen Leuchtstoff zu weißem Licht konvertiert wird. In weißen LEDs findet hauptsächlich Indiumgalliumnitrid der chemischen Zusammensetzung $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ Verwendung, wobei die Größe der Bandlücke und damit die Wellenlänge des emittierten Lichtes linear vom Misch-

ungsparameter x abhängt. Dieses Mischungsverhältnis Indium:Gallium liegt bei den am häufigsten verwendeten LED-Chips, die Licht mit einer Wellenlänge von 450 nm emittieren, bei 40:60 Mol-% (siehe auch Zukauskas 2002). Für die Dimensionen eines typischen LED-Halbleiter-Chips gibt es unterschiedliche Angaben. Beim Chip-Design A, beruhend auf den beruflichen Erfahrungen eines Experten, hat der Chip dabei bei einer Grundfläche von 1 mm eine Dicke von 10 μm . Beim Chip-Design B beträgt diese Höhe dagegen 250 μm (ISI 2009, dort referenziert: Dagar 2008). Die Dichte des $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Halbleiters kann als 6,5 g/cm^3 angenommen werden. Damit ergeben sich die in Tabelle 29 genannten Werte für die LED-Chips der beiden unterschiedlichen Bauarten A und B.

Tabelle 29 Zusammensetzung eines LED- $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Halbleiter-Chips Bauart A und B, siehe Text)

Element	In	Ga	N
Molare Masse (g/mol)	114,82	69,72	14,01
Koeffizient	0,4	0,6	1,0
	1,0	1,0	1,0
Masseanteil (gerundet)	45 %	41 %	14 %
	58 %	35 %	7 %
Masse pro LED [mg]	0,029	0,0325	
	0,170	0,5300	

Wegen ihrer geringeren Höhe enthalten Chips der Bauart A deutlich weniger Indium und Gallium. Die Angaben zur Zusammensetzung von LED-Chip und Leuchtstoff und zu den absoluten Mengenangaben kritischer Metalle sind sehr eingeschränkt, hauptsächlich bedingt durch deren Klassifizierung als Betriebsgeheimnis. Diese Angaben und alle Hochrechnungen und Ableitungen, die sich aus ihnen ergeben, sind als orientierend einzuordnen. Wenn im Folgenden mit den Gallium- und Indiummengen von Chips dieses Bautyps A gerechnet wird, dann auch um eine eher konservative Einschätzung des Bedarfs an seltenen Metallen zu gewinnen.

Ausgehend von der Materialzusammensetzung der Bauart A, die in Tabelle 30 noch einmal zusammengestellt ist, und unter Annahme zukünftiger Wachstumsraten der LED-produzierenden Industrien lässt sich eine Bedarfsvorschau für das Jahr 2030 abschätzen (ISI 2009):

Tabelle 30 Typischer Gehalt einer weißen LED an kritischen Metallen (verwendet für Hochrechnung zukünftigen Bedarfs)

Element	In	Ga	Ce	Eu	Gd	Y
Masse pro LED [μg]	29,0	32,5	2,0	0,6	15,0	32,0

Hinweise auf zukünftigen Bedarf an Gallium durch die LED-Fertigung lassen sich aus Schätzungen zum Wachstum des gesamten LED-Marktes abgeleitet werden. Für diesen Markt, der weiße wie auch farbige LEDs umfasst, wird von einem Wachstum von 37% in den

Jahren 2006-2011 ausgegangen, entsprechend einem jährlichen Wachstum von 6,5% (ISI 2009, dort referenziert: Steele 2007). Es wird angenommen, dass der Anteil weißer LEDs von etwa 48% in 2006 auf 60% in 2011 steigt, entsprechend ca. 4,6% p.a. Mit diesen Annahmen werden im Jahr 2009 21 Mrd. weiße LEDs gefertigt, im Jahr 2011 bereits 25 Mrd., entsprechend einem jährlichen Wachstum von etwa 11% (siehe Tabelle 31). Für den Zeitraum nach 2011 werden zwei unterschiedlich dynamische Szenarien angenommen (ISI 2009): Im Szenario A mit etwas konservativerer Dynamik wird ein Wachstum des Gesamtmarktes bei gleichbleibenden 6,5% p.a. zugrunde gelegt, bei einem unveränderten Anteil der weißen LEDs von 60%. Dies resultiert in einem jährlichen Wachstum des Marktes für weiße LEDs von 6%. Das etwas dynamischere Szenario sieht ein Wachstum des Gesamtmarktes von 15% p.a. in den Jahren 2011-2020 vor, danach in den Jahren 2020-2030 infolge zunehmender Marktsättigung nur noch von 10%. Der Anteil weißer LEDs steigt dabei von 2011-2030 von 60% auf 70%. Dies entspricht einem Wachstum des Marktes für weiße LEDs von 16% im Zeitraum 2011-2020 und 11% im Zeitraum 2020-2030. Im konservativeren Szenario würden demnach 2030 etwa 84 Milliarden LEDs gefertigt werden, bei der dynamischeren Marktentwicklung etwa 271 Milliarden.

Um die Aussagekraft dieser Berechnungen zu validieren, lässt sich eine weitere Marktstudie heranziehen (Young 2011), die eine Abschätzung bezüglich der Anzahl produzierter GaN-Chips beinhaltet. Da der Hauptverwendungszweck dieser Chips der Einsatz in weißen LEDs ist, wird angenommen, dass sich diese Schätzwerte direkt auf die Anzahl der gefertigten weißen LEDs übertragen lassen. Bei der Abschätzung wird für das Jahr 2009 ein Wachstum von etwa 95% gegenüber 2008 angenommen, welches in den folgenden Jahren in etwa exponentiell abnimmt und 2015 noch 9% gegenüber dem Vorjahr beträgt. Dieses Szenario C ist also in der Anfangszeit der Vorhersage noch dynamischer als das oben beschriebene Szenario B, geht dann aber rascher in die Sättigung. Damit ergibt sich, ausgehend von etwa 24 Mrd. WLEDs im Jahr 2009, im Jahr 2011 bereits eine Zahl von 71 Mrd. produzierte WLEDs (siehe Tabelle 31). Extrapoliert man diese Entwicklung (Reduktion der jährlichen Wachstumsrate um 50% nach 2015), so ergeben sich für das Jahr 2020 etwa 164 Mrd. gefertigte WLEDs, im Jahr 2030 etwa 165 Mrd. WLEDs. Damit liegt dieses Szenario C auf lange Sicht zwischen den beiden vorgestellten Szenarien A und B (ISI 2009) und unterstützt daher deren Schätzwerte in ihrer Größenordnung.

Tabelle 31 Anzahl (Mrd. LED) der produzierten WLEDs und Projektion in den drei Szenarien A, B, C

Projektion	Anzahl 2006	Anzahl 2009	Anzahl 2011	Anzahl 2020	Anzahl 2025	Anzahl 2030
A (ISI 2009)	15	21	25	45	62	84
B (ISI 2009)	15	21	25	97	162	271
C (Young 2011)	-	24	71	164	164	165

Indium findet in LEDs vor allem als Indiumnitrid in Verbindung mit Galliumnitrid im Halbleiter-Chip Verwendung. Das Mischungsverhältnis ist dabei variabel und bestimmt wesentlich die Breite der Bandlücke des Halbleiters. Aus deren Wert ergibt sich direkt die Farbe des emittierten Lichtes. Eine Abschätzung des zukünftigen Bedarfs an Indium, der aus der Fertigung von WLEDs resultiert, ergibt für die drei Zukunftsszenarien A, B (jeweils nach ISI 2007) und C (nach Young 2011) die in Tabelle 33 dargestellten Verbrauchszahlen.

Abbildung 24 Projektionen der zukünftigen Entwicklung jährlicher Produktionszahlen für weiße LEDs (weltweit)

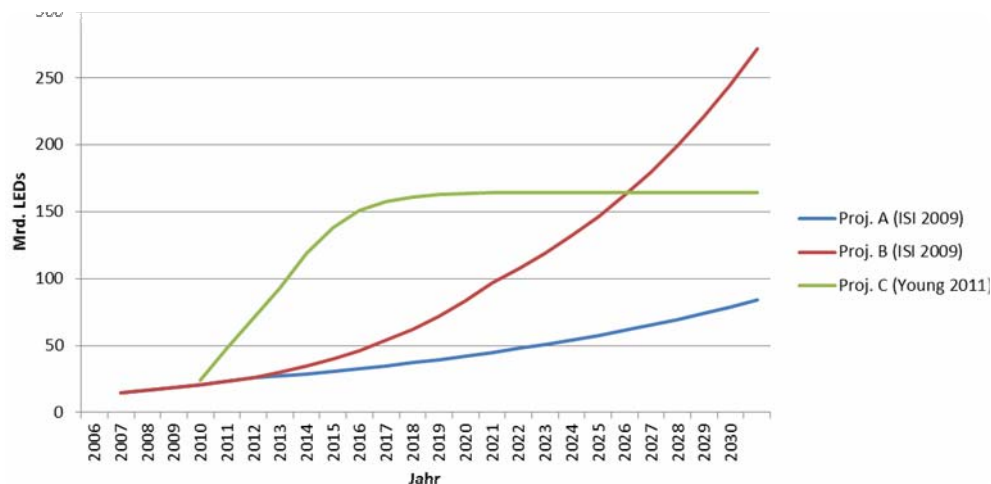


Tabelle 32 Abschätzung des zukünftigen Verbrauchs an Gallium aufgrund der Fertigung weißer LEDs

Rohstoff	Welt- produktion 2010 ²⁷ [t]	Verbrauch für WLEDs [t]				
		2010	2015	2020	2025	2030
Gallium	161	0,75-1,56	1,07-4,90	1,46-5,34	2,00-5,35	2,74-5,35

Tabelle 33 Abschätzung des zukünftigen Verbrauchs an Indium aufgrund der Fertigung weißer LEDs

Rohstoff	Welt- produktion 2010 ²⁸ [t]	Verbrauch von In für WLEDs [t]				
		2010	2015	2020	2025	2030
Indium	574	0,67-1,38	0,95-4,37	1,30-4,76	1,78-4,78	2,45-4,78

²⁷ USGS Ga 2011; USGS In 2011

²⁸ USGS Ga 2011

Seltene Erden werden in weißen LEDs hauptsächlich im Leuchtstoff eingesetzt. Der weltweite Bedarf einiger relevanter Seltener Erden, der sich aus obiger Hochrechnung ergibt, ist in Tabelle 34 gegeben.

Tabelle 34 Abschätzung des zukünftigen Verbrauchs an Seltenen Erden aufgrund der Fertigung weißer LEDs.

Rohstoff	Welt- produktion 2010 ²⁹ [t]	Verbrauch für WLEDs [kg]				
		2010	2015	2020	2025	2030
Cer	40.000	46-96	66-301	90-329	123-329	169-329
Europium	400	14-29	20-90	27-99	37-99	50-99
Gadolinium	4.000	347-720	492-2.260	674-2.470	923-2.470	1.260-2.470
Yttrium	8.900	739-1.540	1.050-4.820	1.440-5.260	1.970-5.270	2.700-5.270

5.2 Zusammenfassung kritischer Metalle in LED-Leuchten

Die in einer typischen weißen LED verwendeten Mengen kritischer Metalle (bei den weißen LEDs sind dies Seltene Erden, Indium und Gallium) sind in Tabelle 35 aufgelistet.

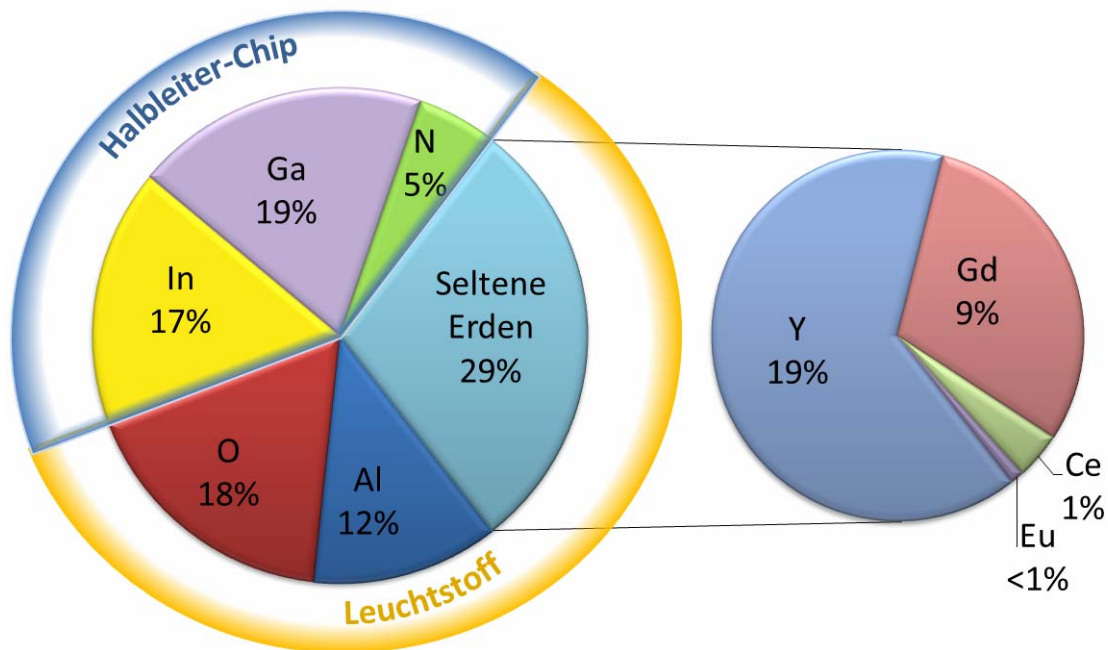
Abbildung 25 gibt den Massenanteil der einzelnen Elemente wieder. Dabei ist zu beachten, dass die hier aufgezeigten Werte einen orientierenden Charakter haben. Da es sich bei den weißen LEDs um eine neue Technologie mit einem sich rasch änderndem Entwicklungsstand handelt, sind in Einzelfällen Abweichungen gegenüber die hier gegebenen Werten möglich.

Tabelle 35 Typischer Gehalt einer weißen LED an kritischen Metallen

Element		Masse pro LED [µg]	Vorkommen
Indium	In	29	Halbleiter-Chip (100%)
Gallium	Ga	33	Halbleiter-Chip (100%)
Cer	Ce	2	Leuchtstoff Dotierung (100%)
Europium	Eu	0,4 – 0,9	Leuchtstoff Dotierung (100%)
Gadolinium	Gd	15	Leuchtstoff Trägersubstanz (100%)
Yttrium	Y	32	Leuchtstoff Trägersubstanz (100%)

²⁹ BGR 2011, Schüler et al. 2011,

Abbildung 25 Massenanteile kritischer Metalle in einer weißen LED (Halbleiter-Chip und Leuchtstoff)



5.3 Marktdaten LED-Leuchten

Die Verwendung von Beleuchtungsmitteln auf Basis von weißen LEDs im privaten Sektor ist eine relativ neue Erscheinung. Erst die technologischen Fortschritte in der Entwicklung leistungsstarker weißer LEDs mit hoher Lichtausbeute bei gleichzeitig verlässlich guten Betriebseigenschaften ermöglichten eine Fertigung dieser Leuchtmittel in größerem Umfang. Eine damit einhergehende Preissenkung erhöhte die Attraktivität nicht nur im business-to-business-Bereich wie etwa der Automobilindustrie, sondern auch für die privaten Verbraucher. Der Markt antwortete mit der Entwicklung von LED-Lampen, die sich anstelle konventioneller Glühlampen, CFL-Lampen oder Halogen-Stecklampen durch Retrofit-Design in Lampengehäusen mit E27-, E16- oder Steckverbindungen verwenden lassen. Daneben gibt es neuentwickelte Gesamt-Leuchtmodule, in denen LED, Vorschalt elektronik und Gehäuse fest miteinander verbaut sind und ein Austausch nur des LED-Leuchtmittels bei Weiterverwendung des Gehäuses nicht vorgesehen ist.

Letztere Entwicklung hat mehrere Gründe: Zum einen ist die Lebensdauer einer weißen LED mit bis zu 50.000 Stunden in der Regel deutlich länger als die der im Gehäuse integrierten Vorschalt elektronik. Zum anderen lässt sich durch eine feste Integration der LED ins Gehäuse die für den Betrieb der LEDs nötige gute Wärmeableitung wesentlich besser realisieren, da das Gehäuse auch die Funktion des Kühlkörpers übernehmen kann. Dies ist bei Retrofit-Lampen nicht in dem erforderlichen Umfang möglich. Daher ist bei Retrofit-Modellen die Gesamtleistung der Leuchte begrenzt, zugleich erhöht der nötige Kühlkörper Gewicht und Umfang der Lampe und begrenzt dadurch ihre Einsatzmöglichkeiten. Eine feste Integration der LEDs in das Lampengehäuse stellt jedoch neue Anforderungen an das zukünftige Recycling der Leuchtmittel, speziell im Sammel- und Aufbereitungsschritt.

Eine neue Entwicklung sind die sogenannten organischen Leuchtdioden (englisch *organic light emitting diode*, OLED), die sich durch ihren Aufbau aus dünnschichtigen, mechanisch verformbaren organischen Halbleiterschichten von den aus anorganischen Halbleitereinkristallen gefertigten LEDs unterscheiden. Die Stromdichte und, als Folge, Leuchtdichte ist geringer als bei LEDs. Da sie sich in größeren Flächen herstellen lassen, sind sie vor allem für Bildschirme, Displays (z.B. in Smartphones) geeignet. In dieser Verwendung in Bildschirmen kommen ihre Vorteile wie hoher Kontrast, geringe Abwärme, kleine Baumaße und Gewicht, sehr kleine Reaktionszeiten, ein großer Seitenbetrachtungswinkel zum Tragen. Ebenso ist die Energieeffizienz im Vergleich zu LCD-Bildschirmen mit LED-Hintergrundbeleuchtung größer, da die Bildpixel (wie beim Plasma-Bildschirm) selbst leuchten, statt weißes Licht unter Helligkeitseinbußen farbig zu filtern. Auch kann man angesichts der raschen Entwicklung dieser Technologie in der Zukunft mit fallenden Produktionskosten rechnen.

Die Nachteile der gegenwärtig produzierten OLEDs liegen in einer noch relativ geringen Lebenserwartung, einer geringen Farbstabilität, der Notwendigkeit einer aufwendigeren Ansteuerung bei großen Monitoren, der Gefahr des burn-ins und einer höheren Empfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeit und UV-Strahlung. Zudem ist die Leistungsaufnahme abhängig von der Helligkeit des Bildes: Sehr helle Bilder brauchen deutlich mehr Strom als dunkle.

OLEDs haben durch ihre flächige Bauform grundsätzlich ein Potential, zukünftig als Lichtquelle in der Raumbeleuchtung eingesetzt zu werden. Erste kommerzielle Modelle sind bereits von einigen Firmen wie OSRAM (Modell *ORBEOS CDW-031*), Philips (Modell *Lumiblade*) und Novalled (Modell *Victory*) entwickelt worden. Der Einsatz dieser Leuchtmodule dürfte zunächst jedoch auf die Effekt- und kleinräumige Beleuchtung beschränkt bleiben, zumal ihre Lichtausbeute von etwa 25 lm/W noch nicht an die von Energiesparlampen oder LED-Lampen heranreicht. Es ist jedoch zu erwarten dass sich diese noch junge Technologie in den nächsten Jahren rasch weiterentwickelt und eine Verwendung von OLEDs in der Raumbeleuchtung in einem größeren Ausmaß möglich wird.

Zur Abschätzung des zukünftigen Bedarfs an Beleuchtungsmitteln auf Basis von weißen LEDs im privaten Wohnbereich wird davon ausgegangen, dass die in einem privaten Haushalt durchschnittlich installierte Lichtstrommenge eine zeitlich relativ wenig variable Größe ist. Für Deutschland und das Jahr 2005 wird diese installierte Lichtstrommenge auf etwa 40.500 lm pro Haushalt geschätzt (Smil 2007). Diese Größenordnung scheint ein zumindest für Industrienationen relativ verlässlicher Wert zu sein (siehe Tabelle 36). So wird für die USA von einer installierten Lichtstrommenge von ca. 50.400 lm pro Haushalt angegangen. (Smil 2007), ein vergleichbarer Wert von 51.180 lässt sich für die USA aus Werten für Nordamerika (Young 2011) ableiten. Im Vergleich mit Deutschland fällt dabei vor allem die größere zu beleuchtende Grundfläche eines durchschnittlichen Haushaltes in den USA ins Gewicht (160 m² in USA, 90 m² in Deutschland).

Tabelle 36 Beleuchtung von Privathaushalten in Deutschland, USA und Japan (2005)
(nach Smil 2007)

	Deutschland	USA	Japan
Lampen / Haushalt	30	43	17
mittlere Lichtausbeute [lm/W]	27	18	64
mittlere Leistung [W]	50	65	45
mittlere Fläche / Haushalt	90	160	95
Installierter Lichtstrom /Haushaltsfläche [lm/m ²]	450	315	515
Gesamter installierter Lichtstrom / Haushalt	40.500	50.400	48.925

Eine zukünftige Entwicklung zeigt sich unter dieser Voraussetzung und mit der Annahme, dass sich die durchschnittliche Haushaltsgrundfläche nicht wesentlich ändert, als ein mit der Zeit zunehmender Anteil von LED-Lampen an der insgesamt im Haushalt installierten Lichtstrommenge. Die Abschätzung der Anzahl der weißen LEDs, die im Zug eines vollständigen oder teilweisen Ersatzes der konventionellen Leuchtmittel eines durchschnittlichen Haushaltes zum Einsatz kämen, ist aufgrund der gegenwärtig raschen technologischen Fortschritte auf dem Gebiet der LED-Entwicklung naturgemäß mit Unsicherheit behaftet. Insbesondere die Steigerungen der Lichtausbeute einzelner LEDs, also das Verhältnis aus erzieltm Lichtstrom und elektrischer Leistungsaufnahme (in lm/W) lassen hoffen, dass in Zukunft bei gleichem Materialeinsatz im LED-Chip deutlich höhere Lichtströme zu erwarten sind (siehe Diskussion in der Einleitung von Abschnitt 5). Gleichwohl muss beachtet werden, dass für den breiten Einsatz nicht allein Laborwerte der Lichtausbeute eine Rolle spielen, sondern auch andere Komponenten der Lampe, wie z.B. der Kühlkörper zur Abführung der Abwärme (bei LED-Lampen eine technische Notwendigkeit) die Lichtausbeute nach oben begrenzen können. Zudem ist die Lichtausbeute einer LED aus theoretischen Gründen bei ca. 350 lm/W, unter Berücksichtigung der Vorschaltel Elektronik bei etwa 220 lm/W nach oben begrenzt. Gegenwärtig im Handel erhältliche Modelle haben eine Lichtausbeute von ca. 50-90 lm/W. Eine zukünftige Steigerung der Lichtausbeute von LED-Lampen ist daher zwar zu erwarten, dürfte aber auf etwa eine Verdoppelung der Lichtausbeute gegenüber aktuellen Modellen beschränkt sein.

Relevant bei den angestellten Berechnungen ist auch die Anzahl der verbauten LED-Chips in einer LED-Lampe mit einem vorgegebenen Gesamtlichtstrom. Es gibt in dieser Anzahl eine gewisse Variationsbreite, die durch die unterschiedlichen Technologien der verbauten LEDs bedingt ist. Bei unseren Berechnungen haben wir uns daher auf den exemplarischen Fall einer Retrofit-LED-Lampe konzentriert, die mit einem Lichtstrom von 800 lm etwa einer konventionellen 75W-Glühlampe (900 lm) entspricht und durch die E27-Fassung auch ähnlich eingesetzt werden kann sowie einen vergleichbar lichtstromstarken Deckenstrahler.

Diese Modelle sind im Moment zwar die eher leistungsstärksten und damit relativ teuer, kommen aber am ehesten in Frage, wenn es um die Ausleuchtung von Wohnräumen geht. Es ist zu erwarten dass sich der Markt in den nächsten Jahren diesen Anforderungen anpasst und LED-Lampen dieser Lichtstrommenge einen größeren Anteil im Angebot besitzen werden. Für die Abschätzung wurden drei LED-Lampen herangezogen: Die BIOLEDX® NUMO 10W, die Koeppen LED Lampe 800 lm und der LOBS.LED LED-

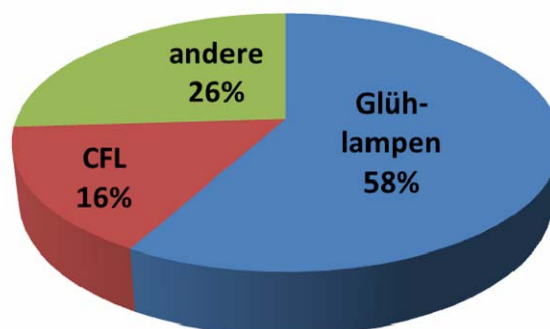
Aufbau-Deckenstrahler „DUO“ warmweiß (siehe Tabelle 37). Dabei spiegelt die sehr unterschiedliche Anzahl der in den beiden Lampen verbauten LEDs die in dieser Hinsicht große Bandbreite der LED-Lampen auf dem Markt wieder.

Tabelle 37 Kenndaten der drei exemplarischen LED-Lampen

Hersteller	Produktbezeichnung	Lichtstrom [lm]	Leistung [W]	Lichtausbeute lm/W	Anzahl LEDs	Farbtemperatur [K]
BIOLEDEX	NUMO 10 W E27	800	10	80,0	132	2.700
Koeppen	LED Lampe E27 800 lm CORN	800	11	72,7	72	4.000
LOBS.LED	LED-Aufbau-Deckenstrahler „DUO“ warmweiß	960	18	53,3	12	3.000





Ausgehend von einer Anzahl von 40 Mio. Haushalten in Deutschland, einem angenommenen Lichtstrombedarf von 41.000 Lumen je Haushalt und den in Tabelle 37 genannten Anzahlen von LEDs pro jeweiligem Leuchtmittel lassen sich nun die Mengen an kritischen Rohstoffen ermitteln, die bei einem vollständigen oder teilweisen Ersatz konventioneller Beleuchtung durch LED-Lampen in privaten Haushalten in Deutschland installiert werden würde. Dabei wird davon ausgegangen, dass eine verwendete weiße LED durchschnittlich die in Tabelle 30 aufgeführten Mengen an kritischen Metallen enthält. Die Werte der Hochrechnung sind in Tabelle 38 für unterschiedlich weitreichenden Ersatz konventioneller Beleuchtungsmittel angegeben: Für einen Ersatz von 70% aller Glühlampen, aller Glühlampen, aller Leuchtmittel mit Schraubgewinde (Glühlampen und CFL) sowie sämtlicher Leuchtmittel. Dabei wird davon ausgegangen, dass in Deutschland gegenwärtig etwa 58% des installierten Lichtstroms durch Glühlampen und 16% durch Energiesparbirnen (CFL) erzeugt werden (siehe Abbildung 26; dies sind Werte für Nordamerika nach (smil 2007), die als Berechnungsgrundlage dienen).

Abbildung 26 Berechnungsgrundlage für die Zusammensetzung des in einem Privathaushalt in Deutschland installierten Lichtstroms (2005)



Innerhalb Deutschlands kommen demnach bei einer weitergehenden Verwendung von LED-Lampen in Privathaushalten für Gallium, Gadolinium und Yttrium Mengen von einigen t zum Einsatz. Auch von den Seltenen Erdmetallen Cer und Europium fallen Mengen in der Größenordnung von einigen Hundert Kilogramm an. Dabei ist anzumerken, dass im Zuge des technologischen Fortschritts LEDs bei gleicher Lichtleistung in Zukunft voraussichtlich mit etwas kleineren LED-Chips als heute versehen werden und damit tendenziell ressourcenschonender sein dürften. Allerdings ist zu berücksichtigen dass sich die LED-Beleuchtung grundsätzlich auch für Beleuchtung außerhalb des privaten Bereichs (Straßenbeleuchtung, Lagerhallen, Bürogebäude) anbietet, da die verwendete Technologie grundsätzlich ähnlich wie für die private Nutzung ist. Eine Verwendung in diesen Bereichen würde die zur Fertigung der WLEDs benötigten Mengen kritischer Metalle erhöhen. Außerdem ist die nominelle Lebensdauer einer weißen LED mit etwa 50.000 Stunden zwar hoch im Vergleich zu anderen Leuchtmitteln, doch handelt es sich hierbei in der Regel um einen Laborwert, der in der Praxis oft nicht erreicht wird. U.a. wird die Lebensdauer eines gesamten LED-Moduls auch durch die Lebensdauer der Vorschalt-Elektronik bestimmt, die oft kleiner als die der LED selbst ist. Auch dadurch werden voraussichtlich eher größere Mengen an kritischen Metallen durch die Verwendung von WLEDs zur Beleuchtung im Umlauf sein.

Tabelle 38 Bandbreite des Bedarfs an den kritischen Metallen Gallium, Indium, Cer und Europium bei teilweisem bzw. vollständigem Ersetzen der Leuchtmittel in Haushalten in Deutschland durch LED-Lampen verschiedener Bauart.

LED-Anteil an Haushaltsbeleuchtung		Masse Ga [t]	Masse In [t]	Masse Ce [t]	Masse Eu [t]	Masse Gd [t]	Masse Y [t]
	70% aller Glühlampen ersetzt	3,63 1,98 0,27	3,24 1,77 0,25	0,22 0,12 0,02	0,067 0,037 0,005	1,67 0,91 0,13	3,57 1,95 0,27
	alle Glühlampen ersetzt	5,18 2,83 0,39	3,24 1,77 0,25	0,32 0,17 0,02	0,096 0,052 0,007	2,39 1,30 0,18	5,10 2,78 0,39
	alle Glühlampen + CFL ersetzt	6,58 3,59 0,50	4,62 2,52 0,35	0,41 0,22 0,03	0,122 0,066 0,009	3,04 1,66 0,23	6,48 3,54 0,49
	alle Leuchtmittel ersetzt	8,96 4,89 0,68	5,87 3,20 0,44	0,55 0,30 0,04	0,107 0,090 0,013	4,14 2,26 0,31	8,83 4,81 0,67

5.4 Erfassungsraten LED-Leuchten

LEDs sind eine relativ neue Produktgruppe, sodass derzeit noch keine spezifischen Werte für die End-of-life Erfassung vorliegen. Geht man davon aus, dass bei LEDs in Zukunft Erfassungsraten vergleichbar mit denen von anderen Leuchtmitteln erreicht werden, so kann entsprechend den Daten für Gasentladungslampen in Deutschland sowie den allgemeinen EU-Daten von einer Erfassungsrate von knapp 30% ausgegangen werden (BMU 2009, Huisman et al. 2007)³⁰.

5.5 Stand der Recyclingtechnik für LED-Leuchten

Da es sich bei den LED-Leuchten um eine erst in den letzten Jahren entwickelte Produktgruppe handelt, gibt es noch keine spezifischen Entwicklungen für eine spezifische Recyclingtechnik. Gleichwohl sind LED-Lampen in die Richtlinien des Zentralverbandes Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. aufgenommen (ZVEI 2009):

Die Entsorgung der Leuchten im technischen Bereich (b2b) schließt alle Leuchten () z.B. Leuchten mit fest integrierten LEDs () ein. Dies gilt auch für Einbau-LED-Module (). LED-Lampen und LED-Röhren () sind unabhängig von der Regelung zur Entsorgung von Leuchten entsorgungspflichtig und müssen () über die entsprechenden Lampenentsorgungswege, z.B. Recyclinghöfe oder Herstellerrücknahmesysteme entsorgt werden. Ausdrücklich ausgeschlossen im ElektroG sind () im privaten Bereich genutzte Leuchten von der Entsorgungsverpflichtung, dies gilt auch für Leuchten in Haushalten, die mit Einbau-LED-Modulen ausgerüstet sind.

5.6 Optimierungspotenziale in der Recyclingkette

Hierzu lassen sich zurzeit für LED-Leuchten noch keine belastbaren Aussagen und Empfehlungen ableiten. Hinsichtlich der Wiedergewinnung von Leuchtmitteln sollten in den nächsten ein und zwei Jahren die Fortschritte hinsichtlich des Seltenen Erden Recyclings aus den alten Energiesparlampen verfolgt werden. Es muss sich in Zukunft erweisen, ob die geringen Konzentrationen und Mengen an Seltenen Erden sowie an Indium und Gallium bei LED-Leuchten ein Recycling dieser Metalle zulassen.

³⁰ Die zu Grunde gelegten Werte beinhalten allerdings keine zeitlichen Verzögerungen durch die Nutzungsphase der Geräte. Es handelt sich daher lediglich um Abschätzungen der tatsächlichen Erfassungsraten.

6 Raffinerieprozesse für ressourcenrelevante Elektronikschrottfractionen

Für eine erfolgreiche Wiedergewinnung von kritischen Metallen aus Post-Consumer-Produkten wie in dieser Arbeit an den Produktgruppen Flachbildschirme, Smartphones, Notebooks und LED-Leuchten untersucht, sind neben einer guten Erfassung und Vorbehandlung der Post-Consumer-Produkte und Elektronikschrottfractionen ausgereifte Raffinationstechnologien und entsprechende Anlagenkapazitäten notwendig. Wie in den nachfolgenden Unterabschnitten ausgeführt, stellt sich die heutige Situation bzgl. der Raffinationstechnologien für die verschiedenen kritischen Metalle, die im Rahmen dieser Untersuchung als relevant für die vier Produktgruppen identifiziert wurden, sehr unterschiedlich dar. Dies bestätigt zurückliegende Untersuchungen des Öko-Instituts (UNEP 2009); allerdings lassen sich in den letzten 2-3 Jahren Veränderungen erkennen und weitere Fortschritte sind zu erwarten (siehe im Detail hierzu in den folgenden Unterabschnitten).

6.1 Edelmetalle

Es existieren bereits länger ausgereifte Raffinationsverfahren Edelmetalle wie Gold, Silber, Palladium und Platin aus verschiedenen Sekundärmaterialien wie Altschmuck, Industriekatalysatoren, Autoabgaskatalysatoren, Dentalprodukte und nicht zuletzt Elektronikschrott (siehe hierzu GFMS 2005, UNEP 2009) in hoher Reinheit zurückzugewinnen. Edelmetalle aus dem Bereich Elektronikschrott werden üblicherweise als äußerst wertvolles Beiprodukt aus der Sekundärkupferproduktion gewonnen. Üblicherweise werden geeignete Komponenten wie Leiterplatten (z.B. von Notebooks), die sowohl nennenswerte Mengen an Kupfer als auch geringere Mengen an Edelmetallen enthalten einem Schmelzprozess (Pyrometallurgie) unterworfen. Das Kupfer fungiert für die Edelmetalle dabei als sogenanntes Sammlermetall, d.h. die Edelmetalle werden in die sich bildende flüssige Kupferphase sehr gut eingebunden. Kunststoffanteile aus dem Elektronikschrott werden in den Prozessen als Energieträger genutzt. Unedle Bestandteile (z.B. Glas, Aluminium) werden in die Schlacke eingebunden. Nach dem Abstich der Kupferphase erfolgt in einer weiteren Verfahrensstufe (Elektrolyse des Rohkupfers) die Feinreinigung des Kupfers. Dabei fallen die enthaltenen Edelmetalle (Gold, Silber, Platin, Palladium) in deutlich erhöhter Aufkonzentration im sogenannten Anodenschlamm an. Aus diesem werden in speziellen Verfahren, die sich bei den einzelnen Unternehmen im Detail unterscheiden, die Edelmetalle mit sehr guten Rückgewinnungsraten (z.T. deutlich über 90% vgl. GFMS 2005) in hoher Reinheit zurückgewonnen.

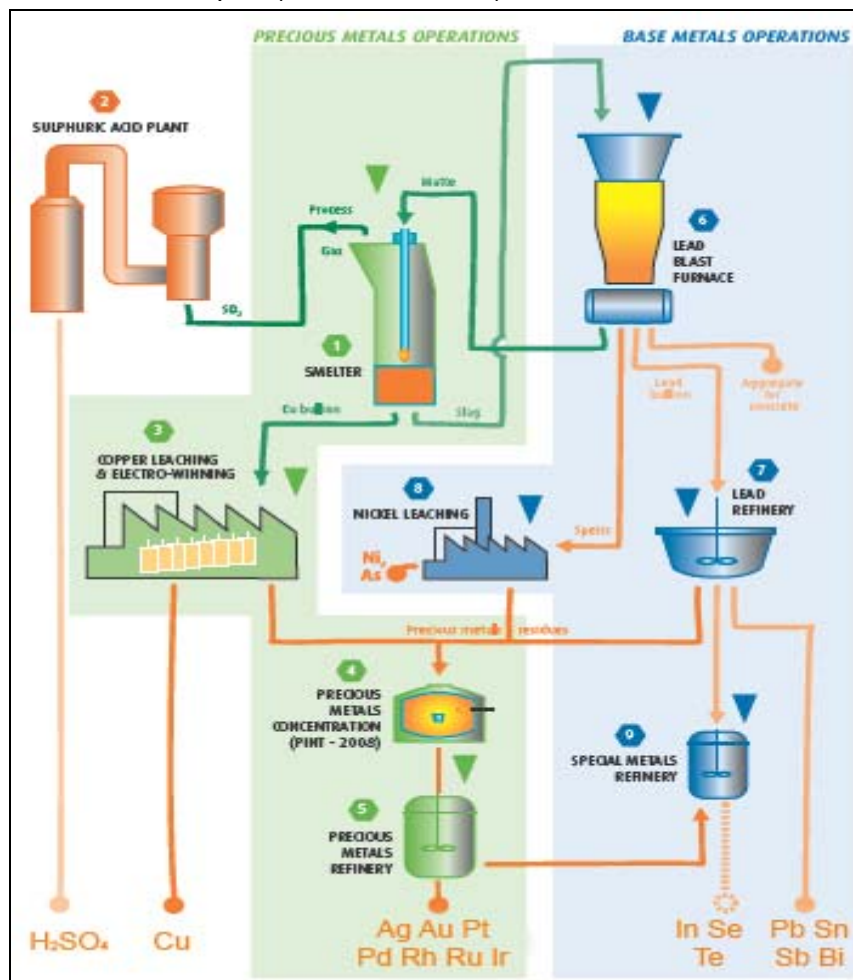
In Europa sind führende Unternehmen aktiv, die Sekundärkupfer und die genannten Edelmetalle in hochmodernen Anlagen zurückzugewinnen. Aufgrund der stark wachsenden Mengen von Elektronikschrott sind deutliche Ausweitungen der Verarbeitungskapazitäten festzustellen. Der deutsche Kupferkonzern Aurubis hat in 2011 am Standort Lünen in Nordrhein-Westfalen seine gesamte Recyclingkapazität deutlich erhöht. Der Durchsatz im bestehenden KRS-Badschmelzofen in Lünen klettert von 275.000 auf 350.000 Tonnen pro Jahr (EUWID 2011a). Die Anlage ist nach Angaben des Unternehmens besonders auf den Einsatz komplexer Recyclingmaterialien wie metallhaltige Industriereststoffe, kupferhaltige

Schreddermaterialien sowie Elektro- und Elektronikschrotte geeignet. Weitere Kapazitäten für das Recycling von Elektronikschrott befinden sich im Werk Hamburg von Aurubis.

In Skandinavien verfügt der schwedische Bergbau- und Metallkonzern Boliden ebenfalls über Kupferhütten, die Sekundärkupfer und Edelmetalle aus Elektronikschrotten gewinnen. Die Recyclingkapazitäten des Konzerns für Elektronikschrott werden aktuell erheblich ausgeweitet: von 45.000 Tonnen auf 120.000 pro Jahr (EUWID 2011b).

In Belgien (in Hoboken bei Antwerpen) verarbeitet das Unternehmen Umicore ein breites Spektrum an Sekundärmaterialien. Jährlich werden hier mittels eines komplexen pyrometallurgischen Prozesses aus über 350.000 t Einsatzmaterial (Katalysatoren, Leiterplatten, Mobiltelefone, industrielle Zwischenprodukte und Rückstände, Schlacken, Flugstäube, etc.) wertvolle Metalle mit hohen Ausbeuten zurück gewonnen (siehe Abbildung 27).

Abbildung 27 Verfahrensfließbild von Umicore's integrierter Edelmetallhütte in Hoboken bei Antwerpen (Quelle: Umicore)



Die Prozessführung wurde ursprünglich auf die Edelmetalle (hier Gold, Silber, Platin, Palladium, Rhodium, Ruthenium, Iridium) optimiert, so dass hohe Durchlaufzeiten und Edelmetallausbeuten erreicht wurden, bzw. werden. Durch die kombinierte Verarbeitung einer großen Bandbreite komplexer, edelmetallhaltiger Materialien lassen sich die Durchsatzquoten zu-

sätzlich erhöhen. Gleichzeitig steigen die Flexibilität und die Unempfindlichkeit gegenüber Verunreinigungen. Das in der Schmelze enthaltene Kupfer bindet die Edelmetalle und wird beim Abstich direkt granuliert und einem nachgeschalteten Elektrolyseprozess zugeführt, wo letztlich die Edelmetalle vom Kupfer getrennt werden. Die Primärschlacke durchläuft dagegen einen weiteren Hochofenprozess, bei dem Blei und andere NE-Metalle abgetrennt und wiederum restliche Edelmetallanteile zurückgewonnen werden. Hierbei tritt erneut Seitenstrommaterial auf, das ebenfalls wieder in den Prozesskreislauf eingesteuert wird und anschließend weiter verarbeitet werden kann. Die so vorangereicherten Konzentrate werden in spezifische, hydrometallurgische Prozesse eingeschleust, bis die einzelnen Elemente in hochreiner Form zurück gewonnen werden. Somit können heute neben den Edelmetallen auch eine Reihe von Sondermetallen (z.B. Tellur) recycelt werden.

Insgesamt kann bzgl. der Raffination der Edelmetalle festgestellt werden, dass in Deutschland und Europa reife Technologien für die Sekundärgewinnung dieser wertvollen Metalle mit sehr guten Rückgewinnungsraten im Einsatz sind. Es bestehen beträchtliche Anlagenkapazitäten, die zudem aktuell erheblich ausgebaut werden. Schwachstellen in der Recyclingkette bzgl. der Edelmetalle liegen noch z.T. im Bereich der Erfassung der Elektronikgeräte bzw. –komponenten und den Vorbehandlungsschritten (siehe entsprechende Unterabschnitte in den Kapiteln 2 – 5).

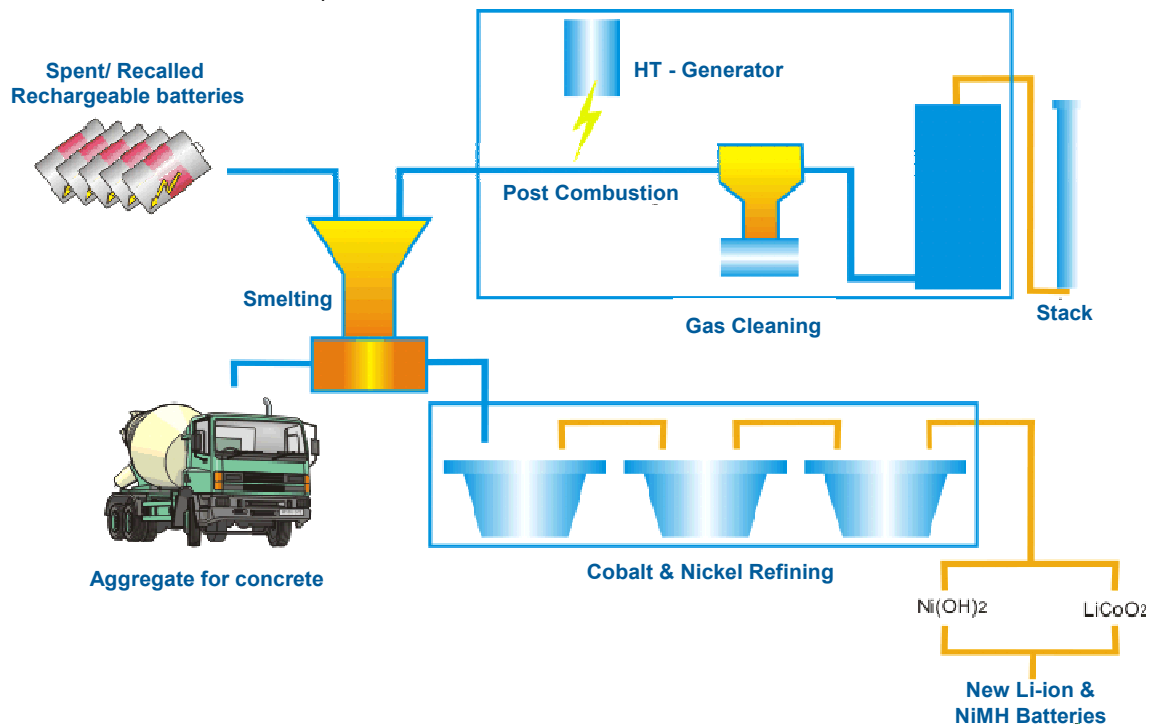
6.2 Kobalt

Wie in den Abschnitten 3 und 4 ausgeführt, spielen die Akkus von Notebooks und Smartphones bzgl. Kobalt eine wichtige Rolle. Im Gegensatz zu anderen kritischen Metallen gibt es im Falle von Kobalt für eine Reihe von Anwendungen bereits etablierte Recyclingkreisläufe: dies gilt vor allem für Kobaltlegierungen und kobalthaltige Superlegierungen aber auch Kobaltkatalysatoren (UNEP 2009) aus dem industriellen Bereich und neuerdings aus dem Bereich der wieder aufladbaren Batterien (Meskers et al. 2009). Das BMU förderte 2009 bis 2011 zwei parallele Projekte, die Forschung – und Entwicklung des Recyclings von Lithium-Ionenbatterien aus dem Automobilbereich (e-mobility) zum Gegenstand hatten (Kwade et al., Treffer et al.). Im Sommer 2011 hat das belgische Material- und Recyclingunternehmen Umicore am Standort Hoboken bei Antwerpen eine pyrometallurgische Anlage mit einer Inputkapazität von 7.000 Jahrestonnen Lithium-Ionenbatterien und Nickelmetallhydrid-Batterien offiziell eingeweiht (Umicore 2011b). Die neue Anlage wird mit gemischtem Input dieser kobalt- und nickelhaltigen Batterien gespeist. Eingesetzt werden zurzeit vor allem Batterien von Notebooks, Mobiltelefonen und Power tools. Die Anlage ist jedoch auch für die Verarbeitung von Batteriezellen aus dem Automobilbereich vorgesehen.

Aus dem Schmelzprozess wird bei hohen Temperaturen als Hauptprodukt eine kobalt-/nickel-/kupferreiche Legierung erhalten. Kohlenstoffhaltige Bestandteile (Kunststoffe, Graphit, Elektrolyt) werden als Energieträger genutzt, Schadstoffe im Abgasstrom durch eine moderne Abgasreinigung weitestgehend reduziert. Als wesentliches Nebenprodukt wird eine Schlacke produziert, die in der Baustoffindustrie (Zuschlagstoff für Zementproduktion) eingesetzt wird. Die aus dem Prozess gewonnene Legierung wird in einer bestehenden Kobalt/Nickel-Refininganlage im belgischen Olen von Verunreinigungen wie Eisen- und Mangan befreit. Als Hauptprodukte entstehen reine Nickel- und Kobaltsalze (z.B. Sulfate), die erneut

für die Produktion von Kathodenmaterial für Batterien eingesetzt werden. Als wichtiges Nebenprodukt des Prozesses fällt sogenannter Kupferzement an, der in Antwerpen zu reinem Kupfer weiterverarbeitet wird.

Abbildung 28 Verfahrensfliessbild des Batterierecyclings von Umicore in Belgien (Quelle: Umicore)



Für die kobalthaltigen Lithiumionen-Batterien aus Notebooks, Mobiltelefonen und nun Smartphones bestehen daher realisierte Recyclingtechnologien und –kapazitäten. Aufgrund ihres hohen Kobaltgehaltes stellen diese Batterien für das Recycling ein attraktives End-of-Life Produkt dar. Erneut liegen hier die größten Herausforderungen für die Recyclingwirtschaft in einer deutlich verbesserten Erfassung und konsequenten Separierung der Batterien in Vorbereitung für die beschriebenen Raffinationsprozesse.

6.3 Seltene Erden

Aufgrund der lange sehr niedrigen Preise für Seltene Erden wie Neodym, Praseodym etc. bestand bis vor wenigen Jahren kaum ein Anreiz zum Recycling dieser Metalle bzw. ihrer Verbindungen. Hinzu kommen für pyrometallurgische Prozesse ungünstige chemische Eigenschaften. Aufgrund ihres unedlen Charakters werden die Seltenerdmetalle ganz im Gegensatz zu den Edelmetallen nicht in einer Kupferphase mit hoher Ausbeute aufgenommen, sondern gelangen verdünnt in Form ihrer Oxide in Schlacken und sind damit bislang für das Recycling nicht verfügbar (UNEP 2009, Schüler et al. 2011). Weiterhin gelangen die Seltenerdmetalle Neodym, Praseodym, Dysprosium und Terbium, die in Neodym-Dauermagneten z.B. in Notebooks enthalten sind, in den gängigen Vorbehandlungsprozessen für Elektroschrott (u.a. mit Magnetabscheidung) als feine Partikel, gebunden

an die größeren Stahlschrottströme in das Stahlrecycling (die Neodym-Dauermagnete haben spröden Charakter und werden daher bei mechanischer Beanspruchung leicht zerstäubt) und sind damit für eine Wiedergewinnung verloren. Insgesamt sind die sogenannten End-of-Life Recyclingraten (EOL-RR), welche die Rückgewinnungsraten über alle Stufen des Recyclings (Sammlung, Aufbereitung, Refining) aus dem Post-Consumer Bereich darstellen, für alle Seltene Erden gegenwärtig kleiner ein Prozent bis null (Graedel et al. 2011).

Aufgrund der z.T. dramatischen Zuspitzung der Versorgung der westlichen Industriestaaten mit Seltenen Erden, die gegenwärtig zu rund 97% in der Volksrepublik China gefördert und weiterverarbeitet werden, ist das Recyclingthema für Seltene Erden stark in den Vordergrund gerückt (Buchert et al. 2011). Das Öko-Institut hat in diesem Zusammenhang den Aufbau und die Etablierung eines Europäischen Kompetenznetzwerkes mit Schwerpunkt Recycling von Seltener Erden vorgeschlagen, um vorhandene Kompetenzen in Wissenschaft und Wirtschaft zu bündeln, Synergien zu schaffen und damit möglichst bald messbare Fortschritte bzgl. des Recyclings von Seltenen Erden zu erzielen (Schüler et al. 2011).

Unter der Leitung von Siemens ist beispielsweise in 2011 das Verbundprojekt MORE zur Forschung der Wiederverwendung von Komponenten, Magnetlegierungen bzw. Seltenen Erden aus dem Anwendungsfeld Elektromobilität (Elektromotoren mit Neodym-Dauermagneten) gestartet worden (Bast et al. 2011). Besonders erwähnenswert ist die Ankündigung des französischen Unternehmens Rhodia, welches große Erfahrungen in der Chemie der Seltenen Erden u.a. anderem für die Herstellung von Leuchtstoffen und der Katalysatorherstellung (Ce für Autoabgaskatalysatoren) besitzt, im 1. Quartal 2012 in zwei eigenen Anlagen mit dem Post-Consumer-Recycling von Seltenen Erden aus alten Energiesparlampen etc. zu beginnen. Hier ist hervorzuheben, dass bereits auf Grundlage des WEEE in der EU diese Lampen separat erfasst und einer geeigneten Behandlung (Quecksilberentfrachtung und –erfassung) zugeführt werden müssen. Bislang wurden die Leuchtstoffe – und die darin enthaltenen Seltenen Erden wie z.B. Yttrium, Europium, Terbium deponiert. Nach Realisierung und erfolgreichem Betrieb dieser Anlagen in Frankreich (La Rochelle und Saint-Fons) wäre erstmals weltweit ein Post-Consumer Recycling von Seltenen Erden realisiert.

6.4 Gallium, Indium

Ebenso wie im Falle der Seltenen Erden sind weltweit die EOL-RR für Gallium und Indium gegenwärtig kleiner 1% bis null (Graedel et al. 2011). Die Gründe liegen in weltweit noch recht geringen Einsatzmengen (Im Falle von Gallium beträgt die Primärproduktion gut 100 t/a im Falle von Indium rund 600 t/a, UNEP 2009) und in der Regel dissipativen Anwendungen, d.h. je Produkteinheit sind nur relativ geringe Mengen dieser Metalle enthalten. Dies stellt an Recyclingsysteme und –technologien sehr hohe Ansprüche. Allerdings ist das Recycling von Gallium und Indium aus Verarbeitungsrückständen z.B. in Japan aber auch in Deutschland realisiert und etabliert (UNEP 2009, PPM 2011). Das Recycling von Gallium und Indium aus Elektronikschrottfraktionen, die in diesem Projekt untersucht werden, ist jedoch gegenwärtig nicht möglich. Entsprechende Technologien fehlen. Allerdings sind in naher Zukunft entsprechende Forschungs- und Entwicklungsprojekte wahrscheinlich.

6.5 Tantal

Tantal gehört ebenfalls in die große Gruppe von Metallen, die noch End-of-Life Recyclingraten von <1% aufweisen. Abgesehen von Anwendungen für besondere Legierungen (Flugzeugbau) und industrielle Schneidewerkzeuge (Tantalcarbid) ist Tantal in speziellen Kondensatoren enthalten, die für Leiterplatten verwendet werden. Daher ist vor allem für die untersuchte Gerätegruppe Notebooks Tantal von Relevanz. Vergleichbar mit den Seltenen Erden wird Tantal aufgrund seines unedlen Charakters in den üblichen pyrometallurgischen Prozessen für das Refining von Leiterplattenschrott als Tantaloxyd in die entstehenden Schlacken überführt. Dort sind die Konzentrationen von Tantal viel zu niedrig, um eine Rückgewinnung großtechnisch zu realisieren. Im Zusammenhang mit Tantal ist zu erwähnen, dass mit dem Unternehmen H.C. Starck der Weltmarktführer für die Verarbeitung von Tantalverbindungen in Deutschland ansässig ist und damit ein hohes Know-How in entsprechender Prozesstechnik. H.C. Starck ist prinzipiell offen und interessiert an der Rücknahme von Tantalrückständen zum Recycling (H.C. Starck 2011). Ein Recycling von Tantal aus Kondensatoren von Leiterplatten würde jedoch eine mechanische Separierung dieser Kondensatoren von den Leiterplatten erfordern, die bislang nicht realisiert ist.

7 Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen

In diesem Abschnitt werden die detaillierten Ergebnisse der Untersuchung, d.h.

- Die Sachbilanz hinsichtlich der untersuchten Metalle und Geräte,
- Die Beschreibung der Marktsituation und –entwicklung,
- Die Darstellung der derzeitigen Situation beim Recycling und
- Die Entwicklungen beim Recycling

welche in den Kapiteln 1 bis 6 im Detail ausgeführt werden, zusammengefasst und darauf aufbauend Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Sachbilanz

Im Rahmen der Sachbilanz werden anhand der ermittelten Gehalte der untersuchten Metalle je Geräteeinheit und der 2010 in Deutschland auf den Markt gebrachten Einheiten an Flachbildschirmen, Notebooks und Smartphones (nur privater Markt, ohne Geschäftskunden) die Metallpotenziale im Hinblick auf ein späteres Recycling zusammengefasst. Für die vierte untersuchte Gerätegruppe LED-Leuchten (berücksichtigt sind hier nur Anwendungen im privaten Wohnbereich) wird mangels scharfer Verkaufszahlen für dieses Teilsegment ein 70% Ersatz aller Glühlampen bzw. sämtlicher Leuchtmittel in privaten Haushalten angesetzt, um zu einer Einschätzung der Relevanz zu gelangen. Die Ergebnisse der Sachbilanz sind in Tabelle 39 als Übersicht zusammengefasst. Die einzelnen Werte, die aus den Abschnitten 2 bis 5 entnommen sind, sind in der Übersicht gerundet dargestellt. Relevante Mengen im Sinne eines Recyclingpotenzials sind jeweils in roter Schriftfarbe im Fettdruck hervorgehoben.

Hinsichtlich der untersuchten Metalle bzw. Metallgruppen sind aus der Sachbilanz folgende Ergebnisse hervorzuheben:

- **Seltene Erden (Leuchtmittel):** für Europium, Gadolinium und Yttrium besteht bei LED-Leuchten eine Relevanz und daher ein Recyclingpotenzial für die Zukunft, im Falle von Yttrium zusätzlich in Flachbildschirmen,
- **Seltene Erden (Permanentmagnete):** für Neodym und Praseodym zeigt sich eine deutliche Relevanz bei Notebooks,
- **Edelmetalle:** für Gold, Silber und Palladium ergibt sich ein nennenswertes Potenzial in den Gerätegruppen Flachbildschirmen, Notebooks und Smartphones,
- **Gallium:** für Gallium zeigt sich ein Potenzial für die Gerätegruppe LED-Leuchten (Halbleiterchips),
- **Indium:** für Indium ergibt sich vor allem eine Relevanz in Flachbildschirmen sowie in LED-Leuchten (Halbleiterchips),
- **Kobalt:** für Kobalt ergibt sich ein beachtliches Potenzial bei den Gerätegruppen Notebooks und Smartphones (jeweils durch Lithium-Ionen-Akkus),
- **Tantal:** für Tantal kann ein Potenzial in der Gerätegruppe Notebooks konstatiert werden.

Tabelle 39 Übersicht der Sachbilanzergebnisse für die Produktgruppen Flachbildschirme, Notebooks, Smartphones und LED-Leuchten (private Haushalte Deutschland)

Metall		Gehalt in allen 2010 in D verkauften Flachbildschirmen [kg]	Gehalt in allen 2010 in D verkauften Notebooks [kg]	Gehalt in allen 2010 in D verkauften Smartphones [kg]	Schätzung für LED: Ersatz von 70% der Glühlampen [kg]	Schätzung für LED: Ersatz aller Leuchtmittel [kg]	Vorkommen
Cer	Ce	30	1		120	300	Leuchtstoff
Dysprosium	Dy		430				Schwingspulenbetätiger
Europium	Eu	50	<1		40	90	Leuchtstoff
Gadolinium	Gd	10	5		910	2.260	Leuchtstoff
Gallium	Ga	15	10		1.980	4.890	Halbleiter-Chip
Gold	Au	1.645	740	230			Leiterplatten, Kontakte
Indium	In	2.365	290		1.800	3.200	Displayinnenbeschichtung; Halbleiterchips
Kobalt	Co		461.000	48.500			Lithium-Ionen-Akkus
Lanthan	La	40	<1				CCFL-Hintergrundbeleuchtung
Neodym	Nd		15.160	385			Permanentmagnete
Palladium	Pd	465	280	85			Leiterplatten, Kontakte
Platin	Pt		30				Festplattenscheiben
Praseodym	Pr	<1	1.950	80			Schwingspulenbetätiger, Lautsprecher; CCFL-Hintergrundbeleuchtung
Silber	Ag	6.090	3.100	2.350			Leiterplatten, Kontakte
Tantal	Ta		12.065				Kondensatoren
Terbium	Tb	14	<1				CCFL-Hintergrundbeleuchtung
Yttrium	Y	680	12		1.950	4.810	Leuchtstoff

Es ist unbedingt zu beachten, dass die Einschätzung zur Relevanz hinsichtlich der Menge zwischen den einzelnen Metallen mit z.T. sehr unterschiedlichen Maßstäben gewichtet werden muss (jeweils im Verhältnis zur Weltproduktion - die sich sehr stark unterscheiden kann, des Preises je Kilogramm, der globalen Versorgungssituation usw.). Weiterhin sind in der Schwerpunktsetzung in der Übersicht Aspekte wie potenzielle Recyclingmöglichkeiten aus dem jeweiligen Gerätetyp bzw. der spezifischen Komponente mit berücksichtigt. Die in der obigen Tabelle in roter Schrift und mit Fettdruck hervorgehobenen Bereiche, legen als Ergebnis der Sachbilanz eine entsprechende Schwerpunktsetzung für heutige bzw. zukünftige Recyclinganstrengungen hinsichtlich der untersuchten Metalle nahe.

Marktsituation und Entwicklung

Für die vier untersuchten Gerätegruppen kann die Marktsituation und die zukünftige Entwicklung wie folgt zusammengefasst werden:

LCD-Flachbildschirme zeigten im **TV-Segment** zuletzt erneut ein starkes Wachstum hinsichtlich der Verkaufszahlen in Deutschland (8,3 Millionen Geräte in 2010, plus 9,3% gegenüber 2009). Der Bestand an TV-Flachbildgeräten in privaten Haushalten wird aktuell auf rund 50 Millionen geschätzt, darunter sind zum weitaus größten Anteil LCD-Fernseher. Starke technische Trends bei dieser Gerätegruppe sind ein immer höherer Anteil von Geräten mit LEDs (2011: 40%) als Hintergrundbeleuchtung und die eindeutige Tendenz zu immer größeren Bildschirmgrößen. Das Segment **PC-Monitore** war bei den Verkaufszahlen mit rund minus 21% stark rückläufig (2010: 2,6 Millionen verkaufte Geräte). Hier macht sich der starke Trend zu Notebooks und Tablet-PCs entsprechend bemerkbar.

Notebooks haben sich zu den treibenden Größen auf dem deutschen Markt für Computer entwickelt. Seit 2005 ist der Absatz an den mobilen Computern im privaten Bereich um etwa den Faktor 3-4 gestiegen. Insgesamt wurden in Deutschland im Jahr 2010 im Privatsektor 7.097.000 Notebooks (inkl. Tablet-PCs) verkauft. Es besteht für die Tablet-PCs eine Aussicht auf einen Anteil von bis zu 30% im Jahr 2013. Der Anteil von LEDs für die Hintergrundbeleuchtung lag 2010 weltweit bereits bei 92%. Der Trends zu den Tablet-PCs forciert den Einsatz einer höheren Zahl an LEDs (im Vergleich zu Notebooks), um eine hellere Hintergrundbeleuchtung zu gewährleisten.

Smartphones treten wie Tablet-PCs gegenwärtig global einen Siegeszug bei den Kunden an, nicht zuletzt bei der wichtigen jüngeren Konsumentengruppe. So wurden allein in Deutschland im Jahr 2010 rund 7.702.000 Smartphones verkauft; das Wachstum betrug gegenüber 2009 +161,4%. Für Elektronikprodukte wie Smartphones ist von einer relativ kurzen tatsächlichen Gebrauchsdauer von höchstens drei bis vier Jahren auszugehen, nicht zuletzt getrieben durch die Anschaffung immer neuer und leistungsfähiger Gerätegenerationen. Dies bedeutet, dass die in den letzten drei Jahren extrem angestiegene Anzahl von Smartphones in der Nutzungsphase sehr bald die Nachgebrauchsphase und damit die Kreislaufwirtschaft in Deutschland erreichen wird.

LED-Leuchten(Verwendung von Beleuchtungsmitteln auf Basis von weißen LEDs) im privaten Sektor sind ein sehr neuer Trend. Es existieren keine Zahlen für dieses Segment, da entsprechende Studien in der Regel weiße LEDs gesamt, d.h. ohne Unterscheidung der Anwendung erfassen. Es wird geschätzt, dass global im Jahr 2009 bereits 21 Mrd. weiße LEDs gefertigt wurden (Wachstumsrate ca. 11% pro Jahr). Für die nächsten Jahre (bis 2020 bzw. 2030 wird weiterhin von starken Wachstumsraten ausgegangen. Die zukünftige Marktdurchdringung der LED-Leuchten für das wichtige Anwendungsfeld private Haushalte wird entscheidend von technischen (Lichtausbeute usw.) und preislichen Faktoren abhängen. Ungeachtet dieser Variablen sind auch für das Anwendungsfeld private Haushalte in den nächsten Jahren starke Wachstumsraten für LED-Leuchten in Deutschland zu erwarten.

Derzeitige Situation beim Recycling

Die Untersuchung hat klar aufgezeigt, dass ungeachtet z.T. sehr weit entwickelter und etablierter Recyclingverfahren für die Raffination einer Reihe von Metallen aus Elektronik-Altgeräten, (vor allem Kupfer und Edelmetalle) noch große Defizite bei der Erfassung und Vorbehandlung bzgl. der untersuchten Gerätegruppen bestehen, wobei Smartphones und LED-Leuchten aufgrund ihrer erst kürzlich erfolgten Markteinführung zur Zeit noch nicht (jedoch in naher Zukunft) in nennenswerten Mengen in der Kreislaufwirtschaft eine Rolle spielen. Eine wesentliche Ursache für große Verluste an kritischen Metallen in den ersten Stufen der Recyclingketten (Zerlegung und Vorbehandlung) liegt auch in einer unerwünschten Fehlallokation durch gesetzliche Vorgaben wie massenbasierte Recyclingquoten, die selektiven Zerlegungen gegenüber dem Einsatz von Schreddertechnologien entgegenläuft.

Tabelle 40 Potenziale kritischer Rohstoffe in Notebooks und Verluste bei den derzeit in Deutschland gängigen Sammel- und Behandlungssystemen.

Metall		Gehalt in allen 2010 in D verkauften Notebooks [t]	Verluste bei der Erfassung	Verluste bei der Vorbehandlung	Verluste bei der Endbehandlung	Rückgewinnung in Deutschland [t]
Kobalt	Co	461,31	50%	20%	4%	177
Neodym	Nd	15,16		100%	100%	0
Tantal	Ta	12,06		100%	5%	0
Silber	Ag	3,11		70%	5%	0,443
Praseodym	Pr	1,94		100%	100%	0
Gold	Au	0,74		70%	5%	0,105
Dysprosium	Dy	0,43		100%	100%	0
Indium	In	0,29		20%	100%	0
Palladium	Pd	0,28		70%	5%	0,040
Platin	Pt	0,028		100%	5%	0
Yttrium	Y	0,012		40%	100%	0
Gallium	Ga	0,010		40%	100%	0
Gadolinium	Gd	0,0048		40%	100%	0
Cer	Ce	0,00069		40%	100%	0
Europium	Eu	0,00028		40%	100%	0
Lanthan	La	0,00008		40%	100%	0
Terbium	Tb	0,00003		40%	100%	0

In Tabelle 40 sind für die wichtige Produktgruppe Notebooks die Gesamtpotenziale kritischer Rohstoffe für Deutschland, sowie die potenziellen Verluste bei der Anwendung gängiger Sammlungs-, Vorbehandlungs- und Raffinerieverfahren dargestellt. Insgesamt wird in dieser Darstellung angenommen, dass die in 2010 verkauften Geräte (die im Schnitt in etwa nach 6,6 Jahren die Nachgebrauchsphase erreichen) entsprechend den heute in Deutschland üblichen Sammel- und Recycling- und Entsorgungsstrukturen gehandhabt werden.³¹ Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass bislang nur ein Bruchteil der in Notebooks enthaltenen kritischen Metalle wieder in den industriellen Kreislauf eingespeist wird.

Die niedrige Erfassungsrate für Notebooks von nur rund 50% ist durch den starken Abfluss von Material durch vielfach illegale Exporte nach z.B. Afrika oder Asien bedingt. Vielfach werden z.B. auch einfache – aber wichtige - manuelle Zerlegschrte, wie die Entnahme der kobalthaltigen Akkus als Voraussetzung einer anschließenden spezifischen Behandlung und Rückgewinnung der Batteriemetalle, nicht praktiziert. Diese Defizite in der Vorbehandlung führen nach den Verlusten bei der Erfassung zu weiteren Totalverlusten an Sekundärmetallen. Die manuellen Verfahren werden aus folgenden Gründen derzeit nicht flächendeckend angewendet:

- Die erhöhten Lohnkosten durch manuelle Entnahme werden bei niedrigen und mittleren Rohstoffpreisen nicht vollständig durch die Mehreinnahmen kompensiert;
- Viele angelieferte Chargen sind unzureichend sortiert, sodass rohstoffrelevante Geräte erst aufwendig von anderen, weniger rohstoffrelevanten Geräten (z.B. Bügeleisen, Toaster) separiert werden müssten.

Diese Gründe zusammen mit den gesetzlich festgeschriebenen Verwertungsquoten der WEEE-Direktive und des EAGs sowie ein marktwirtschaftlicher ausgetragener Wettbewerb um die kostengünstigste Entsorgung bedingen ein Anreizsystem, das überwiegend zu einer mechanisierten Aufbereitung sowie einen Fokus auf Massenrohstoffe führt.

Die Erfassungsraten von Mobiltelefonen (quasi den Vorläufern von Smartphones) liegen derzeit sehr niedrig (5%). Dies ist problematisch, da Mobiltelefone wie Smartphones ohne Zwischenschritte (bis auf die wichtige vorherige manuelle Entnahme der Akkus) direkt in pyrometallurgischen Anlagen verwertet werden können: vor allem Kupfer und die Edelmetalle Silber, Gold und Palladium können auf diese Weise mit sehr guten Rückgewinnungsraten (rund 95%) wieder in den Wirtschaftskreislauf zurückgebracht werden.

Am besten stellt sich die gegenwärtige Situation bzgl. der Erfassungsraten von allen untersuchten Produktgruppen bei Fernsehgeräten (85%) und damit den entsprechenden Flachbildschirmen dar. Für LED-Leuchten gibt es noch keine Erfahrungswerte; diese Produktgruppe ist noch zu jung und hat die Kreislaufwirtschaft noch nicht in nennenswertem Umfang erreicht.

³¹ Es wurden folgende Annahmen getroffen: Kobalt: 80% der Akkus werden entnommen und einer gesonderten Verwertung zugeführt; die Endbehandlung erreicht eine Rückgewinnungsrate von 96%. Tantal: Die Endbehandlung erreicht eine Rückgewinnungsrate von 95%. Indium: 80% der Notebookdisplays werden einer gesonderten Verwertung zugeführt. Yttrium, Gallium, Gadolinium, Cer, Europium, Lanthan, Terbium: Bei 40% der Notebooks wird die Hintergrundbeleuchtung einer gesonderten Verwertung zugeführt (Lampenrecycling). Platin auf den Festplattenscheiben gehen über die Schredderleichtfraktion oder Aluminiumfraktion komplett verloren.

Entwicklungen beim Recycling

Es bedarf bzgl. der Rückgewinnung von **Seltenen Erden** aus den in Notebooks enthaltenen Magneten Pilotuntersuchungen zu deren manuellen Entnahme und Separierung. Ebenso muss die Entnahmekquote der Hintergrundbeleuchtung bei Notebooks deutlich über die derzeit angenommen 40% angehoben werden. Die Lücke der fehlenden Endbehandlungsmöglichkeiten für Seltene Erden könnte im Falle der Leuchtstoffe in nächster Zukunft durch die Inbetriebnahme entsprechender neuer Anlagen (siehe Kapitel 6) geschlossen werden. Auch hinsichtlich der Rückgewinnung von Seltenen Erden aus Neodym-Permanentmagneten ist eine Reihe von umfassenden Forschungsprojekten angelaufen, so dass auch hier in Zukunft mit Lösungen durchaus zu rechnen ist. Insgesamt kann durch Umsetzung dieser Maßnahmen ein erheblich höherer Anteil des Potenzials an kritischen Metallen, die in Notebooks enthalten sind, zurückgewonnen und den Märkten erneut zur Verfügung gestellt werden.

Hinsichtlich des Recyclings von Lithium-Ionenbatterien, die u.a. das wichtige Metall **Kobalt** enthalten, zeichnen sich nach Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen in der jüngsten Vergangenheit Lösungen ab und Anlagenkapazitäten wurden geschaffen. Entscheidend für eine erfolgreiche Rückgewinnung von Kobalt aus diesem Segment ist daher umso mehr die Erhöhung der zukünftigen Erfassungs- und Abtrennungsraten von Lithium-Ionenbatterien aus Notebooks, Smartphones usw.

Das Recycling von **Gallium**, **Indium** und **Tantal** aus Elektronik-Altgeräten ist noch nicht realisiert. Für ein künftiges Recycling sind neben einer konsequenten Separierung der entsprechenden Komponenten auch noch viele Anstrengungen hinsichtlich ihrer Aufkonzentrierung in den Sekundärmaterialströmen und letztlich ihrer finalen Rückgewinnung in ausreichender Reinheit notwendig. Hierzu ist vor allem für Indium in naher Zukunft von verstärkten Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen auszugehen.

Handlungsempfehlungen

Aufbauend auf der Untersuchung können daher folgende Empfehlungen abgeleitet werden:

- Hinsichtlich der Optimierung der Recyclingraten ist bei allen Produktgruppen eine **deutliche Erhöhung der Erfassungsraten** anzustreben. Dies kann einerseits über verbesserte Sammelinfrastruktur, andererseits über zielgerichtete Informations- und Rücknahmekampagnen erreicht werden. Besonderer Optimierungsbedarf besteht dabei bei Kleingeräten wie Smartphones, von welchen in Deutschland derzeit nur etwa 5% einem geregelten Recycling zugeführt werden. Hier sollte insbesondere erwogen werden, die bestehende Sammelinfrastruktur für Altbatterien auf Kleingeräte wie Handys, Smartphones, MP3-Spieler und Kameras auszuweiten. Prinzipiell sollte eine solch verbesserte Sammelstruktur auch für Leuchtmittel aufgebaut werden, da sowohl Gasentladungslampen, als auch LEDs beträchtliche Rohstoffpotenziale darstellen. Bei der Konzeption einer entsprechenden Sammelinfrastruktur müssen dabei gegen die potenziellen Quecksilberemissionen aus beschädigten Gasentladungslampen Maßnahmen berücksichtigt werden.

- Zur Erhöhung der Erfassungsrate müssen zudem die **illegalen Altgerätexporte** nach Osteuropa, Afrika und Asien in Betracht eingedämmt werden. Zwar zeigen jüngere Studien auf, dass ein Teil der Exporte zum Zwecke der Wiederverwendung als Gebrauchtware durchgeführt wird und somit nicht zwangsläufig als illegal einzustufen ist, viele Exporte dienen jedoch primär dem Zweck der kostengünstigen Entsorgung und sind somit aus Nachhaltigkeitssicht in vielfacher Hinsicht negativ zu bewerten. Mit Hilfe verbesserter Ausfuhrkontrollen können diese Probleme deutlich reduziert werden und Rohstoffpotenziale in der EU zurückgehalten werden. Dies setzt voraus, dass den implementierenden Behörden klare und praktikable Handreichungen zur Unterscheidung von nicht mehr verwendbaren Altgeräten (Export illegal) und wiederverwendbaren Gebrauchtgeräten (Export legal) an die Hand gegeben werden (Funktionsfähigkeit der Geräte, angemessene Transportverpackungen usw.).
- Hinsichtlich einer **Optimierung der Recyclingkette** ist zu beachten, dass einseitig formulierte Vorgaben und rein massenbasierte Quoten negative Anreize für die Rückgewinnung kritischer Rohstoffe entfalten können. So beinhaltet die Europäische WEEE-Direktive in Artikel 7 quantitative Zielvorgaben für die Verwertung von Altgeräten. Da diese Quoten nicht material- oder bauteilspezifisch formuliert sind, sondern sich auf Massenprozent der Gesamtgeräte beziehen, schaffen diese zwar einen regulativen Anreiz für das Recycling von Massenrohstoffen wie Stahl, Kupfer, Glas usw., nicht aber für kritische Rohstoffe, die i.d.R. nur einen sehr geringen Teil der Gerätemasse ausmachen. Somit sollten bei der **Überarbeitung der WEEE-Direktive und des EAGs** die Verwertungsquoten kritisch hinterfragt und durch alternative Zielvorgaben wie Effizienzzraten (Zielvorgaben hinsichtlich der End-of-Life-Recyclingraten jeweils für wichtige kritische Metalle und Produktgruppen) ergänzt werden.
- Für die **technische Optimierung des Recyclings** besteht der größte Verbesserungsbedarf derzeit in einer verstärkten manuellen Demontage bei der Vorbehandlung. Verschiedene Studien der letzten Jahre zeigen, dass die in Deutschland zumeist übliche Praxis des Schredderns ganzer Geräteeinheiten zu beträchtlichen Verlusten kritischer Metalle - insbesondere Edelmetalle - führt, die durch die nachgeschalteten Sortier- und Raffinerieverfahren nicht ausgeglichen werden können. Für eine verbesserte Rückgewinnung von Edelmetallen und Kobalt ist es dringend nötig, die rohstoffrelevanten Bauteile wie Leiterplatten und Akkus vollständig manuell zu entnehmen und gesonderten Verwertungen zuzuführen. Es konnten sich in den letzten Jahren verschiedene kleine und mittlere Betriebe am Markt behaupten, die rohstoffrelevante Geräte der Sammelgruppen 3 (IT- und Telekommunikationsgeräte) und 4 (Geräte der Unterhaltungselektronik) vorwiegend manuell zerlegen und damit deutlich bessere Rückgewinnungsraten für kritische Rohstoffe ermöglichen. Diese Betriebe arbeiten vielfach als Sozialbetriebe mit einem großen Anteil an Beschäftigten des zweiten Arbeitsmarkts. Für das Bundesland Nordrhein-Westfalen besteht die Möglichkeit, solche Betriebe gezielt zu fördern. Zudem können ausgemusterte Bürogeräte öffentlicher Einrichtungen für die Entsorgung an entsprechend manuell arbeitende Betriebe gegeben werden.

- Wie in der Untersuchung ermittelt, existieren für viele kritische Rohstoffe noch keine geeigneten Raffinerieverfahren. Diese Situation kann sich in den nächsten Jahren bei einigen Schrottfraktionen und Metallen deutlich ändern. So wird erwartet, dass sich die Rückgewinnung von Seltenen Erden aus Leuchtstoffen in den nächsten Monaten und Jahren am Recyclingmarkt etablieren wird. Zudem bestehen vielfältige Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen zur Rückgewinnung von Seltenen Erden aus Magneten sowie Indium aus Flachbildschirmen. Es wird empfohlen diese **Fortschritte bei Recyclingverfahren** zeitnah zu verfolgen, um entsprechende Optimierungen in den Recyclingketten rasch einleiten zu können.
- In Erwartung von technischen Fortschritten beim Recycling muss für verschiedene rohstoffhaltige Fraktionen eine **temporäre Zwischenlagerung** in Betracht gezogen werden. Dies betrifft vor allem die Seltenen Erden haltigen Leuchtstoffe. Diese werden bereits heute zum Zweck des Schadstoffmanagements (v.a. Quecksilber, aber auch Cadmium) aus Gasentladungslampen und Bildröhren abgesaugt und in Sondermülldeponien kostenpflichtig eingelagert. Für eine zukünftige Nutzung dieses Rohstoffpotenzials sollten diese Leuchtstoffe so deponiert werden, dass sie zu einem zukünftigen Zeitpunkt ohne signifikanten Aufwand geborgen und in Recyclingprozesse eingespeist werden können. Ein ähnliches Vorgehen ist zudem ebenfalls für LCD-Module aus Bildschirmen (Indium), sowie LEDs (Indium, Gallium, Seltene Erden) und nicht zuletzt für Seltenen-Erden-Magnete (aus Notebooks und Desktops) zu prüfen.
- Bei Tantalkondensatoren muss die Möglichkeit einer separaten Entnahme aus den entsprechenden Geräten (Notebooks usw.) bzw. Komponenten (Leiterplatten) untersucht werden. Hier ist mit Hilfe entsprechender **Forschungsvorhaben** zu prüfen, welche Anwendungen und Gerätegenerationen für ein solches Verfahren in Frage kommen und unter welchen Rahmenbedingungen eine wirtschaftliche Rückgewinnung erfolgen kann.
- Neben der Optimierung der etablierten Zerlege- und Raffinerieverfahren spielen auch **Aufbau und Design der Geräte** eine entscheidende Rolle beim Recycling. So kann ein entsprechend optimiertes Gerätedesign eine manuelle Demontage und somit die Rückgewinnung kritischer Rohstoffe deutlich unterstützen. Besonders erwähnenswert ist hier ein gegenwärtiger Designtrend zu fest verbauten Lithium-Ionen-Akkus bei mobilen elektronischen Geräten (v.a. Smartphones, Tablet-PCs und Netbooks). Ein solches Design führt dazu, dass die kobalthaltigen Lithium-Ionen-Akkus nur noch unter großem Aufwand entnommen und einer separaten Verwertung zugeführt werden können. Neben den entsprechenden Verlusten v.a. beim Kobaltrecycling entstehen daraus noch zusätzliche Brand- und Explosionsrisiken in Recyclingbetrieben ausgehend von falsch gehandhabten Lithium-Ionen-Batterien.

Um solche Designprobleme zu vermeiden und mit Hilfe einer maßvollen, aber überlegten Produktgestaltung eine Kreislaufführung von Rohstoffen zu unterstützen, sollten regulative Möglichkeiten auf ihre Eignung zur **Umsetzung von „Design-for-Recycling-Strategien“** geprüft werden. Neben der WEEE-Richtlinie ist hier vor allem der laufende Implementierungsprozess der Ecodesign-Verordnung (2009/125/EC)

relevant. Zwar werden im laufenden Prozess vor allem energierelevante Aspekte produktspezifisch behandelt und in Form von verbindlichen Mindeststandards umgesetzt, die Richtlinie bietet aber durchaus die Möglichkeit zur Integration anderer umweltrelevanter Themen.

Literatur

- Achzet 2011 Achzet, B. (Universität Augsburg): Substitution kritischer Technologiemetalle, Eurogress Aachen – Hochtechnologiemetalle: Motor für Innovationen, Aachen 4. – 5. Mai 2011.
- ACRR ohne Datum Association of Cities and Regions for Recycling: The Management of Waste Electrical and Electronic Equipment – A Guide for Local Regional Authorities. Brüssel, ohne Datum.
- Bast et al. 2011 Bast, U. et al.: Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtrieben – MORE (MotorRecycling), Siemens AG (Leitung), Daimler AG, Umicore AG & Co KG, Vacuumschmelze GmbH, Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, Erlangen, Technische Universität Clausthal, Inst. für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik, Clausthal-Zellerfeld, Öko-Institut e.V., Fraunhofer -Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe, mit Förderung des BMBF, 2011-2014.
- Becker, W., et al. 2003 Becker, W., et al.: Toxicological and Ecotoxicological Investigations of Crystals and Disposal of LCDs, 2003.
- BGR 2011 Elsner, H.: Kritische Versorgungslage mit schweren Seltenen Erden – Entwicklung „Grüner Technologien“ gefährdet?; Commodity Top News, Nr. 36, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 20.04.2011.
- BMU 2009 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Verbraucherschutz: Elektro- und Elektronikgeräte in Deutschland: Daten 2007 und 2008 zur Erfassung, Behandlung und Wiederverwertung. Berlin, 2009.
- Bogdanski 2009 Bogdanski, G.: Entwicklung und Analyse von Handlungsoptionen zur Umsetzung von Recyclingkonzepten für Flüssigkristallbildschirme (LCD) für ein Unternehmen der Elektro(nik)altgeräte-recyclingbranche, 2009.
- Böni & Widmer 2011 Böni, H.; Widmer, R.: Disposal of Flat Panel Display Monitors in Switzerland. EMPA, St. Gallen, 2011.
- Buchert et al. 2011 Buchert, M.; Goldmann, D.; Schüler-Hainsch, E.; Treffer, F. et al.: Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität Untersuchung im Rahmen des Projektes „Optimierung der Umweltentlastungspotenziale von Elektrofahrzeugen - Integrierte Betrachtung von Fahrzeugnutzung und Energiewirtschaft – OPTUM“; Öko-Institut e.V.; TU Clausthal, IFAD, Daimler AG, Umicore AG & Co. KG, 2011.
- CEMIX 2011 gfu; BVT; GfK: Consumer Electronics Marktindex Deutschland (CEMIX) Januar 2010 - Dezember 2010, Internet <http://www.gfu.de/home/marktzahlen/markt.xhtml>
- Chancerel 2010 Chancerel, P.: Substance flow analysis of the recycling of small waste electrical and electronic equipment. An assessment of the recovery of gold and palladium. Doktorarbeit an der TU Berlin, Berlin, 2010.

Chancerel & Rotter 2009	Chancerel, P.; Rotter, V.S.: Edelmetallrückgewinnung aus Elektro- und Elektronikaltgeräten durch Aufbereitung. In: Müll & Abfall 02/2009.
Cree 2010	Cree press release, Feb. 2010, Internet http://www.cree.com/press/press_detail.asp?i=1265232091259
Cree 2011	Cree press release, Mai 2011, Internet http://www.cree.com/press/press_detail.asp?i=1304945651119
Dagar 2008	Dadgar: Interview mit A. Dadgar, Universität-Magdeburg - Abteilung Halbleiterepitaxie, geführt von Marwede, M., Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, 16. Juni 2008.
Displaybank 2011	Displaybank: February 2010 Large-Area TFT-LCD Panel Shipment Result and Price Trend, 07.04.2010, Internet: http://www.displaybank.com/eng/research/print_contents_m.html?cate=column&id=4589
EuP 2007	Preparatory studies for Eco-design Requirements of EuPs, Lot 3: Personal Computers (desktops and laptops) and Computer Monitors. Brüssel, 2007.
EUWID 2011a	KRS-Plus-Anlagen von Aurubis offiziell in Betrieb genommen, EUWID Recycling und Entsorgung, Ausgabe 28/2011 VOM 12.07.2011
EUWID 2011b	Boliden trotz Umsatzplus mit geringerem Gewinn, EUWID Recycling und Entsorgung, Ausgabe 45/2011 vom 08.11.2011.
FEM & IUTA 2011	Forschungsinstitut Edelmetalle und Metallchemie & Institut für Energie- und Umwelttechnik e.Metallurgische Rückgewinnung von Indium, Gallium und Germanium aus Elektronikschrott und Entwicklung entsprechender Aufarbeitungsmethoden für die Verwertungsindustrie. Projektbericht, Schwäbisch Gmünd & Duisburg, 2011.
Gambardella et al. 2010	Gambardella, M.F.; Lanton, T.J.; Ossenbeck, B.P.: Molycorp. North American Equity Research. J.P. Morgan, New York.
Gartner 2011a	Gartner press release: Gartner Says Worldwide PC Shipments Increased 2.3 Percent in Second Quarter of 2011, STAMFORD, Conn., 13.07. 2011, Internet http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=1744216
Gartner 2011b	Gartner press release: Gartner Says Western Europe PC Market Declined 11 Percent in Third Quarter of 2011, STAMFORD, Conn., 14.11.2011, Internet http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=1847115
GfK & gfu 2011	GfK; gfu: Der Markt Für Consumer Electronics - Deutschland 2010 –
GFMS 2005	Hagelüken, C. (Umicore Precious Metals Refining); Buchert, M.; Stahl, H.; (Öko-Institut e.V.): Materials Flow of Platinum Group Metals – Systems Analysis and Measures for Sustainable Optimization of the Materials Flow of Platinum Group Metals. Umicore Precious Metals Refining and Öko-Institut e. V. ISBN 0-9543293-7-6, London: GFMS Ltd, 2005
Graedel et al. 2011	Graedel, T. E.; Reck, B.; Buchert, M.; Hagelüken C. et al. "Recycling rates of metals", United Nations Environment Programme, (UNEP edits.) 2011.

Guarde et al. 2010	Guarde, D.; von Heeren, C.; Sánchez, J.C.; Arnaiz, S.; Iribarnegaray, D.; Castillo, B.: Improved management and recycling of waste fluorescent lamps. The prolux project. Konferenzbeitrag der Going Green - Care Innovations, 09.-11.2010, Wien.
Hagelüken & Buchert 2008	Hagelüken, C.; Buchert, M.: The mine above ground – opportunities & challenges to recover scarce and valuable metals from EOL electronic devices. Präsentation auf der IERC, Salzburg, 17.01.2008.
Hatch 2011	Hatch, G.: Seagate, rare earths and the wrong end of the stick. Internet: http://www.techmetalsresearch.com/2011/07/seagate-rare-earths-and-the-wrong-end-of-the-stick/ (Zugriff: 25.07.2011).
H.C. Starck 2011	H.C. Starck, Raw Material Procurement Statement, September 2011, http://www.hcstarck.com/en/home/hc_starck_group/the_way_we_move/raw_material_procurement_statement.html
Heise 2011	heise News: PC-Absatz in Westeuropa bricht noch weiter ein, 17.08.2011, Internet http://heise.de/-1324569
Huismann et al. 2007	Huisman, J.; Magalini, F.; Kuehr, R.; Maurer, C.; Ogilvie, S.; Poll, J.; Delgado, C.; Artim, E.; Szlezak, J.; Stevels, A.: 2008 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), Bonn 2007.
ISI 2009	Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung & Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung: Rohstoffe für Zukunftstechnologien: Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage, 15. Mai 2009
Kara et al. 2010	Kara, H.; Chapman, A.; Crichton, T.; Willis, P.; Morley, N.: Lanthanide Resources and Alternatives. Oakdene Hollins, Buckinghamshire, 2010.
Kwade et al. 2011:	Kwade, A. et al.: Recycling von Lithium-Ionen-Batterien – LithoRec; TU Braunschweig, Chemetall, Volkswagen AG etc. 2011.
Lauwigi et al. 2011	Lauwigi, C.; Schüler, D.; Quack, D.; Vogt, R.: PROSA Kurzstudie: Wiederaufladbare Lithium-Batterien für den Einsatz in tragbaren Geräten. Institut für Energie- und Umweltforschung & Öko-Institut, Heidelberg & Darmstadt, 2011.
LEDs Review 2009	LEDs Review: Cree XP-G LED Chip Size, 09.07.2009, Internet http://ledsreview.com/news/214/
Manhart et al. 2011	Manhart, A.; Osibanjo, O.; Aderinto, A.; Prakash, S.: Informal e-waste management in Lagos, Nigeria – socio-economic impacts and feasibility of international recycling co-operations. Öko-Institut e.V. & BCCC, Lagos & Freiburg, 2011.
Manhart & Griebshammer 2006	Manhart, A.; Griebshammer, R.: Soziale Auswirkungen der Produktion von Notebooks. Öko-Institut e.V., Freiburg, 2006.
Martens 2011	Martens, H.: Recyclingtechnik – Fachbuch für Lehre und Praxis. Heidelberg, 2011.
Martin 2009	Martin, R.: Verwendung von Flüssigkristall- Displays sowie Verfahren zu deren Verwertung, 2009.

Meskers et al. 2009	Meskers, C.E.M.; Hagelüken, C.; Van Damme, G. (Umicore): Green recycling of EEE: special and precious metal recovery from EEE, TMS annual meeting 2009
Nichia 2010	Nichia, Yukio Narukawa et al, 2010 J. Phys. D: Appl. Phys. 43 354002 doi:10.1088/0022-3727/43/35/354002
PPM 2011	PPM Pure Metals 2011; http://www.pmpuremetals.de
Prakash & Manhart 2010	Prakash, S.; Manhart, A.: Socio-economic assessment and feasibility study on sustainable e-waste management in Ghana. Öko-Institut e.V., Freiburg, 2010.
Prakash et al. 2011	Prakash, S.; Gensch, C.-O.; Liu, R.; Schischke, K.; Stobbe, L.: Schaffung einer Datenbasis zur Ermittlung ökologischer Wirkungen der Produkte der IKT. Öko-Institut e.V. & Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM), Umweltbundesamt (UBA), Dessau (in Bearbeitung).
Prosuite 2011	Talens Peiró, L. et al.: Results from the workshop: Preliminary sustainability assessment: multifunctional mobile phone; prosuite project, Brussels 3 February 2011.
Rhodia 2011	Rare Earth: Why substitute? Recycle!: Interview with Du Hua, President of the Rhodia Rare Earth Systems GBU / May 16th, 2011; http://www.paristechreview.com/2011/05/16/rare-earth-why-substitute-recycle/
Rieger 2009	Rieger, R.: Die Verwendung von "seltenen Erdmetallen" in der Elektrogerät- und Fahrzeugproduktion und ihre Erfassungsmöglichkeit im Materialrecycling. Diplomarbeit an der Technischen Universität Dresden, Dresden, 2009.
Scrap 2011	Minter, A.; Pollack, H.R.: Raising the Bar. In: Scrap September/October 2011.
Schöps 2011	Schöps, D.: Mündliche Information. ELPRO, Baunschweig, 2011.
Schüler et al. 2011	Schüler, D.; Buchert, M.; Liu, R.; Dittrich, S.; Merz, C.: Study on Rare Earths and Their Recycling. Öko-Institut, Darmstadt, 2011
Smil 2007	Vaclav Smil: Light Behind the Fall: Japan's Electricity Consumption, the Environment, and Economic Growth, in: The Asia-Pacific Journal: Japan Focus. In-depth critical analysis of the forces shaping the Asia-Pacific and the world, 02.04.2007
Socolof et al. 2005	Socolof, M. L. et al.: Environmental life-cycle impacts of CRT and LCD desktop computer displays, Journal of Cleaner Production 13: 1281-1294 (2003).
Steele 2007	Steele, R. V.: "Emerging SSL Markets for General Illumination", Strategies Unlimited, DOE Solid-State Lighting Workshop, 23 - 24. April 2007.
Treffer et al.	Treffer, F., Goldmann, D., Buchert, M. et al.: Entwicklung eines realisierbaren Recyclingkonzeptes für die Hochleistungsbatterien zukünftiger Elektrofahrzeuge – Lithium-Ionen Batterierecycling Initiative – LiBRi; Umicore AG & Co KG, Daimler AG, TU Clausthal, IFAD, Öko-Institut e.V. 2011.

Umicore 2011	Umicore: Informationen zur Materialzusammensetzung verschiedener WEEE-Fraktionen. Daten der Firma Umicore.Hoboken, 2011.
Umicore 2011b	Inauguration of battery recycling facility in Hoboken, Umicore press release, 7 September 2011.
Umicore BR 2011	Umicore Battery Recycling: Informationen zur Materialzusammensetzung von Lithium-Ionen-Akkus. Daten der Firma Umicore. Hoboken, 2011.
UNEP 2009	Buchert, M.; Schüler, D.; Bleher, D.: Critical Metals for Future Sustainable Technologies and Their Recycling Potential, Öko-Institut e.V. (UNEP edits.) Juli 2009.
U.S. DoE 2010	U.S. Department of Energy: Critical Materials Strategy. Washington D.C., 2010.
USGS Ga 2011	U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Mineral Commodity Summaries Gallium 2011
USGS In 2011	U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Mineral Commodity Summaries Indium 2011
VAC 2011	Vacuumschmelze: Informationen zur Materialzusammensetzung von Permanentmagneten. Hanau, 2011.
Young 2011	Ross Young; "Global Manufacturing Trends: What Can We Learn from the HB LED Market Explosion?", in 2011 Solid-State Lighting Manufacturing R&D Workshop, Boston, MA, 2011-04-12
Zangl et al. 2009	Zangl, S.; Brommer, E.; Gießhammer, R.; Gröger, J.: PROSA Fernsehgeräte. Öko-Institut e.V., Freiburg, 2009.
Zukauskas 2002	Arturas Zukauskas, Michael Shur, R. Gaska, Introduction to Solid State Lighting, Wiley 2002
ZVEI 2003	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e.V.: Umbrella Specification Tantalum Capacitor. Internet: https://www.zvei.org/?id=1475 (Zugriff: 14.10.2011).
ZVEI 2009	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e.V.: ZVEI-Positionspapier zur Entsorgung von LED-Leuchten, LED-Modulen und LED-Lampen, November 2009

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Globale End-of-Life Recyclingraten von 60 Metallen (Graedel et al. 2011)	6
Abbildung 2	CCFL-Kapillarröhre eines Notebook-Bildschirms (eigene Aufnahme Öko-Institut)	10
Abbildung 3	Absatz von TV-Geräten in Deutschland, nach bildgebender Technologie (LCD-, Plasma-, Röhren-TV-Gerät), nach GfK & gfu (2011)	15
Abbildung 4	Entwicklung des Umsatzes in Deutschland für TV-Geräte nach Bildschirmgröße	17
Abbildung 5	Marktanteile von Geräten mit LCD-Bildschirmen und LED-Hintergrundbeleuchtung (nach Young 2011)	17
Abbildung 6	Marktanteile und Projektion der Marktentwicklung für weiße LEDs nach Verwendungszweck (Young 2011).	18
Abbildung 7	Marktanteile von LCD-TV-Geräten mit indirekter („Edge“), direkter („Direct“) und hybrider („Hybrid“) Hintergrundbeleuchtung (nach Young 2011)	19
Abbildung 8	Die wesentlichen, aus Recyclingsicht relevanten Komponenten eines Notebooks (eigene Aufnahme Öko-Institut)	23
Abbildung 9	Festplattenscheiben im 3,5- und 2,5-Zoll-Format (eigene Aufnahme Öko-Institut)	26
Abbildung 10	Tantal-Kondensatoren auf der Hauptplatine eines Notebooks (eigene Aufnahme Öko-Institut)	27
Abbildung 11	Seltene Erden Magnete des Schwingspulenbetätigers (eigene Aufnahmen Öko-Institut)	29
Abbildung 12	Geöffnete Spindelmotoren mit Ringmagneten von optischem Laufwerk (links) und Festplatte (rechts), (eigene Aufnahme Öko-Institut)	30
Abbildung 13	Batteriezellen des Akkublocks (eigene Aufnahme Öko-Institut)	31
Abbildung 14	Verkaufszahlen, mittlerer Preis (inkl. Mehrwertsteuer) und Umsatz von Notebooks pro Quartal (nur privater Sektor), nach CEMIX	34
Abbildung 15	Anteile verschiedener Computer-Bauformen auf dem deutschen Markt, 2. Quartal 2011 (nach Heise 2011)	34
Abbildung 16	Anteile von Notebooks, Netbooks und Tablet-PCs am Umsatz mobiler Rechner (Ab 2011 Projektion; nach Young 2011)	35
Abbildung 17	Funktionsprinzip einer Halbleiterdiode (Quelle: wikipedia , 05.12.2011, Urheber: User:S-kei)	44
Abbildung 18	Abhängigkeit der Farbe des LED-Lichtes vom verwendeten Halbleitermaterial (schematisch)	45
Abbildung 19	Foto und Schema einer LED (Quelle wikipedia , wikipedia , 05.12.2011; Urheber: Grapetonix; Inductiveload)	45

Abbildung 20	Helligkeits-Empfindlichkeitskurve des menschlichen Auges, Tagsehen (rot), Nachtsehen (blau) (Quelle Wikipedia , 05.12.2011; Urheber: Hhahn)	46
Abbildung 21	Lichtausbeute einiger Lichtquellen (nach Stadtwerke Düsseldorf , 05.12.2011)	47
Abbildung 22	Spektralbereiche verschiedener Trägersubstanzen und Dotierungen in Leuchtstoffen weißer LEDs.	49
Abbildung 23	Komponenten einer LED und die darin verbauten Materialien (nach CGGC)	50
Abbildung 24	Projektionen der zukünftigen Entwicklung jährlicher Produktionszahlen für weiße LEDs (weltweit)	53
Abbildung 25	Massenanteile kritischer Metalle in einer weißen LED (Halbleiter-Chip und Leuchtstoff)	55
Abbildung 26	Berechnungsgrundlage für die Zusammensetzung des in einem Privathaushalt in Deutschland installierten Lichtstroms (2005)	58
Abbildung 27	Verfahrensfließbild von Umicore's integrierter Edelmetallhütte in Hoboken bei Antwerpen (Quelle: Umicore)	62
Abbildung 28	Verfahrensfließbild des Batterierecyclings von Umicore in Belgien (Quelle: Umicore)	64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Displaytechnologien und ihre Hauptanwendungsbereiche	7
Tabelle 2	Literaturwerte zu Schichtdicke und Indium-Gehalt von LCD-Displays	8
Tabelle 3	Näherungsrechnung zu Indium-Gehalten in LCD-Displays	8
Tabelle 4	Mittlere Indium-Gehalte verschiedener Displaygeräte	8
Tabelle 5	Annahmen und Daten zur Abschätzungen der Seltenen Erden Gehalte der CCFL-Hintergrundbeleuchtung von LCD-Bildschirmen	10
Tabelle 6	Geschätzte durchschnittliche Seltenen Erden Gehalte von LCD-Displays mit CCFL-Hintergrundbeleuchtung	11
Tabelle 7	Annahmen und Daten zur Abschätzungen der Seltenen Erden Gehalte (inkl. Indium und Gallium) der LED-Hintergrundbeleuchtung von LCD-Bildschirmen	11
Tabelle 8	Geschätzte durchschnittliche Seltene Erden Gehalte (inkl. Indium und Gallium) von LCD-Displays mit LED-Hintergrundbeleuchtung	12
Tabelle 9	Gewicht und Edelmetallkonzentrationen von Leiterplatten in Flachbildschirmen	12
Tabelle 10	Edelmetallmengen in den Leiterplatten von Flachbildschirmen	12
Tabelle 11	Absatzzahlen von Geräten mit LCD-Display (Deutschland 2010), der Marktanteil von Geräten mit Hintergrundbeleuchtung mittels weißer LEDs (WLEDs) und die angenommene Anzahl der pro Gerät in der Hintergrundbeleuchtung verbauten WLEDs (siehe auch Abschnitt 5.3)	13
Tabelle 12	Durchschnittlicher Gehalt kritischer Rohstoffe in LCD-PC-Monitoren (privater Markt)	14
Tabelle 13	Durchschnittlicher Gehalt kritischer Rohstoffe in LCD-Fernsehern	14
Tabelle 14	Absatz, Durchschnittspreise und Umsätze für TV-Geräte (privater Markt) in 2010 , nach CEMIX (2011)	16
Tabelle 15	Gewicht und Edelmetallkonzentrationen von Leiterplatten in Notebooks	24
Tabelle 16	Edelmetallmengen in den Leiterplatten eines Notebooks	25
Tabelle 17	Edelmetallkonzentration von Festplattenscheiben	25
Tabelle 18	Edelmetallmengen in den Festplattenscheiben eines Notebooks	26
Tabelle 19	Anwendungen und Gewicht von Seltenen-Erd-Magneten in Notebooks.	28
Tabelle 20	Seltene Erden Konzentrationen von Magneten in Notebooks	28
Tabelle 21	Seltene Erden Gehalte von Magneten in Notebooks	29
Tabelle 22	Absatzzahlen von privat genutzten Notebooks (Deutschland 2010), der Marktanteil von Geräten mit Hintergrundbeleuchtung mittels weißer LEDs (WLEDs) und die angenommene Anzahl der pro Gerät in der Hintergrundbeleuchtung verbauten WLEDs (siehe auch Abschnitt 3.7)	32

Tabelle 23	Durchschnittlicher Gehalt kritischer Rohstoffe in Notebooks (inkl. LCD-Monitor)	32
Tabelle 24	Absatz und Durchschnittspreise für Notebooks auf dem deutschen Markt (privater Sektor) in 2010 , nach CEMIX (2011)	33
Tabelle 25	Gehalt wichtiger kritischer Metalle in Smartphones (eigene Schätzung Öko-Institut e.V.)	42
Tabelle 26	Potenzial wichtiger kritischer Metalle in Smartphones in 2010	42
Tabelle 27	Zusammensetzung eines typischen gelben Leuchtstoffs einer WLED.	49
Tabelle 28	Zusammensetzung eines typischen rötlichen Leuchtstoffs einer WLED.	49
Tabelle 29	Zusammensetzung eines LED- $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -Halbleiter-Chips Bauart A und B, siehe Text)	51
Tabelle 30	Typischer Gehalt einer weißen LED an kritischen Metallen (verwendet für Hochrechnung zukünftigen Bedarfs)	51
Tabelle 31	Anzahl (Mrd. LED) der produzierten WLEDs und Projektion in den drei Szenarien A, B, C	52
Tabelle 32	Abschätzung des zukünftigen Verbrauchs an Gallium aufgrund der Fertigung weißer LEDs	53
Tabelle 33	Abschätzung des zukünftigen Verbrauchs an Indium aufgrund der Fertigung weißer LEDs	53
Tabelle 34	Abschätzung des zukünftigen Verbrauchs an Seltenen Erden aufgrund der Fertigung weißer LEDs.	54
Tabelle 35	Typischer Gehalt einer weißen LED an kritischen Metallen	54
Tabelle 36	Beleuchtung von Privathaushalten in Deutschland, USA und Japan (2005) (nach Smil 2007)	57
Tabelle 37	Kenndaten der drei exemplarischen LED-Lampen	58
Tabelle 38	Bandbreite des Bedarfs an den kritischen Metallen Gallium, Indium, Cer und Europium bei teilweisem bzw. vollständigem Ersetzen der Leuchtmittel in Haushalten in Deutschland durch LED-Lampen verschiedener Bauart.	59
Tabelle 39	Übersicht der Sachbilanzergebnisse für die Produktgruppen Flachbildschirme, Notebooks, Smartphones und LED-Leuchten (private Haushalte Deutschland)	68
Tabelle 40	Potenziele kritischer Rohstoffe in Notebooks und Verluste bei den derzeit in Deutschland gängigen Sammel- und Behandlungssystemen.	70

Landesamt für Natur, Umwelt
und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen
Leibnizstraße 10
45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
poststelle@lanuv.nrw.de

www.lanuv.nrw.de

