

Seltene Metalle in Elektro- und Elektronikaltgeräten - Vorkommen und Rückgewinnungstechnologien



Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

23.12.2011

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Abfall und Rohstoffe, CH-3003 Bern Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer: Empa, Abteilung Technologie und Gesellschaft.

Autor/Autorin: Fabian Blaser, Stefano Castelanelli, Patrick Wäger und Rolf Widmer.

Begleitung BAFU: Michael Hügi, Isabelle Baudin.

Titelfotos: Empa.

Hinweis: Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Dieser Bericht ist wie folgt zu zitieren: Blaser, F., Castelanelli, S., Wäger, P. und Widmer, R. (2012) Seltene Metalle in Elektro- und Elektronikaltgeräten. Vorkommen und Rückgewinnungstechnologien. Bundesamt für Umwelt, Bern.

Zusammenfassung

Im Rahmen der Revision der Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (EEE – electrical and electronic equipment) vom 14. Januar 1998 überprüft das BAFU derzeit, inwieweit ein vermehrte Rückgewinnung ausgewählter, als kritisch eingestufte seltener Metalle Sinn machen würde. Im Hinblick auf eine bessere Abschätzung der Rückgewinnungspotentiale seltener Metalle aus Elektro- und Elektronikgeräten (WEEE - waste electrical and electronic equipment,) wurden über eine Internet- und Literaturrecherche Vorkommen und Konzentrationen ausgewählter seltener Metalle in EEE und deren Komponenten ermittelt sowie die Verfügbarkeit von Technologien zur Rückgewinnung seltener Metalle aus WEEE und deren Komponenten abgeklärt.

Die zusammengetragenen Daten zu Vorkommen und Konzentrationen ausgewählter seltener Metalle in EEE weisen darauf hin, dass ein Grossteil der seltenen Metalle in den Leiterplatten der Geräte vorliegt. Zusätzlich zu den Leiterplatten gibt es einige Komponenten wie der Lesekopf der Festplatte, die fluoreszierende Pulverschicht in Bildröhren, die LCD-Module und LED-Lampen, welche ebenfalls eine bedeutende Konzentration an gewissen seltenen Metallen aufweisen können. In der Literatur gefundene Metallkonzentrationen und -frachten in Leiterplatten bestätigen, dass das Spektrum an Metallen in EEE breit ist und die Gesamtfrachten an einzelnen Metallen in den gesammelten Geräten bedeutend sein können. Für die Metalle Zinn, Antimon, Tantal, Gold und Neodym wurden in Leiterplatten von im Jahr 2010 in der Schweiz gesammelten IT-Geräten (EU-WEEE Kategorie 3) Frachten von über 100 kg errechnet. Für Geräte der Unterhaltungselektronik wurden zwar ebenfalls Metallfrachten in Leiterplatten berechnet, doch sind diese aufgrund der schlechten Datenlage mit sehr grossen Unsicherheiten behaftet. Trotz einer ausführlichen Literaturrecherche konnten nur wenige Angaben zum durchschnittlichen Gehalt an seltenen Metallen in ausgewählten, typischen (Kleinst-)Komponenten auf Leiterplatten (z.B. Tantalkondensatoren) gefunden werden. Eine Herausforderung ist diesbezüglich, dass sich viele Komponenten in ihrer Bauform, in ihren Eigenschaften und damit auch in ihrer Zusammensetzung stark unterscheiden. Weitere Untersuchungen, welche die durchschnittliche Metallkonzentration in den verschiedenen Komponenten von gesammelten Elektroaltgeräten untersuchen, sind hier unbedingbar.

Die Ergebnisse der Literatur- und Internetrecherche zu Technologien für die Rückgewinnung seltener Metalle aus WEEE sowie deren Komponenten zeigen, dass zwar für Edelmetalle (Au, Ir, Rh, Ru, Os, Pd, Pt) und Antimon (Sb) Rückgewinnungstechnologien im Industriemassstab existieren, daneben aber nur Zinn, Tellur und – mit Vorbehalten – Lithium im Industriemassstab zurückgewonnen werden. Die 15 anderen untersuchten seltenen Metalle können gemäss den gefundenen Informationen heute noch nicht im Industriemassstab aus End-of-Life-Produkten zurückgewonnen werden.

Résumé

Dans le cadre de la révision de l'ordonnance du 14 janvier 1998 sur la restitution, la reprise et l'élimination des appareils électriques et électroniques, l'OFEV examine dans quelle mesure il serait judicieux d'accroître la récupération de certains métaux rares jugés critiques. Afin de mieux estimer le potentiel de récupération de des métaux rares dans les appareils électriques et électroniques usagés, une recherche sur Internet et dans la littérature spécialisée a établi la présence et la concentration de certains métaux rares dans ces appareils et leurs composants, et a étudié si des techniques actuelles permettent de les en extraire lorsqu'ils se retrouvent sous la forme de déchets.

Les données recueillies concernant la présence et la concentration des métaux rares dans les appareils électriques et électroniques indiquent qu'une grande partie se trouve dans les circuits imprimés. Il y en a également des teneurs notables dans des éléments tels que têtes de lecture de disques durs, couches de poudre fluorescente de tubes cathodiques, modules LCD et lampes à LED. Les concentrations et les quantités présentes dans les circuits imprimés d'après la littérature confirment l'étendue de la palette de métaux contenus dans les appareils électriques et électroniques et attestent que certains peuvent entrer largement dans la composition des appareils collectés. On a calculé que les circuits imprimés des appareils informatiques et de télécommunication collectés en Suisse en 2010 (déchets d'équipements électriques et électroniques de catégorie 3 selon l'UE) contiennent plus de 100 kg de chacun des métaux étain, antimoine, tantale, or et néodyme. On a également quantifié des métaux rares présents dans les circuits imprimés des appareils électroniques de loisirs, mais les chiffres obtenus sont entachés d'incertitudes considérables dues à la pauvreté des données disponibles. La recherche bibliographique approfondie n'a rapporté que peu d'informations sur la concentration moyenne des métaux rares dans certains (petits) composants choisis, typiques, des circuits imprimés (p. ex. condensateurs au tantale). De plus, la structure, les caractéristiques et par conséquent la composition de nombreuses pièces diffèrent sensiblement, ce qui pose un gros problème. Il est donc nécessaire de poursuivre les études pour déterminer la teneur moyenne des métaux considérés dans les différents constituants des équipements usagés collectés.

La recherche sur Internet et dans la littérature portant sur la récupération de métaux rares dans les déchets d'appareils électriques et électroniques et leurs composants montre qu'il existe des techniques industrielles pour les métaux nobles (Au, Ir, Rh, Ru, Os, Pd, Pt) et pour l'antimoine (Sb), mais que seuls l'étain, le tellure et, avec quelques réserves, le lithium sont extraits en quantités industrielles. D'après les informations trouvées, les quinze autres métaux rares étudiés ne peuvent pas encore être récupérés à grande échelle des produits en fin de vie.

Riassunto

Nell'ambito della revisione del 14 gennaio 1998 dell'ordinanza concernente la restituzione, la ripresa e lo smaltimento degli apparecchi elettrici ed elettronici (AEE – apparecchiature elettriche ed elettroniche), l'UFAM sta verificando l'opportunità di incentivare il recupero di metalli rari selezionati e classificati come critici. In vista di una migliore valutazione dei potenziali di recupero offerti dai metalli rari ricavati da apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE – rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche), ricerche in Internet e nella letteratura specialistica hanno permesso di determinare la presenza e la concentrazione di metalli rari selezionati nelle AEE e nei loro componenti nonché la disponibilità di tecnologie per il recupero di questi metalli rari.

I dati raccolti sulla presenza e la concentrazione di metalli rari selezionati nelle AEE indicano che questi ultimi si trovano prevalentemente nei circuiti stampati delle apparecchiature. Oltre ai circuiti stampati, anche alcuni componenti come la testina di lettura del disco fisso, il rivestimento fluorescente dei tubi catodici, i moduli LCD e le lampadine LED possono presentare una significativa concentrazione di determinati metalli rari. Le concentrazioni e le quantità di metalli nei circuiti stampati riportate dalla letteratura specialistica confermano che la gamma di metalli presenti nelle AEE è ampia e che le quantità globali di singoli metalli nelle apparecchiature raccolte possono essere significative. Nei circuiti stampati degli apparecchi informatici (RAEE UE categoria 3) raccolti in Svizzera nel 2010 è stata calcolata la presenza di quantità superiori a 100 kg di metalli quali lo stagno, l'antimonio, il tantalio, l'oro e il neodimio. La presenza di quantità di metalli è stata stimata anche nei circuiti stampati degli apparecchi dell'elettronica d'intrattenimento. Tuttavia, è stata determinata con grande approssimazione a causa dell'insufficienza dei dati disponibili. Malgrado le ricerche accurate condotte nella letteratura specialistica, sono scarsi i dati raccolti sul tenore medio di metalli rari contenuti nei tipici componenti (minimi) selezionati dei circuiti stampati (ad es. condensatori al tantalio). A rendere queste ricerche ancor più complicate è il fatto che molti componenti si differenziano notevolmente per la forma, le caratteristiche e anche la composizione. A questo riguardo è indispensabile effettuare ricerche più approfondite che prendano in esame le concentrazioni medie di metalli nei diversi componenti dei rifiuti raccolti delle apparecchiature elettriche ed elettroniche.

I risultati delle ricerche nella letteratura specialistica e in Internet sulle tecnologie per il recupero di metalli rari dai RAEE e dai loro componenti indicano che le tecnologie per il recupero su scala industriale esistono per i metalli preziosi (Au, Ir, Rh, Ru, Os, Pd, Pt) e l'antimonio (Sb); per gli altri metalli tali tecnologie sono tuttavia disponibili solo per lo stagno, il tellurio e, con riserva di verifica, il litio. Secondo le informazioni disponibili, attualmente non è ancora possibile recuperare su scala industriale a partire da prodotti a fine vita gli altri 15 metalli rari presi in esame.

Summary

The FOEN, as part of its review of the Ordinance on the Return, the Taking-back and the Disposal of Electrical and Electronic Appliances (ORDEA) of 14 January 1998, is investigating to what extent it would make sense to increase recycling measures for those selected (geochemically) scarce metals considered to be critical. To facilitate a better estimate of the recycling potential of scarce metals from waste electrical and electronic equipment (WEEE), an internet and literature search was carried out to establish the occurrence and concentration of selected scarce metals in EEE and their components, as well as the availability of recycling technology for these metals.

The collected data on the occurrence and concentration of selected rare metals in EEE indicate that the bulk of the rare metals are located in the printed circuit boards of the appliances. In addition to the printed circuit boards, a few components such as the reading head of the hard disk, the fluorescent powder layer in cathode ray tubes, the LCD module and LED lamps also contain a significant concentration of certain rare metals. The literature confirms that metal concentrations in printed circuit boards reveal a broad spectrum of metals in EEE and that the total loads of individual metals in the collected appliances can be significant. It was calculated that printed circuit boards from IT appliances (EU-WEEE Category 3) collected in Switzerland in 2010 contained the metals tin, antimony, tantalum, gold and neodymium in loads of over 100 kg. Metal loads in printed circuit boards were also calculated for consumer electronics appliances, but this data is rather uncertain because of the poor database. Despite a comprehensive literature search, very little information could be found on the average content of scarce metals in selected, typical micro-components on printed circuit boards (e.g. tantalum capacitors). The fact that many components have very different designs, qualities and therefore also structures, presents a major challenge in this area. It is essential that further studies are carried out to investigate the average metal concentration in the different components of used electrical appliances.

The results of the literature and internet search on technology for recycling rare metals from WEEE and its components show that although recycling technologies exist on an industrial scale for the precious metals (Au, Ir, Rh, Ru, Os, Pd, Pt) and antimony (Sb), in addition to these only tin, tellurium and – with some reservations – lithium are actually recovered on an industrial scale. The findings show that at the present time the 15 other scarce metals studied cannot yet be recovered on an industrial scale from end-of-life products.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Résumé	ii
Riassunto	iii
Summary	iv
Inhaltsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	vi
Abkürzungen	vii
1 Einleitung	1
2 Vorgehen	2
2.1 Auswahl der untersuchten Metalle	2
2.2 Literatur- und Internetrecherchen.....	2
2.3 Berechnungen der Metallkonzentrationen und -frachten.....	2
3 Seltene Metalle in elektronischen Geräten	3
3.1 Leiterplatten	5
3.2 Andere Bauteile	10
4 Rückgewinnungstechnologien für seltene Metalle	12
5 Schlussfolgerungen	14
5.1 Metallkonzentrationen und –frachten in Leiterplatten	14
5.2 Rückgewinnungstechnologien	16
6 Literatur	17

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Vorkommen der untersuchten Elemente in den Leiterplatten und anderen Bauteilen der Geräte gemäss den Literaturdaten. Blau: Elemente wurden nur in Leiterplatten eines Gerätes gefunden. Rot: Elemente wurden in Leiterplatten und/oder anderen Bauteilen eines Gerätes gefunden.....	4
Tabelle 2.	Durchschnittliche Metallkonzentration in mg pro kg Leiterplatten in Geräten der WEEE-Kategorien 3 und 4. Unter jedem Wert sind die Anzahl Werte angegeben, welche als a) gemessene Konzentrationen, b) „< - Werte“, Typ A (nicht gefunden, Nachweisgrenze angegeben) bzw. c) ND-Werte, Typ B (nicht gefunden, Nachweisgrenze unbekannt) in die \emptyset -Konzentrationen eingeflossen sind. Die Werte von b) und c) sind als Nullwerte berücksichtigt worden.....	7
Tabelle 3.	Metallgehalte in Leiterplatten in Geräten der WEEE-Kategorien 3 und 4, bezogen auf das ganze Gerätegewicht [mg pro kg Gerät]. Metalle in anderen Gerätekomponenten als den Leiterplatten sind hier nicht berücksichtigt.....	8
Tabelle 4.	Metallfrachten in Leiterplatten der gesammelten Geräte aus den WEEE-Kategorien 3 und 4 [kg].....	9
Tabelle 5.	Zusammensetzung in Gewichtsprozenten von unterschiedlichen Batterietypen.....	10
Tabelle 6.	Indiumgehalt der Bildschirme unterschiedlicher Technologien und Grössen. Die Werte entsprechen dem Gesamtverbrauch bei der Herstellung.....	10
Tabelle 7.	Schichtdicke, ITO- und Indium-Gehalt von Bildschirmen gemässe unterschiedlichen Quellen.....	11
Tabelle 8.	Chemische Zusammensetzung der fluoreszierenden Pulverbeschichtung Computer-Bildröhren [14].	11
Tabelle 9.	Minimale, maximale und typische Zusammensetzung eines Tantalkondensators [15].	11
Tabelle 10.	Übersicht über Typ und Stand der Implementierung der Rückgewinnungsverfahren für Elektro- und Elektronikaltgeräte und ihre Komponenten.	13
Tabelle 11.	Kategorisierung der Metalle nach existierenden Rückgewinnungsverfahren für Elektro- und Elektronikaltgeräte und ihre Komponenten (Zusammenfassung von Tabelle 10).....	14

Abkürzungen

CD	Compact disk
CH	Schweiz
CRT	Cathode ray tube (Bildröhrenbildschirm)
EEE	Electrical and electronic equipment
EU	Europäische Union
EoL	End of Life
FED	Field emitter display
HDD	Hard disk drive (Festplatte)
IT	Information und Telekommunikation
ITO	Indium tin oxide
LCD	Liquid crystal display
LED	Light emitting diode
LIB	Lithium-Ionen Batterien
MD	Mini-Disk
NiMH	Nickel-Metallhydrid
OLED	Organic light emitting diode
PC	Personal computer
PDP	Plasma display panel
PGM	Platin group metals (Platinmetalle)
PTFE	Polytetrafluorethylen
PWB	Printed wiring board (Leiterplatte)
REE	Rare earth elements (Seltene Erden)
VCR	Video cassette recorder
WEEE	Waste electrical and electronic equipment
CD	Compact disk
CH	Schweiz
CRT	Cathode ray tube (Bildröhrenbildschirm)

1 Einleitung

In den vergangenen drei Jahrzehnten hat die zunehmende Verbreitung von elektronischen Geräten und Komponenten die Nachfrage nach seltenen Metallen¹, welche bis vor wenigen Jahrzehnten noch kaum verwendet wurden, stark ansteigen lassen. Wie in der Empa-Studie vom September 2011 [1] gezeigt worden ist, sind mittlerweile verschiedene Studien zum Schluss gekommen, dass die Versorgung mit solchen Metallen vor allem aus primären Lagerstätten in den nächsten Jahren kritisch werden könnte. Eine verstärkte Rückgewinnung dieser seltenen Metalle aus Produktionsabfällen und ausgedienten Konsumgütern könnte zumindest zu einer Entschärfung dieser Problematik führen.

Im Rahmen der Revision der Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (EEE – electrical and electronic equipment) vom 14. Januar 1998 überprüft das BAFU derzeit, inwieweit eine vermehrte Rückgewinnung ausgewählter, als kritisch eingestufte seltener Metalle Sinn machen würde. Dazu soll in einem ersten Schritt die Rückgewinnungspotentiale seltener Metalle aufgrund bestehender Informationen abgeschätzt werden; weitere Informationen soll insbesondere die Stoffflussanalyse bei einem Schweizerischen Betrieb für Elektro- und Elektronikaltgeräte (WEEE – waste electrical and electronic equipment) liefern.

Ziel des vorliegenden Projektes war es, im Hinblick auf eine Abschätzung der Rückgewinnungspotentiale seltener Metalle bestehende Daten zusammenzutragen und die grössten Datenlücken aufzuzeigen. Im ersten Teil des Berichtes werden die Ergebnisse einer Literaturrecherche über Vorkommen und Konzentrationen ausgewählter, seltener Metalle in EEE und deren Komponenten vorgestellt. Im zweiten Teil wird dann eine erste Übersicht über existierende und sich in Entwicklung befindende Rückgewinnungstechnologien für diese Metalle gegeben.

Der Fokus der Studie liegt auf folgenden Metallen:

Au	Gold	Os	Osmium
Be	Beryllium	Pd	Palladium
Ce	Cer	Pr	Praseodym
Co	Kobalt	Pt	Platin
Dy	Dysprosium	Re	Rhenium
Ga	Gallium	Rh	Rhodium
Gd	Gadolinium	Ru	Ruthenium
Ge	Germanium	Sb	Antimon
In	Indium	Sn	Zinn
Ir	Iridium	Ta	Tantal
La	Lanthan	Tb	Terbium
Li	Lithium	Te	Tellur
Nb	Niob	W	Wolfram
Nd	Neodym		

¹ als (geochemisch) "selten" werden Metalle bezeichnet, deren durchschnittliche Konzentration in der Erdkruste weniger als 0.01 Gewichts-% beträgt [1]

2 Vorgehen

2.1 Auswahl der untersuchten Metalle

Die Auswahl der untersuchten Metalle beruht im Wesentlichen auf den Ergebnissen einer Übersichtsstudie der Empa zu seltenen Technologiemetallen [1], in welcher unter anderem die Kritikalität der Metalle analysiert wurde. In der hier vorliegenden Arbeit wurden folgende Metalle berücksichtigt: Edel- und Platinmetalle, Seltene Erden sowie Antimon, Beryllium, Gallium, Germanium, Indium, Kobalt, Lithium, Niob, Rhenium, Tantal, Tellur, Zinn und Wolfram. Von den in der Übersichtsstudie erwähnten Metallen wurde alle Edel- und Platinmetalle (Au, Ir, Os, Pd, Pt, Rh, Ru), jedoch nicht alle Seltenen Erden (Ce, Dy, Gd, La, Nd, Pr) berücksichtigt.

2.2 Literatur- und Internetrecherchen

Eine erste Literatur- und Internetrecherche wurde durchgeführt, um das bestehende Wissen zu den Gehalten der ausgewählten seltenen Metalle in Geräten der EU-WEEE Kategorien 3 und 4 in Erfahrung zu bringen. In einer zweiten, parallel dazu durchgeführten Literatur- und Internetstudie wurde der Stand des Wissens zu bestehenden Technologien für die Rückgewinnung seltener Metalle aus WEEE zusammengetragen.

2.3 Berechnungen der Metallkonzentrationen und -frachten

Aus den in der Literatur- und Internetrecherche ermittelten Daten wurden durchschnittliche Metallkonzentrationen und -frachten in den Leiterplatten (engl. printed wiring board, PWB) der EEE (siehe Kapitel 3.1 und Anhang) berechnet. Dazu waren im Wesentlichen folgende drei Schritte erforderlich:

1. Metallkonzentration pro kg Gerät $c_{G(kg)}$ (mg Metall/kg Gerät)

- *Benötigte Daten:* durchschnittliche Metallkonzentrationen in den Leiterplatten c_{PWB} (mg Metall/kg PWB), prozentualer Anteil der Leiterplatten am Gerätegewicht f_{PWB} (% PWB).
- Berechnung:

$$c_{G(kg)} = c_{PWB} * f_{PWB}$$

2. Metallkonzentration pro Gerät $c_{G(tot)}$ (mg Metall/Gerät)

- *Benötigte Daten:* durchschnittliche Metallkonzentrationen in den Leiterplatten c_{PWB} (mg Metall/kg PWB), prozentualer Anteil der Leiterplatten am Gerätegewicht f_{PWB} (% PWB), durchschnittliches Gerätegewicht $m_{G(\emptyset)}$ (kg)
- Berechnung:

$$c_{G(tot)} = c_{PWB} * f_{PWB} * m_{G(\emptyset)}$$

3. Metallfracht in den in der Schweiz gesammelten Altgeräte $m_{G(CH,2010)}$ (kg Metall)

- *Benötigte Daten:* Metallkonzentration pro kg Gerät $c_{G(kg)}$ (mg Metall/kg Gerät), gesammelte Mengen Altgeräte in der Schweiz für das Jahr 2010 $m_{G,Sammlung}$ (kg Geräte)

- *Berechnung:*

$$m_{G(CH,2010)} = C_{G(kg)} * m_{G,Sammlung}$$

In der gesichteten Literatur werden typischerweise *durchschnittliche Metallkonzentrationen in den Leiterplatten verschiedener Geräte (mg Metall/kg PWB)* ausgewiesen, weshalb diese auch die Grundlage für die Berechnung bildeten.

Da die Konzentration von zahlreichen Elemente in verschiedenen Messungen unter der Nachweisgrenze liegen, sind in der Literatur einige Werte als „ND“ (not detected, nicht entdeckt, Nachweisgrenze unbekannt) oder „<x mg/kg“ (nicht bestimmt, Nachweisgrenze x mg/kg) angegeben. Diese Werte wurden hier Null gesetzt und so in die Durchschnittskonzentrationen miteinberechnet, um ein Minimalszenario für die Durchschnittskonzentration abzuschätzen. Da bei den meisten Werten keine Nachweisgrenze angegeben wird (ND), konnte kein Maximalszenario mit den Konzentrationen bei der Nachweisgrenze berechnet werden.

3 Seltene Metalle in elektronischen Geräten

Die Vielfalt an Metallen in EEE ist sehr gross. Allerdings gibt es nur wenig genaue und verlässliche Informationen über Vorkommen und Konzentration der einzelnen Metalle in EEE und deren Komponenten. Bei der Interpretation der in diesem Kapitel vorgestellten, über eine Literatur- und Internetrecherche ermittelten Daten gilt es folgendes zu beachten:

- Die Daten stammen aus Studien, welche sich bezüglich Qualität, Zielen, Systemgrenzen (untersuchte Metalle), etc. stark unterscheiden. Dementsprechend sind die Daten sehr heterogen.
- Die Daten widerspiegeln nur die Metallvorkommen, welche die gefundenen Studien ausweisen. (Fehlende Werte bei den Metallkonzentrationen können bedeuten, dass die entsprechenden Metalle nicht gemessen wurden.)

Tabelle 1 Vorkommen der untersuchten Elemente in den Leiterplatten und anderen Bauteilen der Geräte gemäss den Literaturdaten. Blau: Elemente wurden nur in Leiterplatten eines Gerätes gefunden. Rot: Elemente wurden in Leiterplatten und/oder anderen Bauteilen eines Gerätes gefunden.

	Au	Be	Ce	Co	Dy	Ga	Gd	Ge	In	Ir	La	Li	Nb	Nd	Os	Pd	Pr	Pt	Re	Rh	Ru	Sb	Sn	Ta	Tb	Te	W	
PC	■	■	■	■		■		■	■		■	■	■	■		■		■				■	■	■	■		■	■
Laptop	■	■	■	■		■		■	■		■	■	■	■		■		■				■	■	■	■			■
Telefongerät		■		■							■	■	■	■									■	■				■
Drucker	■			■		■		■			■	■	■	■		■							■	■				■
Mobiltelefon	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■		■	■	■		■		■	■	■	■	■	■	■
Faxgerät	■			■							■	■	■	■		■							■	■				■
TV, CRT	■		■	■							■	■	■	■		■							■	■				■
TV, Plasma	■			■			■				■			■									■	■	■	■		
TV, LCD	■										■			■									■	■	■	■		
Videorekorder, VCR	■	■		■		■					■	■	■	■		■		■				■	■	■	■	■	■	■
DVD-Spieler	■		■	■		■					■	■	■	■		■		■				■	■	■	■	■	■	■
Stereoanlage	■			■							■	■	■	■		■		■					■	■				■
Kassettenradio	■			■		■					■	■	■	■		■		■					■	■	■	■	■	■
Digitalkamera	■	■	■	■	■	■		■	■		■	■	■	■		■		■			■	■	■	■	■	■	■	■
Videokamera	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■	■	■		■	■	■			■	■	■	■	■	■	■	■
CD-Spieler, tragbar	■	■	■	■	■	■		■	■		■	■	■	■		■		■			■	■	■	■	■	■	■	■
Minidisk-Spieler, tragbar	■	■	■	■	■	■		■	■		■	■	■	■		■		■			■	■	■	■	■	■	■	■

* keine Daten für andere Bauteile als Leiterplatten

Leiterplatten
Leiterplatten und/oder andere Bauteile

Tabelle 1 gibt einen Überblick über das Vorkommen der 27 untersuchten Metalle in Geräten der EU-WEEE-Kategorien 3 und 4. Dabei wird unterschieden zwischen Metallvorkommen ausschliesslich in Leiterplatten (blau) und Metallvorkommen, die in Leiterplatten und/oder in anderen Bauteilen gefunden wurden (rot). Am meisten Daten wurden zu den Metallgehalten in Leiterplatten gefunden. Die Daten zu den anderen Gerätekomponenten beschreiben unterschiedliche Bauteile (Bildröhrenglas, LCD Modul, Batterien, etc.), können sich aber auch auf ganze Geräte beziehen, die potentiell Leiterplatten enthalten.

Abgesehen von Iridium, Osmium und Rhenium wurden in der Literatur alle untersuchten Metalle nachgewiesen. Dass für Desktop Computer, Laptops und Mobiltelefone eine relativ grosse Palette an Elementen sowohl in Leiterplatten wie auch anderen Bauteilen gefunden wurden, ist darauf zurückzuführen, dass die entsprechenden Studien die Konzentrationen in den gesamten Geräten ausweisen und damit auch die Metalle in den Leiterplatten mitberücksichtigen. Sieht man von diesen drei Gerätetypen ab, fällt die im Vergleich zu den Leiterplatten relativ kleine Zahl an Metallen in den anderen Bauteilen auf. Gemäss den Daten kommen hier nur die Metalle Be, Ce, Co, Li, Nd, Sb und Te vor. Dies könnte unter anderem auch damit zusammenhängen, dass die Studien, welche nicht auf Leiterplatten fokussieren, jeweils nur einige wenige Metalle abdecken.

Im Kapitel 3.1 werden die Daten zu Metallkonzentrationen in Leiterplatten zusammengefasst und diskutiert. Einige ausgesuchte Resultate für die restlichen Gerätekomponenten werden im Kapitel 3.2 kurz aufgeführt. Ausführliche Tabellen mit den Werten aller Studien finden sich im Anhang. Dort sind auch die Quellenangaben für die Daten zu finden.

3.1 Leiterplatten

Von den 27 untersuchten Metallen kommen 24 in den Leiterplatten der Geräte vor (Ir, Os und Re wurden nicht gefunden). Die Untersuchungsrahmen der Studien bezüglich der Anzahl untersuchter Metalle – auch anderer Metalle als die hier untersuchten – waren unterschiedlich umfassend (minimale Anzahl 2; maximale Anzahl 19). Ein Grossteil der Daten zu Leiterplatten stammt aus einer Studie von M. Oguchi et al. [2], welche die Resultate mehrerer japanischer Studien zusammenfasst (Details siehe Anhang 3).

Grundsätzlich wurden alle Werte, die als unter der Nachweisgrenze der jeweiligen Untersuchung ausgewiesen werden, Null gesetzt. Dies sind einerseits Werte, bei welchen explizit die Nachweisgrenze angegeben wird (Typ A: < x mg/kg), andererseits Werte, bei welchen zwar angegeben wird, dass sie unter der Nachweisgrenze liegen, diese aber nicht beziffert wird (Typ B: ND – not detected). Da diese Werte als Nullwerte in die Berechnung der Metallkonzentrationen und –mengen eingeflossen sind, können die Resultate tendenziell als Minimalwerte betrachtet werden. In Tabelle 2 ist unter jeder Metallkonzentration angegeben, aus wie vielen gemessenen Werten und wie vielen Werten des Typs A und des Typs B er berechnet ist (z.B. 9/0/2: 9 gemessene Werte, 0 Werte des Typs A und 2 Werte des Typs B). Wie Tabelle 2 zeigt, variieren die ausgewiesenen, **durchschnittlichen Metallkonzentrationen in den Leiterplatten** stark (zwischen 1 und 50'000 mg pro kg Leiterplatte). Einerseits sind dabei gewisse Metalle (z.B. Sn, Sb, Nd, Au) in Leiterplatten aller Geräte tendenziell in höheren Konzentrationen vorzufinden als viele andere Metalle. Andererseits scheinen viele Metalle speziell in High-Tech-Geräten wie Laptops, Mobiltelefongeräten, Digitalkameras, Videokameras, etc. in höheren Konzentrationen vorzukommen (z.B. Ta, W, Te, Rh, Ce, Pr, Nd, Au, La).

Die Metalle Ruthenium und Platin kommen in den Leiterplatten gemäss den Daten nur in sehr geringen Konzentrationen vor (meist <10mg/kg Leiterplatte). Die Metalle Iridium, Osmium und Rhenium werden in keiner Studie ausgewiesen.

Mit Hilfe des durchschnittlichen prozentualen Anteils der Leiterplatten am Gerätegewicht wurde aus den Metallkonzentrationen in Leiterplatten (siehe Tabelle 2) die **Metallkonzentration in WEEE Geräten** berechnet (siehe Tabelle 3, nur die Metalle in den Leiterplatten werden berücksichtigt). Zusammen mit den Angaben über die im Jahr 2010 in der Schweiz gesammelten Geräte [3] lässt sich daraus eine erste grobe Abschätzung der potentiell verfügbaren Metallmengen in Leiterplatten machen. Die Resultate dieser Abschätzung finden sich in Tabelle 4, die zur Abschätzung benötigten Daten in Anhang 1.

Abgesehen von den Faxgeräten, wo Angaben zu den gesammelten Mengen fehlen, konnte diese Berechnung für alle **IT-Geräte (EU-WEEE Kategorie 3)** durchgeführt werden. Die grössten **Frachten (Schweiz, 2010)** an seltenen Metallen in Leiterplatten von IT-Geräten sind danach für Zinn (12'493 kg) und Antimon (1'085 kg) zu finden (Tabelle 4). Weitere Metalle, die in Mengen von mehr als 100 kg vorkommen, sind Tantal, Gold und Neodym. Die Frachten dieser 3 Metalle stammen grösstenteils aus Leiterplatten in Desktop Computern, Laptops und Mobiltelefongeräten, wobei 90% des Tantals in Laptops vorzufinden ist. Lanthan, und Wolfram kommen in Mengen zwischen 50 und 100 kg vor. In erster Linie stammen diese Metalle aus Leiterplatten in Desktop Computern und Laptops. Für Metalle wie Dysprosium, Gallium, Gadolinium, Germanium, Indium, Praseodym, Platin, Ruthenium, Terbium und Tellur wurde je eine Menge von weniger als 5 kg berechnet.

Da für viele **Geräte der Unterhaltungselektronik (EU-WEEE Kategorie 4)** Angaben über die gesammelten Mengen fehlen, sind einerseits die Foto- und Videokameras und andererseits die restlichen Geräte der Unterhaltungselektronik zusammengefasst ausgewiesen (Tabelle 4). Vereinfachend wurde in diesen beiden Fällen die durchschnittliche Metallkonzentration über die zusammengefassten Geräte benutzt. Da bei diesem Berechnungsschritt keine Gewichtung aufgrund von Mengenanteilen vorgenommen wurde, sollten die entsprechenden Metallmengen mit besonderer Vorsicht interpretiert werden. Beispielsweise führt die überproportional starke Gewichtung der hohen Tantalkonzentration in MD-playern dazu, dass die Tantalfracht (2'634 kg) vermutlich überschätzt wird. Deshalb werden die einzelnen Werte hier nicht näher diskutiert.

Tabelle 2. Durchschnittliche Metallkonzentration in mg pro kg Leiterplatten in Geräten der WEEE-Kategorien 3 und 4. Unter jedem Wert sind die Anzahl Werte angegeben, welche als a) gemessene Konzentrationen, b) „< - Werte“, Typ A (nicht gefunden, Nachweisgrenze angegeben) bzw. c) ND-Werte, Typ B (nicht gefunden, Nachweisgrenze unbekannt) in die σ -Konzentrationen eingeflossen sind. Die Werte von b) und c) sind als Nullwerte berücksichtigt worden.

mg/kg PWB		Au	Be	Ce	Co	Dy	Ga	Gd	Ge	In	Ir	La	Li	Nb	Nd	Os	Pd	Pr	Pt	Re	Rh	Ru	Sb	Sn	Ta	Tb	Te	W
PC	mg/kg	229.2	2.3	20.0	11.9	-	2.6	-	-	-	-	110.0	81.6	19.0	100.0	-	55.1	-	0.9	-	-	2.5	2020	19125	1.6	-	1.9	94.3
	#	9/0/0	2/1/6	1/0/0	2/0/6	0/0/0	2/0/6	0/0/0	0/0/6	0/1/6	0/0/0	1/0/0	4/0/3	1/0/0	1/0/0	0/0/0	4/0/5	0/0/0	3/0/6	0/0/0	0/2/6	1/1/0	8/0/0	8/0/0	2/0/6	0/0/0	2/0/6	2/0/5
Laptop	mg/kg	436.3	32.0	30.0	80.0	-	9.5	-	13.5	1.5	-	105.0	9.0	36.0	485.0	-	166.3	-	1.3	-	-	6.3	1276.5	15667	1933.3	-	-	3.7
	#	3/0/0	2/0/0	1/0/0	2/0/0	0/0/0	3/0/0	0/0/0	2/0/0	1/1/0	0/1/0	2/0/0	2/0/0	2/0/0	2/0/0	0/0/0	3/0/0	0/0/0	2/1/0	0/0/0	0/3/0	1/2/0	2/0/0	3/0/0	1/2/0	0/0/0	0/3/0	1/2/0
Telefongerät	mg/kg	-	-	-	100.0	-	-	-	-	-	-	200.0	200.0	100.0	300.0	-	-	-	-	-	-	-	1400	34000	-	-	-	-
	#	0/1/0	0/0/0	0/0/0	1/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/1/0	0/0/0	1/0/0	1/0/0	1/0/0	1/0/0	0/0/0	0/1/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	1/0/0	1/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
Drucker	mg/kg	46.7	-	-	29.3	-	2.1	-	2.4	-	-	4.9	69.1	1.1	43.0	-	19.3	-	-	-	-	-	396.7	13667	-	-	-	10.0
	#	3/0/0	0/2/1	0/0/0	3/0/0	0/0/0	2/0/1	0/0/0	2/0/0	0/2/1	0/0/0	2/0/0	3/0/0	2/0/0	2/0/0	0/0/0	3/0/0	0/0/0	0/2/0	0/0/0	0/2/0	0/2/0	3/0/0	3/0/0	0/2/1	0/0/0	0/2/0	1/2/0
Mobiltelefon	mg/kg	1431.6	40.3	817.2	538.9	55.6	118.5	100.0	72.0	50.7	-	830.0	120.0	24.3	2670.7	-	371.8	260.0	13.7	-	540.0	9.0	759.5	34105	2801	69.5	100.0	2339
	#	20/0/0	16/0/0	11/0/0	19/0/0	14/0/0	17/0/0	1/0/0	5/0/0	6/1/0	0/0/0	15/0/0	2/0/0	3/0/0	15/0/0	0/0/0	20/0/0	3/0/0	13/0/0	0/0/0	1/0/0	4/0/0	19/0/0	19/0/0	18/0/0	2/0/0	1/0/0	18/0/0
Faxgerät	mg/kg	35.0	-	-	420.0	-	-	-	-	-	-	-	36.0	-	-	-	110.0	-	-	-	-	-	670.0	7400	-	-	-	72.0
	#	1/0/0	0/0/1	0/0/0	1/0/0	0/0/0	0/0/1	0/0/0	0/0/0	0/0/1	0/0/0	0/0/0	1/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	1/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	1/0/0	1/0/0	0/0/1	0/0/0	0/0/0	1/0/0
TV, CRT	mg/kg	8.7	-	-	11.5	-	-	-	-	-	-	1.7	1.0	7.1	2.4	-	8.1	-	-	-	-	-	2693	17129	-	-	-	-
	#	3/1/4	0/1/4	0/0/0	3/0/4	0/0/0	0/1/4	0/0/0	0/1/4	0/1/4	0/1/0	1/0/0	2/1/4	1/0/0	1/0/0	0/0/0	3/1/4	0/0/0	0/0/4	0/0/0	0/0/4	0/1/0	7/0/0	7/0/0	0/1/4	0/0/0	0/1/4	0/1/4
TV, Plasma	mg/kg	150.0	-	-	-	-	-	100.0	-	-	-	100.0	-	-	100.0	-	-	-	-	-	-	-	800.0	14650	100.0	-	-	-
	#	1/1/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	1/0/0	0/0/0	0/2/0	0/0/0	1/0/0	0/0/0	0/0/0	1/0/0	0/0/0	0/2/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	2/0/0	2/0/0	1/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
TV, LCD	mg/kg	127.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.0	-	-	-	-	-	1800	29000	-	-	-	-
	#	3/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/1/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	2/1/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	1/0/0	1/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
Videorekorder, VCR	mg/kg	11.5	-	-	47.3	-	4.5	-	-	-	-	-	3.3	-	-	-	25.0	-	6.0	-	-	6.0	1300	17800	11.5	-	-	19.0
	#	1/0/1	0/1/1	0/1/0	2/0/0	0/0/0	1/0/1	0/0/0	0/0/0	0/0/1	0/0/0	0/0/0	1/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	1/0/1	0/0/0	1/0/0	0/0/0	0/1/0	1/0/0	2/0/0	2/0/0	1/0/1	0/0/0	0/1/0	2/0/0
DVD-Spieler	mg/kg	132.8	-	5.0	55.0	-	9.0	-	-	-	-	-	-	-	100.0	-	10.3	-	4.5	-	-	1.5	1200	22333	76.5	-	-	6.5
	#	4/0/0	0/2/0	1/1/0	1/1/0	0/0/0	2/0/0	0/0/0	0/0/0	0/1/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	1/0/0	0/0/0	2/2/0	0/0/0	2/0/0	0/0/0	0/2/0	1/1/0	3/0/0	3/0/0	2/0/0	0/0/0	0/2/0	2/0/0
Stereanlage	mg/kg	6.2	-	-	3.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	470.0	22000	-	-	-	85.0
	#	1/0/0	0/0/1	0/0/0	1/0/0	0/0/0	0/0/1	0/0/0	0/0/0	0/0/1	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/1	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	1/0/0	1/0/0	0/0/1	0/0/0	0/0/0	1/0/0
Kassettenradio	mg/kg	26.0	-	-	4.0	-	6.0	-	-	-	-	-	8.1	-	-	-	17.0	-	2.0	-	-	-	3035	23500	4.5	-	1.0	23.5
	#	2/0/0	0/1/1	0/1/0	1/1/0	0/0/0	1/0/1	0/0/0	0/0/0	0/0/1	0/0/0	0/0/0	1/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	1/1/0	0/0/0	1/0/0	0/0/0	0/1/0	0/1/0	2/0/0	2/0/0	1/0/1	0/0/0	1/0/0	2/0/0
Digitalkamera	mg/kg	794.0	68.4	74.4	164.4	56.2	51.8	-	140.0	86.7	-	139.0	52.0	191.7	336.3	-	189.5	-	1.0	-	235.0	10.5	1800	39300	8139	18.0	55.0	693.9
	#	10/0/0	5/0/0	4/1/0	10/0/0	5/0/0	5/0/0	0/0/0	1/0/0	2/1/0	0/0/0	8/0/0	1/0/0	3/0/0	8/0/0	0/0/0	10/0/0	0/0/0	2/0/0	0/0/0	1/1/0	2/0/0	10/0/0	10/0/0	10/0/0	1/0/0	1/1/0	8/0/0
Videokamera	mg/kg	528.8	-	222.7	150.0	61.6	89.0	100.0	200.0	70.0	-	445.0	-	386.0	816.7	-	860.0	100.0	10.2	-	-	13.0	1889	38625	8683	30.0	215.0	578.6
	#	8/0/0	0/1/0	6/0/0	7/1/0	5/0/0	3/0/0	1/0/0	1/0/0	1/1/0	0/0/0	6/0/0	0/0/0	2/0/0	6/0/0	0/0/0	8/0/0	1/0/0	6/0/0	0/0/0	0/1/0	1/0/0	8/0/0	8/0/0	8/0/0	1/0/0	1/1/0	7/0/0
CD-Spieler, tragbar	mg/kg	370.0	-	100.0	80.0	100.0	-	-	140.0	-	-	100.0	-	270.0	200.0	-	5.0	-	-	-	-	-	1400	50000	665.0	-	-	20.0
	#	2/0/0	1/0/0	1/0/0	2/0/0	1/0/0	0/0/0	0/0/0	1/0/0	0/1/0	0/0/0	1/0/0	0/0/0	1/0/0	1/0/0	0/0/0	1/1/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	2/0/0	2/0/0	2/0/0	0/0/0	0/0/0	1/0/0
Minidisk-Spieler, tragbar	mg/kg	935.0	60.0	20.0	150.0	100.0	-	-	120.0	-	-	100.0	20.0	550.0	100.0	-	275.0	-	-	-	-	-	1150	48000	9600	-	-	105.0
	#	2/0/0	1/0/0	1/0/0	2/0/0	1/0/0	0/0/0	0/0/0	1/0/0	0/1/0	0/0/0	1/0/0	1/0/0	1/0/0	1/0/0	0/0/0	1/1/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	2/0/0	2/0/0	2/0/0	0/0/0	0/0/0	2/0/0

in mg/kg PWB >10000 > 5000 >1000 >500 >100 >50 >10 <10

Tabelle 3. Metallgehalte in Leiterplatten in Geräten der WEEE-Kategorien 3 und 4, bezogen auf das ganze Gerätegewicht [mg pro kg Gerät]. Metalle in anderen Gerätekomponten als den Leiterplatten sind hier nicht berücksichtigt.

mg/kg device		Au	Be	Ce	Co	Dy	Ga	Gd	Ge	In	Ir	La	Li	Nb	Nd	Os	Pd	Pr	Pt	Re	Rh	Ru	Sb	Sn	Ta	Tb	Te	W
PC	mg/kg	19.1	0.2	1.7	1.0	-	0.2	-	-	-	-	9.2	6.8	1.6	8.3	-	4.6	-	0.1	-	-	0.2	168	1591	0.1	-	0.2	7.8
Laptop	mg/kg	63.7	4.7	4.4	11.7	-	1.4	-	2.0	0.2	-	15.3	1.3	5.3	70.8	-	24.3	-	0.2	-	-	0.9	186	2288	282.4	-	-	0.5
Telefongerät	mg/kg	-	-	-	1.9	-	-	-	-	-	-	3.9	3.9	1.9	5.8	-	-	-	-	-	-	-	27	658	-	-	-	-
Drucker	mg/kg	0.8	-	-	0.5	-	0.0	-	0.0	-	-	0.1	1.2	0.0	0.8	-	0.3	-	-	-	-	-	7	239	-	-	-	0.2
Mobiltelefon	mg/kg	280.7	7.9	160.2	105.7	10.9	23.2	19.6	14.1	9.9	-	162.7	23.5	4.8	523.7	-	72.9	51.0	2.7	-	105.9	1.8	149	6687	549.1	13.6	19.6	458.7
Faxgerät	mg/kg	4.3	-	-	51.2	-	-	-	-	-	-	-	4.4	-	-	-	13.4	-	-	-	-	-	82	903	-	-	-	8.8
TV, CRT	mg/kg	0.1	-	-	0.1	-	-	-	-	-	-	0.0	0.0	0.1	0.0	-	0.1	-	-	-	-	-	33	210	-	-	-	-
TV, Plasma	mg/kg	11.7	-	-	-	-	-	7.8	-	-	-	7.8	-	-	7.8	-	-	-	-	-	-	-	62	1143	7.8	-	-	-
TV, LCD	mg/kg	15.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.3	-	-	-	-	-	220	3539	-	-	-	-
Videorekorder, VCR	mg/kg	1.8	-	-	7.5	-	0.7	-	-	-	-	-	0.5	-	-	-	4.0	-	0.9	-	-	0.9	205	2812	1.8	-	-	3.0
DVD-Spieler	mg/kg	18.6	-	0.7	7.7	-	1.3	-	-	-	-	-	-	-	14.0	-	1.4	-	0.6	-	-	0.2	168	3127	10.7	-	-	0.9
Stereoanlage	mg/kg	0.7	-	-	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52	2442	-	-	-	9.4
Kassettenradio	mg/kg	2.7	-	-	0.4	-	0.6	-	-	-	-	-	0.8	-	-	-	1.8	-	0.2	-	-	-	316	2444	0.5	-	0.1	2.4
Digitalkamera	mg/kg	160.4	13.8	15.0	33.2	11.4	10.5	-	28.3	17.5	-	28.1	10.5	38.7	67.9	-	38.3	-	0.2	-	47.5	2.1	364	7939	1644.1	3.6	11.1	140.2
Videokamera	mg/kg	93.6	-	39.4	26.6	10.9	15.8	17.7	35.4	12.4	-	78.8	-	68.3	144.6	-	152.2	17.7	1.8	-	-	2.3	334	6837	1536.9	5.3	38.1	102.4
CD-Spieler, tragbar	mg/kg	37.4	-	10.1	8.1	10.1	-	-	14.1	-	-	10.1	-	27.3	20.2	-	0.5	-	-	-	-	-	141	5050	67.2	-	-	2.0
Minidisk-Spieler, tragbar	mg/kg	146.8	9.4	3.1	23.6	15.7	-	-	18.8	-	-	15.7	3.1	86.4	15.7	-	43.2	-	-	-	-	-	181	7536	1507.2	-	-	16.5

in mg/kg device >10000 > 5000 >1000 >500 >100 >50 >10 <10

Tabelle 4. Metallfrachten in Leiterplatten der gesammelten Geräte aus den WEEE-Kategorien 3 und 4 [kg].

kg (WEEE, CH, 2010)	Au	Be	Ce	Co	Dy	Ga	Gd	Ge	In	Ir	La	Li	Nb	Nd	Os	Pd	Pr	Pt	Re	Rh	Ru	Sb	Sn	Ta	Tb	Te	W
PC	94.2	1.0	8.2	4.9	-	1.1	-	-	-	-	45.2	33.5	7.8	41.1	-	22.7	-	0.4	-	-	1.0	830.1	7860.4	0.7	-	0.8	38.8
Laptop	56.7	4.2	3.9	10.4	-	1.2	-	1.8	0.2	-	13.7	1.2	4.7	63.1	-	21.6	-	0.2	-	-	0.8	165.9	2037	251.3	-	-	0.5
Telefongerät	-	-	-	3.9	-	-	-	-	-	-	7.8	7.8	3.9	11.7	-	-	-	-	-	-	-	54.6	1326	-	-	-	-
Drucker	3.2	-	-	2.0	-	0.1	-	0.2	-	-	0.3	4.7	0.1	2.9	-	1.3	-	-	-	-	-	27.0	929.3	-	-	-	0.7
Mobiltelefon	14.3	0.4	8.2	5.4	0.6	1.2	1.0	0.7	0.5	-	8.3	1.2	0.2	26.7	-	3.7	2.6	0.1	-	5.4	0.1	7.6	341.1	28.0	0.7	1.0	23.4
Faxgerät ¹	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
EU-WEEE Kategorie 3	168.4	5.5	20.3	26.6	0.6	3.6	1.0	2.6	0.7	-	75.3	48.4	16.7	145.5	-	49.3	2.6	0.7	-	5.4	1.9	1085	12493	280.0	0.7	1.8	63.3
TV, CRT	1.6	-	-	2.2	-	-	-	-	-	-	0.3	0.2	1.3	0.5	-	1.5	-	-	-	-	-	511.6	3254	-	-	-	-
TV, Plasma ¹	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
TV, LCD	16.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.4	-	-	-	-	-	232.2	3741.0	-	-	-	-
Videorekorder, VCR ¹	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
DVD-Spieler ¹	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Stereoanlage ¹	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Kassettenradio ¹	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Digitalkamera ¹	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Videokamera ¹	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
CD-Spieler, tragbar ¹	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
MD-Spieler, tragbar ¹	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Foto/Video ²	13.0	0.7	2.8	3.0	1.1	1.3	0.9	3.2	1.5	-	5.4	0.5	5.5	10.8	-	9.7	0.9	0.1	-	2.4	0.2	35.6	753.5	162.2	0.5	2.5	12.4
Unterhaltungselekt., Rest ³	340.3	14.6	21.6	73.7	40.0	4.0	12.1	51.1	-	-	52.1	7.0	176.0	89.4	-	78.8	-	2.8	-	-	1.8	1744	38044	2472	-	0.2	53.1
EU-WEEE Kategorie 4	371.4	15.3	24.4	78.9	41.1	5.4	13.0	54.3	1.5	-	57.8	7.7	182.9	100.7	-	91.4	0.9	2.9	-	2.4	2.0	2523	45793	2634	0.5	2.7	65.5

¹ Keine Daten für CH 2010 (nd)

² g-Konzentrationen von Digital- und Videokamera wurden verwendet

³ g-Konzentrationen d. restl. Unterhaltungselektronik wurden verwendet

<i>in kg</i>	>1000	>100	>50	>10	>5	>1	>0.5	>0	0
--------------	-------	------	-----	-----	----	----	------	----	---

3.2 Andere Bauteile

Andere Bauteile als Leiterplatten in Elektroaltgeräten enthalten zwar nicht so viele verschiedene seltene Metalle wie die Leiterplatten, die Metalle werden aber durchaus spezifisch in den anderen Bauteilen eingesetzt. Allerdings konnten zur Zusammensetzung der jeweiligen Bauteile nicht so viele Datensätze gefunden werden wie zur Zusammensetzung von Leiterplatten, weshalb eine Aggregation der Datensätze zu durchschnittlichen Metallkonzentrationen je Bauteil nicht möglich war. Alle gesammelten Datensätze über die Metallkonzentrationen in den anderen Bauteilen (und teilweise in ganzen Geräten) sind im Anhang 4 aufgelistet. Einige Datensätze werden jedoch in den folgenden Tabellen hervorgehoben.

Tabelle 5. Zusammensetzung in Gewichtsprozenten von unterschiedlichen Batterietypen.

<i>Gew-%</i>	Co	Li	Al	C	Cd	Cu	Fe	Mn	Ni	V	Electrolyte	Plastic	Quelle
LiCo	16	2	3			10	19						[4]
<i>Al can</i>	16		35	10		8	1		2		10-15	10-30	[5]
<i>Fe can</i>	15		5	10		8	35		1		10-15	10-30	[5]
LiCo	12-20	1.5	4.6-24			5-10	4.7-25						[6]
LiNi		1.5	4.6-24			5-10	4.7-25		12-15				[6]
LiMn		1.5	4.6-24			5-10	4.7-25	10-15					[6]
LiPolymer (V)		5.5	4.6-24			5-10	4.7-25			15-10			[6]
LiPolymer (V)	20		13	15		16	16		1		-	-	[5]
NiCd	-		-	-	17	-	45		20		15	5-15	[5]
NiMH	3		1	-		-	18		28		20	20	[5]

Tabelle 6. Indiumgehalt der Bildschirme unterschiedlicher Technologien und Grössen. Die Werte entsprechen dem Gesamtverbrauch bei der Herstellung.

<i>kg Indium/Bildschirm</i>	Kleingeräte [3"]	Kleingeräte [7"]	PC Monitor [21"]	Fernseher [37"]	Displays [46"]	Mittelwert [kg/cm ²]	Quelle
LCD	$1.11 \cdot 10^{-5}$	$6.07 \cdot 10^{-5}$	$7.28 \cdot 10^{-4}$	$2.26 \cdot 10^{-3}$	$3.49 \cdot 10^{-3}$	$4.00 \cdot 10^{-7}$	[7]
OLED	$5.23 \cdot 10^{-7}$	$2.85 \cdot 10^{-6}$	$3.41 \cdot 10^{-5}$	$1.06 \cdot 10^{-4}$	$1.64 \cdot 10^{-4}$	$1.88 \cdot 10^{-8}$	[8]
PDP*	$2.61 \cdot 10^{-7}$	$1.42 \cdot 10^{-6}$	$1.71 \cdot 10^{-5}$	$5.30 \cdot 10^{-5}$	$8.19 \cdot 10^{-5}$	$9.38 \cdot 10^{-9}$	[8]
FED*	$2.61 \cdot 10^{-7}$	$1.42 \cdot 10^{-6}$	$1.71 \cdot 10^{-5}$	$5.30 \cdot 10^{-5}$	$8.19 \cdot 10^{-5}$	$9.38 \cdot 10^{-9}$	[8]

*Indiumgehalt von PDPs und FEDs wird auf die Hälfte des Indiumgehaltes von OLEDs geschätzt, da bei beiden Technologien jeweils nur eine Elektrode aus ITO besteht.

Tabelle 7. Schichtdicke, ITO- und Indium-Gehalt von Bildschirmen gemässe unterschiedlichen Quellen.

Quelle	[9]	[10]	[11]	[12]	[12]	[13]	[13]
mg ITO/m ²	400	7176	700	192	240	72	192
nm/Schicht	1667	2990	292	80	100	30	80
mg In/m ²	3120	5597	546	150	187	56	150

Tabelle 8. Chemische Zusammensetzung der fluoreszierenden Pulverbeschichtung Computer-Bildröhren [14].

<i>mg/kg Pulver</i>	Al	Eu	In	Nd	S	Si	Sm	Y
PC Monitor	45'500	7'600	4'900	100	173'800	104'400	200	170'000

Tabelle 9. Minimale, maximale und typische Zusammensetzung eines Tantalkondensators² [15].

<i>Gew.-%</i>	Min	Max	Typisch
Ag-Paste	1.8	3.8	2.6
MnO ₂	3.7	9.0	5.7
Tantal	24.4	42.6	36.7
PTFE	0.1	1.2	0.5
Epoxid (bominiert)	0.1	1.6	1.0
Epoxy resin	36.0	54.0	40.0
Sb ₂ O ₃	0.9	1.3	1.1
FE(58)/Ni(42) Legierung	6.8	13.9	10.1
SN (Lötzinn)	0.1	5.0	2.3

² Zusammensetzung gemäss ZVEI „Umbrella Spezifikation“, siehe <http://www.zvei.de/index.php?id=2271>

4 Rückgewinnungstechnologien für seltene Metalle

Während Metalle wie Aluminium, Eisen oder Kupfer schon seit Jahren bis Jahrzehnten im Industriemassstab aus ausgedienten Konsumgütern (End-of-Life (EoL) Produkte) zurückgewonnen werden, steht die Rückgewinnung anderer Metalle aus diesen Geräten erst am Anfang.

Über eine Literatur- und Internetrecherche wurden Informationen zum aktuellen Stand der Rückgewinnungstechnologien für seltene Metalle aus Elektro- und Elektronikgeräten zusammengetragen. Bei der Interpretation der Ergebnisse dieser Recherche gilt es Folgendes zu beachten:

- Aufgrund der beschränkt zur Verfügung stehenden Mittel konnte keine ausführliche, gründliche Recherche durchgeführt werden.
- Die Ergebnisse basieren ausschliesslich auf Informationen, welche im Internet oder in der wissenschaftlichen Literatur zugänglich sind. Es wurden z.B. explizit keine eigenen Patentrecherchen durchgeführt oder Firmen direkt kontaktiert.
- Die Recherche beschränkte sich auf Technologien zur Rückgewinnung von Metallen aus *Altgeräten*. Technologien, welche ausschliesslich auf Produktionsabfälle angewendet werden können, wurden dabei nicht berücksichtigt. Zu beachten ist, dass die aufgelisteten Prozesse teilweise nur die Rückgewinnung der Metalle *aus einer bestimmten Anwendung* erlauben und nicht die generelle Rückgewinnung der Metalle.

Die Resultate der Literatur- und Internetrecherche über Rückgewinnungstechnologien für die untersuchten Metalle sind in Tabelle 10 aufgeführt. Die Tabelle unterscheidet zwischen hydro-, pyro- und biometallurgischen Verfahren, wobei in einigen Fällen die Rückgewinnung eines Metalls die Anwendung mehrerer Verfahrenstypen erforderlich ist. Die Spalte „kein Prozess“ gibt Referenzen wieder, welche explizit darauf hinweisen, dass für die entsprechenden Metalle noch keine Technologien (im Industriemassstab) zu deren Rückgewinnung existieren. Tabelle 11 fasst zusammen, in welchem Status (Industriemassstab, Pilotanlage, Labormassstab) sich die aktuell am meisten fortgeschrittene Rückgewinnungstechnologie je Metall befindet.

Für die Metalle Gold, Kobalt, Iridium, Lithium, Osmium, Palladium, Platin, Rhodium, Ruthenium, Antimon, Zinn und Tellur existieren gemäss Tabelle 11 Technologien, die deren Rückgewinnung im Industriemassstab aus End-of-Life-Produkten erlaubt. Bei Lithium gilt dies allerdings nur beschränkt, da sich keine unabhängige Bestätigung für dessen Rückgewinnung finden konnte (Ankündigung des Prozesses durch Firma selbst).

Keine Technologien (weder im industriellen Betrieb noch in Entwicklung) scheinen hingegen für folgende Metalle zu existieren: Beryllium, Gadolinium, Germanium, Niob, Rhenium, Tantal und Wolfram.

Für die hier untersuchten Metalle der Seltenen Erden (Ce, Dy, Pr, Nd, Gd, Tb) scheint es noch keine Technologien im Industriemassstab zu geben. Allerdings fällt auf, dass für alle Metalle der Seltenen Erden - mit Ausnahme von Gadolinium - Rückgewinnungstechnologien in Pilotanlagen oder im Labor angewendet werden. Dies deutet darauf hin, dass Entwicklungen hin zu einer Rückgewinnung von Seltenen Erden im Gange sind.

Tabelle 10. Übersicht über Typ und Stand der Implementierung der Rückgewinnungsverfahren für Elektro- und Elektronikaltgeräte und ihre Komponenten.

	hydrometallurgisch	pyrometallurgisch	biometallurgisch	kein Prozess
Au	Nitric acid leaching, solvent extraction, cementation [16]	Noranda process [16] Boliden [17]	Bacteria, Fungi, algae, proteins, alfalfa [16]	
	Umicore Belgium [18]			
Be				
Ce	Fluorescent powder from lamps (Eu>Gd>Ce>Tb) [19]			
	Umicore / Rhodia; NiMH-batteries; REE (Ce, La, Nd, Pr) [20]			
Co	Li-Ion Batt, Crushing, ultrasonic washing, acid leaching & precipitation [4]	Li-Ion Batt, Umicore Battery Recycling, Belgium [21]		
Dy		Nd-Fe-B-Magnets (HDD), separation of Nd & Dy, extraction agent MgCl ₂ [22], [23] ([23]: includes a mechanical separation of magnet from other HDD parts)		
Ga	Acid leaching of In and Ga (H ₂ SO ₄ , H ₂ O ₂) [24]			[25], [26]
Gd				
Ge				[25]
In	LCD, Acid leaching of In and Ga (H ₂ SO ₄ , H ₂ O ₂) [[24]; LCD, crushing, electrolysis and hydrometallurgical process (acid & alkali solution) [27]; LCD, acid leaching [28]	Only production waste, Umicore Belgium [16]		
	LCD panels, In-extraction with sub-critical water [20]			
Ir		PGMs, Umicore [29]		
	PGMs, Umicore [18], [29]			
La	Umicore / Rhodia; NiMH-batteries; REE (Ce, La, Nd, Pr) [20]			
Li	Li-Ion Batt / Crushing, ultrasonic washing, acid leaching & precipitation [4]			[25]
	Recupyl [25] (not confirmed)			
Nb				
Nd		Nd-Fe-B-Magnets (HDD), separation of Nd & Dy, extraction agent MgCl ₂ [22], [23] ([23] includes a mechanical separation of magnet from other HDD parts)		
	Umicore / Rhodia; NiMH-batteries; REE (Ce, La, Nd, Pr) [20]			
Os	Umicore Belgium [18]			
Pd	Acid leaching (HCl, H ₂ SO ₄) [16]	Noranda process, Day's patent [16] Boliden [17]	bacteria, proteins, alfalfa [16]	
	Umicore Belgium [18]			
Pr	Umicore / Rhodia; NiMH-batteries; REE (Ce, La, Nd, Pr) [20]			
Pt	Acid leaching (HCl, H ₂ SO ₄) [16]	Noranda process, Day's patent [16]	bacteria, proteins, alfalfa [16]	
	Umicore Belgium [18]			
Re				
Rh	PGMs, Umicore [18], [29]			
Ru	PGMs, Umicore [18], [29]			
Sb		Umicore Belgium [16]		
Sn	Electrowinning [16]	Umicore Belgium [16]		

grün = Industriemassstab (in Betrieb), gelb = Pilotanlage, orange = Labormassstab

Tabelle 10: Übersicht über Typ und Stand der Implementierung der Rückgewinnungsverfahren für Elektro- und Elektronikaltgeräte und ihre Komponenten (Forts.)

Ta				[25]
Te			Noranda [17]	
Tb		Umicore Belgium [18]		
W		Fluorescent powder from lamps (Eu>Gd>Ce>Tb) [19]		

grün = Industriemassstab (in Betrieb), gelb = Pilotanlage, orange = Labormassstab

Tabelle 11. Kategorisierung der Metalle nach existierenden Rückgewinnungsverfahren für Elektro- und Elektronikaltgeräte und ihre Komponenten (Zusammenfassung von Tabelle 10).

	Prozesse existieren			Kein Prozess gefunden
	...im Industriemassstab	...in Pilotanlage	...im Labormassstab	
Metalle	Au, Co, Ir, Li ¹ , Os, Pd, Pt, Rh, Ru, Sb, Sn, Te	In, Ce ² , La ² , Nd ² , Pr ² ,	Ce ³ , Dy, Ga, Nd, Tb ³	Be, Gd, Ge, Nb, Re, Ta, W

¹ nur durch Firma angekündigt

² Ce, La, Nd, Pr aus NiMH-Batterien

³ Ce und Tb aus Leuchtstofflampen

5 Schlussfolgerungen

5.1 Metallkonzentrationen und -frachten in Leiterplatten

Die in der vorliegenden Studie zusammengetragenen Daten weisen darauf hin, dass ein Grossteil der seltenen Metalle in den Leiterplatten der Geräte vorliegt. Zusätzlich zu den Leiterplatten gibt es einige Komponenten wie der Lesekopf der Festplatte, die fluoreszierende Pulverschicht in Bildröhren, die LCD-Module und LED-Lampen, welche ebenfalls eine bedeutende Konzentration an gewissen seltenen Metallen aufweisen können.

Die in Kapitel 3.1 präsentierten Metallkonzentrationen und -frachten in Leiterplatten bestätigen, dass das Spektrum an Metallen in EEE breit ist und die Gesamtfrachten an einzelnen Metallen in den gesammelten Geräten bedeutend sein können. Für die Metalle Zinn, Antimon, Tantal, Gold und Neodym werden in Leiterplatten von im Jahr 2010 in der Schweiz gesammelten IT-Geräten (EU-WEEE Kategorie 3) Frachten von über 100 kg errechnet. Für die Geräte der Unterhaltungselektronik wurden zwar ebenfalls Metallfrachten in Leiterplatten berechnet, doch sind diese aufgrund der schlechten Datenlage mit sehr grossen Unsicherheiten behaftet.

Die Daten zu Metallkonzentrationen und –frachten in Leiterplatten umreissen bis zu einem gewissen Grad das Potential an Metallen, welches in Elektroaltgeräten steckt. Allerdings gibt es mehrere Punkte, die die Repräsentativität, Vollständigkeit und Aktualität des vorliegenden Datensatzes in Frage stellen:

- Die Stichprobengrösse für die einzelnen Geräte ist für 13 von 17 Geräten kleiner als oder gleich 4 (siehe Anhang 1).
- Die Anzahl untersuchter Metalle variiert von Studie zu Studie stark (minimal: 2; maximal: 19). Einerseits führt dies dazu, dass die einzelnen, durchschnittlichen Konzentrationswerte der Metalle auf einer kleineren Stichprobengrösse beruhen als in Anhang 1 angegeben. Andererseits deutet dies darauf hin, dass in allen Studien einige bis viele der in der vorliegenden Studie untersuchten Metalle nicht berücksichtigt wurden. Letzteres bedeutet, dass der vorliegende Datensatz kein umfassendes Bild der in dieser Studie untersuchten seltenen Metalle in EEE geben kann. Wie viele Messungen pro Element und Gerät zu den Durchschnittswerten beigetragen haben ist in Tabelle 2 ersichtlich.
- In den existierenden Studien wurden für die EU-WEEE Kategorie 3 tendenziell Leiterplatten aus älteren Geräten untersucht (z.B. Desktop Computer, Laptops und Mobiltelefongeräte aus den 1990er Jahren). Für die EU-WEEE Kategorie 4 sind keine Angaben über das Alter der Geräte bekannt. Es ist deshalb nicht sicher, ob die Daten den technologischen Fortschritt und somit auch die heutige Zusammensetzung der Altgeräte in der Schweiz abbilden. Je aktueller die Daten zur Zusammensetzung der Altgeräte, desto besser kann die Strategie zur zukünftigen Rückgewinnung von seltenen Metallen geplant werden.

Trotz einer ausführlichen Literaturrecherche konnten nur wenige Angaben zum durchschnittlichen Gehalt an seltenen Metallen in ausgewählten, typischen (Kleinst-)Komponenten auf Leiterplatten (z.B. Tantalkondensatoren) gefunden werden. Eine Herausforderung ist diesbezüglich, dass sich viele Komponenten in ihrer Bauform, in ihren Eigenschaften und damit auch in ihrer Zusammensetzung stark unterscheiden. Deshalb sind die – spärlich vorhandenen – Herstellerangaben zur Zusammensetzung der einzelnen Komponenten im Hinblick auf deren durchschnittlich zu erwartende Metallkonzentration in Elektroaltgeräten wenig aussagekräftig. Weitere Untersuchungen, welche die durchschnittliche Metallkonzentration in den verschiedenen Komponenten von gesammelten Elektroaltgeräten untersuchen, sind hier unabdingbar.

Hilfreich für die Abschätzung des Rückgewinnungspotentials wären zudem Informationen über die Matrix, in welcher die jeweiligen seltenen Metalle eingebunden sind. Es ist für die Rückgewinnung entscheidend, ob ein Metall rein, als Legierung, als Dotierstoff, etc. vorliegt; mit der vorliegenden Literaturrecherche konnte dies nicht abgedeckt werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die hier zusammengetragenen Daten das Potential an gewissen seltenen Metallen in Elektroaltgeräten in der Schweiz zwar aufzeigen, jedoch nicht genügend repräsentativ und detailliert sind, um Massnahmen zur Rückgewinnung einzelner, seltener Metalle zu erarbeiten.

Um eine fundierte Strategie zur gezielten Rückgewinnung gewisser seltener Metalle ausarbeiten zu können, sind weitere Untersuchungen zu den folgenden Punkten angezeigt:

- Die Zusammensetzung des Elektronikaltgeräte-Warenkorbs in der Schweiz im Hinblick auf eine Abschätzung der Gesamtfrachten (siehe auch nächster Punkt). Dieser ist zwar für EU-WEEE Kategorie 3 grösstenteils bekannt, für die EU-WEEE Kategorie 4 jedoch nicht.
- Die durchschnittliche Metallkonzentration in den Leiterplatten und Geräten der EU-WEEE Kategorien 3 und 4 im Hinblick auf eine Abschätzung der Gesamtfrachten.
- Repräsentative durchschnittliche Konzentrationen seltener Metalle in (Kleinst-)Komponenten (z.B. in Festplatten(magneten) oder in Widerständen, Kondensatoren und Halbleitern auf Leiterplatten, etc.)
- Identifikation weiterer Bauteile in Elektroaltgeräte, welche relativ hohe Konzentrationen an seltenen Metallen aufweisen.

5.2 Rückgewinnungstechnologien

Aus den im Kapitel 4 aufgelisteten Gründen sind die Informationen über Rückgewinnungstechnologien für seltene Metalle teilweise lückenhaft. Dies nicht zuletzt deshalb, weil Angaben zu möglichen Rückgewinnungsverfahren zum Schutze des Know-hows bisher nicht veröffentlicht worden sind bzw. werden.

Die Ergebnisse der Literatur- und Internetrecherche zeigen, dass zwar für Edelmetalle (Au, Ir, Rh, Ru, Os, Pd, Pt) und Antimon (Sb) Rückgewinnungstechnologien im Industriemassstab existieren, daneben aber nur Zinn, Tellur und – mit Vorbehalten – Lithium im Industriemassstab zurückgewonnen werden. Die 15 anderen untersuchten seltenen Metalle können gemäss den gefundenen Informationen heute noch nicht im Industriemassstab aus End-of-Life-Produkten zurückgewonnen bzw. raffiniert werden.

Die Frage, ob entsprechende Technologien entwickelt werden, entscheidet sich nicht nur anhand technologischer Herausforderungen, sondern oft auch aufgrund der Wirtschaftlichkeit einer Metallrückgewinnung. So sind beispielsweise im Bereich der Rückgewinnung von Seltenen Erden einige Fortschritte gemacht worden, die unter anderem auch durch die jüngsten Preisanstiege angetrieben wurden. Dies wird auch durch die Literaturrecherche unterstrichen: mit Ausnahme von Gadolinium sind für alle Seltenen Erden technologische Entwicklungen in einer Pilotanlage oder zumindest im Labormassstab am Laufen.

Für Beryllium, Gadolinium, Germanium, Niob, Rhenium, Tantal und Wolfram wurden keine Rückgewinnungstechnologien gefunden, weder im industriellen Betrieb noch in der Entwicklung.

Um eine wirklich vollständige Übersicht über die derzeit existierenden Rückgewinnungstechnologien zu erhalten, bedarf es einer umfassenderen Recherche als die vorliegende. Entsprechende Arbeiten, welche zumindest eine teilweise Übersicht bieten, wurden zwar gemacht ([25], [16], [30]), sind aber normalerweise aufgrund der raschen technologischen Entwicklung innerhalb kurzer Zeit nicht mehr auf dem neuesten Stand.

6 Literatur

- [1] P. Wäger, R. Widmer, and A. Stamp, "Scarce technology metals – applications, criticalities and intervention options," Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research Empa, St.Gallen, Switzerland, 2011.
- [2] M. Oguchi, S. Murakami, H. Sakanakura, A. Kida, and T. Kameya, "A preliminary categorization of end-of-life electrical and electronic equipment as secondary metal resources," *Waste Management*, vol. 31, no. 9-10, pp. 2150 - 2160, 2011.
- [3] Swico, "Tätigkeitsbericht 2010," Swico Recycling, Zürich, Switzerland, 2011.
- [4] J. Li, P. Shi, Z. Wang, Y. Chen, and C.-C. Chang, "A combined recovery process of metals in spent lithium-ion batteries," *Chemosphere*, vol. 77, no. 8, pp. 1132-1136, Nov. 2009.
- [5] UNEP and Basel Convention, "Mobile Phone Partnership Initiative (MPPI) - Project 3.1: Guideline on Material Recovery and Recycling of End-of-Life Mobile Phones." UNEP, Basel Convention, 2009.
- [6] C. J. Rydh and B. Svärd, "Impact on global metal flows arising from the use of portable rechargeable batteries," *Science of The Total Environment*, vol. 302, no. 1-3, pp. 167-184, Jan. 2003.
- [7] M. L. Socolof, J. G. Overly, L. E. Kincaid, and J. R. Geibig, "Desktop Computer Displays: A Life Cycle Assessment." University of Tennessee for Clean Products and Clean Technologies, 2001.
- [8] M. Steinfeldt, A. Gleich, U. Petschow, R. Haum, T. Chudoba, and S. Haubold, "Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte," Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Berlin, Germany, 2004.
- [9] G. Angerer and L. Erdmann, "Rohstoffe für Zukunftstechnologien," Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe, Germany, 2009.
- [10] M. L. Socolof, J. G. Overly, and J. R. Geibig, "Environmental life-cycle impacts of CRT and LCD desktop computer displays," *Journal of Cleaner Production*, vol. 13, no. 13-14, pp. 1281-1294, November.
- [11] R. Martin, "Verwendung von Flüssigkristall- Displays sowie Verfahren zu deren Verwertung." 2009.
- [12] W. Becker and B. Simon-Hettich, "Toxicological and Ecotoxicological Investigations of Crystals and Disposal of LCDs." 2003.
- [13] G. Bogdanski, "Entwicklung und Analyse von Handlungsoptionen zur Umsetzung von Recyclingkonzepten für Flüssigkristallbildschirme (LCD) für ein Unternehmen der Elektro(nik)altgeräterecyclingbranche." 2009.
- [14] L. V. Resende and C. A. Morais, "Study of the recovery of rare earth elements from computer monitor scraps – Leaching experiments," *Minerals Engineering*, vol. 23, no. 3, pp. 277-280, Feb. 2010.

- [15] ZVEI, "Umbrella Specification. Passive Components: Ceramic Capacitors." Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. (ZVEI), 2003.
- [16] J. Cui and L. Zhang, "Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 158, pp. 228-256, 2008.
- [17] T. Letcher and D. Vallero, *Waste: A Handbook for Management*. Academic Press, 2011.
- [18] Umicore, "Exploring Umicore Precious Metals Refining." Umicore Precious Metals Refining, 2008.
- [19] W. Palitzsch, "Waste recovery strategies from Loser Chemie for metals with strategic importance," Bremen, Germany, 18-May-2011.
- [20] Umicore and Rhodia, "Umicore and Rhodia develop unique rare earth recycling process for rechargeable batteries." Umicore and Rhodia, 2011.
- [21] Umicore, "Umicore Battery Recycling Process & Flow Sheet." Umicore Battery Recycling, 2011.
- [22] S. Shirayama and T. Okabe, "Recovery of Nd and Dy from Rare Earth Magnet Scrap," Tokyo, Japan, 2009.
- [23] Hitachi, "Hitachi Develops Recycling Technologies for Rare Earth Metals." Hitachi, 2010.
- [24] C. Ferron, "Treatment of indium gallium alloys and recovery of indium and gallium," U.S. Patent CA 2721518.
- [25] M. Buchert, D. Schüler, and D. Bleher, "Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential," Unep, Ökoinstitut, Paris, France, 2009.
- [26] M. Catinat, "Critical raw materials for the EU - Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials," European Commission, 2010.
- [27] Den Takeyoshi, K. Hatakeyama, Y. Yamano, W. Seiki, and K. Shinohara, "Method of recycling waste and its recycling apparatus," U.S. Patent JP2006075741.
- [28] J. C. Park and H. W. Lim, "Method for withdrawing indium," U.S. Patent KR100725282.
- [29] C. Hagelueken, "Recycling of Electronic Scrap at Umicore's Integrated Metals Smelter and Refinery," *World of Metallurgy - Erzmetall*, vol. 59, no. 3, 2006.
- [30] UNEP, "Recycling Rates of Metals: A Status Report - A Report of the Working Group on Global Metal Flows to the International Resource Panel," UNEP, 2011.
- [31] J. Huisman, F. Magalini, R. Kuehr, C. Maurer, S. Ogilvie, J. Poll, C. Delgado, E. Artim, J. Szlezak, and A. Stevels, "2008 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), Final Report," United Nations University, 2008.
- [32] JOGMEC, "Working Paper on the Development of Efficient Recovery Systems of Less Common Metals (in Japanese)." JOGMEC (Japan Oil, Gas and Metals National Corporation), 2008.
- [33] A. Kida, T. Shirahase, and M. Kawaguchi, "Metal contents including precious metals in waste personal computers.," *Material Cycles and Waste Management Research (in Japanese)*, vol. 20, no. 2, pp. 59-69, 2009.
- [34] M. Oguchi, "Study on analysis of lifespan distribution and product-based material flow of electrical and electronic products," PhD thesis, Yokohama National University (in Japanese with English figures and tables), Japan, 2007.

- [35] Tohoku Bureau of ETI, "Working Paper on the Possibility of Network Development for Recovery of Precious and Other Less Common Metals from Used Digital Appliances (in Japanese)." Tohoku Bureau of ETI (Economy, Trade and Industry), 2007.
- [36] M. Kawaguchi and A. Kida, "Metal concentration in circuit boards contained in notebook PCs, printers and televisions (in Japanese)," presented at the Proceedings of the 20th Annual Conference of Japan Society of Material Cycles and Waste Management, Nagoya, Japan, 2009, pp. 175-176.
- [37] MoE and METI, "Report of the Study Group for Less Common Metal Recovery from Used Small Electric Appliances 2009 (in Japanese)." MoE and METI (Ministry of Environment and Ministry of Economy, Trade and Industry).
- [38] T. Tasaki, M. Oguchi, T. Kameya, and K. Urano, "Screening of Metals in Waste Electrical and Electronic Equipment Using Simple Assessment Methods," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 11, no. 4, pp. 64-84, 2007.
- [39] P. Chancerel, C. E. M. Meskers, C. Hagelüken, and V. S. Rotter, "Assessment of Precious Metal Flows During Preprocessing of Waste Electrical and Electronic Equipment," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 13, no. 5, pp. 791-810, Oct. 2009.
- [40] DTSC, "E-waste Report - Determination of regulated elements in seven types of discarded consumer electronic products." California Department of Toxic Substances Control, 2004.
- [41] OECD, "Materials Case Study 1: Critical Metals and Mobile Devices - Annexes," OECD, OECD Global Forum on Environment - Focusing on Sustainable Materials Management, Mechelen, Belgium, 2010.
- [42] DTSC, "SB20 Report - Determination of regulated elements in discarded laptop computers, LCD monitors, Plasma TVs and LCD TVs." California Department of Toxic Substances Control, 2004.
- [43] M. Gauch, "Battery Study, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology (Empa)," 2011.
- [44] T. Matsuto, C. H. Jung, and N. Tanaka, "Material and heavy metal balance in a recycling facility for home electrical appliances," *Waste Management*, vol. 24, p. 425-436, 2004.
- [45] F. Méar, P. Yot, M. Cambon, and M. Ribes, "The characterization of waste cathode-ray tube glass," *Waste Management*, vol. 26, no. 12, pp. 1468-1476, 2006.
- [46] DTSC, "Summary of Analytical Test Results for Portable DVD Players." California Department of Toxic Substances Control, 2004.

Anhang

Anhang 1

Anhang 1: Hintergrunddaten für die Berechnungen der Metallkonzentrationen pro elektronischem Gerät: Anzahl Datensätze für die Berechnung der durchschnittlichen Metallkonzentrationen in den Leiterplatten, Anteil der Leiterplatten am Gerätegewicht, Gerätegewicht sowie total gesammelte Menge in der Schweiz im Jahr 2010.

	# sam- ples ¹	% PWB ²	ø weight [kg]	Total weight CH 2010 ³	source % PWB / øweight
Desktop PC	9	8.3%	12.26	4'939	[3] / [3]
Notebook	3	14.6%	3.55	890	[3] / [3]
Telephone	1	1.9%	2.25	2'015	[3] / [3]
Printer	3	1.7%	10.19	3'894	[3] / [3]
Mobile phone	20	19.6%	0.13	51	[3] / [3]
Facsimile	1	12.2%	4	nda	[2] / Estimate
CRT TV	8	1.2%	29.41	15'500	[3] / [3]
PDP TV	2	7.8%	20	nda	[2] / Estimate
LCD TV	3	12.2%	27.61	1'057	[3] / [3]
VCR	2	15.8%	5	nda	[2] / [31]
DVD player	4	14.0%	5	nda	[2] / [31]
Stereo system	1	11.1%	10	nda	[2] / [31]
Radio cassette recorder	2	10.4%	2	nda	[2] / [31]
Digital camera	10	20.2%	0.3	102	[2] / Estimate (Sony device)
Camcorder	8	17.7%	0.4		[2] / Estimate (Sony device)
Portable CD player	2	10.1%	0.2		[2] / Estimate (Sony device)
Portable MD player	2	15.7%	0.1		[2] / Estimate (Sony device)
Photo/video	-	2.0%	0.49	102	[3] / [3]
Consumer equipment, mix	0	1.9%	4.79	10'846	[3] / [3]

¹ Number of samples for the calculation of the average metal concentrations in PWBs in chapter 3.1

² PWB share in total device weight

³ Source: [3]

Anhang 2

Anhang 2: Metallgehalte aller Leiterplatten in je einem elektronischen Gerät [mg] der WEEE-Kategorien 3 und 4.

mg (in PWBs of 1 device)	Au	Be	Ce	Co	Dy	Ga	Gd	Ge	In	Ir	La	Li	Nb	Nd	Os	Pd	Pr	Pt	Re	Rh	Ru	Sb	Sn	Ta	Tb	Te	W
Desktop PC	233.9	7.5	20.4	48.5	-	10.7	-	-	1.0	-	112.2	145.6	19.4	102.0	-	126.5	-	2.7	-	3.1	3.1	2061	19512	6.6	-	7.7	336.7
Laptop	226.3	16.6	15.6	41.5	-	4.9	-	7.0	1.0	0.5	54.4	4.7	18.7	251.5	-	86.3	-	0.9	-	1.2	3.6	662	8124	1002.9	-	0.5	2.2
Telephone	4.4	-	-	4.4	-	-	-	-	4.4	-	8.7	8.7	4.4	13.1	-	4.4	-	-	-	-	-	61	1481	-	-	-	-
Printer	8.3	0.2	-	5.2	-	0.6	-	0.4	0.2	-	0.9	12.3	0.2	7.7	-	3.4	-	0.2	-	0.2	0.2	71	2432	0.2	-	0.2	1.9
Mobile phone	36.5	1.0	20.8	13.7	1.4	3.0	2.5	1.8	1.7	-	21.2	3.1	0.6	68.1	-	9.5	6.6	0.3	-	13.8	0.2	19	869	71.4	1.8	2.5	59.6
Fax	17.1	-	-	205.0	-	-	-	-	-	-	-	17.6	-	-	-	53.7	-	-	-	-	-	327	3611	-	-	-	35.1
CRT TV	6.3	0.4	-	9.7	-	0.4	-	0.4	0.4	0.4	0.6	0.9	2.6	0.9	-	5.9	-	-	-	-	0.4	971	6175	0.4	-	0.4	0.4
PDPTV	312.0	-	-	-	-	-	156.0	-	156.0	-	156.0	-	-	156.0	-	156.0	-	-	-	-	-	1248	22854	156.0	-	-	-
LCD TV	430.2	-	-	-	-	-	-	-	337.0	-	-	-	-	-	-	149.4	-	0.0	-	-	-	6065	97719	-	-	-	-
Video cassette recorder	18.2	0.8	7.9	37.4	-	7.1	-	-	-	-	-	2.6	-	-	-	39.5	-	4.7	-	4.0	4.7	1027	14062	18.2	-	0.8	15.0
DVD player	92.9	0.7	7.0	42.0	-	6.3	-	-	70.0	-	-	-	-	70.0	-	26.4	-	3.2	-	3.5	1.4	840	15633	53.6	-	0.7	4.6
Stereo system	6.9	-	-	3.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	522	24420	-	-	-	94.4
Radio cassette recorder	5.4	0.2	2.1	1.9	-	2.5	-	-	-	-	-	1.7	-	-	-	4.6	-	0.4	-	1.0	0.2	631	4888	1.9	-	0.2	4.9
Digital camera	48.1	4.1	4.6	10.0	3.4	3.1	-	8.5	7.3	-	8.4	3.2	11.6	20.4	-	11.5	-	0.1	-	14.4	0.6	109	2382	493.2	1.1	3.4	42.0
Camcorder	37.4	0.1	15.8	10.7	4.4	6.3	7.1	14.2	8.5	-	31.5	-	27.3	57.8	-	60.9	7.1	0.7	-	0.4	0.9	134	2735	614.8	2.1	15.3	41.0
Portable CD	7.5	0.0	2.0	1.6	2.0	-	-	2.8	2.0	-	2.0	-	5.5	4.0	-	1.1	-	-	-	-	-	28	1010	13.4	-	-	0.4
Portable MD	14.7	0.9	0.3	2.4	1.6	-	-	1.9	1.6	-	1.6	0.3	8.6	1.6	-	5.1	-	-	-	-	-	18	754	150.7	-	-	1.6

in mg	>10000	> 5000	>1000	>500	>100	>50	>10	<10
-------	--------	--------	-------	------	------	-----	-----	-----

Anhang 3

Anhang 3: Metallkonzentrationen in den Leiterplatten verschiedener elektronischer Geräte.

	Metal content of printed wiring board (mg/kg PWB)																									Model	Description	source		
	Au	Be	Ce	Co	Dy	Ga	Gd	Ge	In	Ir	La	Li	Nb	Nd	Os	Pd	Pr	Pt	Re	Rh	Ru	Sb	Sn	Ta	Tb				Te	W
Desktop PC	220	1	20	70	-	11	-	-	-	-	-	-	-	-	110	-	2	-	5	5	3600	35000	9.0	-	1	10	na		[32]	
	120	1	-	25	-	10	-	-	1	110	9	19	100	160	-	5	-	1	1	58	24000	4.0	-	14	-	na	ø 8 PWBs	[33]		
	270	ND	-	ND	-	ND	-	ND	ND	-	52	-	-	ND	-	ND	-	ND	-	2500	32000	ND	-	ND	ND	1985		[34]		
	270	ND	-	ND	-	ND	-	ND	ND	-	150	-	-	ND	-	ND	-	ND	-	1700	23000	ND	-	ND	ND	1989		[34]		
	450	ND	-	ND	-	ND	-	ND	ND	-	360	-	-	150	-	ND	-	ND	-	1500	11000	ND	-	ND	650	1994		[34]		
	300	ND	-	ND	-	ND	-	ND	ND	-	ND	-	-	ND	-	ND	-	ND	-	2200	14000	ND	-	ND	ND	1985		[34]		
	130	ND	-	ND	-	ND	-	ND	ND	-	ND	-	-	ND	-	ND	-	ND	-	2100	7900	ND	-	ND	ND	1989		[34]		
	140	ND	-	ND	-	ND	-	ND	ND	-	ND	-	-	ND	-	ND	-	ND	-	2500	6100	ND	-	ND	ND	1994		[34]		
Laptop	940	55	30	120	-	10	-	-	-	-	-	-	-	360	-	3	-	5	19	2500	22000	5800	-	1	11	na		[32]		
	310	9	-	40	-	10	-	12	1	100	8	34	450	48	-	1	-	1	1	53	11000	1	-	1	1	na	ø 5 PWBs	[33]		
	59	-	-	-	-	9	-	15	3	1	110	10	38	520	-	91	-	1	-	1	1	-	14000	1	-	1	1	1999		[33]
Telephone	100	-	-	100	-	-	-	-	100	-	200	200	100	300	-	100	-	-	-	-	-	1400	34000	-	-	-	-	na		[35]
Printer	14	ND	-	66	-	ND	-	-	ND	-	200	-	-	24	-	-	-	-	-	930	21000	ND	-	-	30	na		[2]		
	63	1	-	11	-	3.1	-	2.4	1	4.9	3.6	1.1	43	17	-	1	-	1	1	130	10000	1	-	1	1	na	Inkjet-type	[36]		
	63	1	-	11	-	3.1	-	2.4	1	4.9	3.6	1.1	43	17	-	1	-	1	1	130	10000	1	-	1	1	2001	Epson PM950C	[36]		
Mobile phone	1600	100	-	3300	100	100	100	-	100	300	100	-	900	200	200	-	-	-	-	500	37000	-	-	-	1600	na		[35]		
	1800	18	60	650	-	110	-	20	10	-	-	-	-	730	-	12	-	-	10	1900	40000	5700	-	-	1600	1997		[32]		
	1400	120	10	1100	-	120	-	20	-	-	-	-	-	100	-	3	-	-	4	760	28000	670	-	-	3000	2003		[32]		
	1200	6	-	210	-	140	-	20	40	-	-	-	-	110	-	89	-	-	11	400	30000	650	-	-	4500	2006		[32]		
	1600	62	-	990	9	180	-	-	0	1500	140	11	2600	340	310	-	-	-	-	480	33000	1600	-	-	9500	na		[37]		
	1300	52	-	140	45	85	-	-	-	1200	-	-	5000	600	-	6	-	-	-	440	9000	5900	-	-	1900	<2000		[37]		

	Metal content of printed wiring board (mg/kg PWB)																								Model	Description	source		
	Au	Be	Ce	Co	Dy	Ga	Gd	Ge	In	Ir	La	Li	Nb	Nd	Os	Pd	Pr	Pt	Re	Rh	Ru	Sb	Sn	Ta				Tb	Te
Facsimile	1500	46	-	160	77	140	-	-	-	1200	-	-	3600		270	-	-	-	-	-	240	15000	2600	-	-	1800	>2000	Without camera	[37]
	1700	2	-	140	71	87	-	-	-	580	-	-	2200		170	-	-	-	-	-	180	17000	2500	-	-	1100	>2000	With camera	[37]
	1900	-	-	110	-	-	-	-	-	860	-	-	1700		210	270	-	-	-	-	1100	19000	140	-	-	2100	na		[37]
	1100	8	1900	630	50	170	-	-	-	1100	-	-	4100		890	-	8	-	-	-	900	37000	5800	-	-	2500	<2000	Without camera	[37]
	1400	36	2200	280	67	150	-	-	-	1300	-	-	4500		860	-	10	-	-	-	1400	44000	6500	-	-	1900	<2000	Without camera	[37]
	1300	21	2000	260	110	170	-	-	-	1200	-	-	4300		440	-	8	-	-	-	770	35000	5700	-	-	2100	>2000	Without camera	[37]
	1700	23	1400	190	92	180	-	-	-	1200	-	-	2900		640	-	10	-	-	-	900	40000	4800	-	-	1800	>2000	Without camera	[37]
	1600	21	590	120	52	140	-	-	-	600	-	-	1300		300	-	12	-	-	-	460	35000	2300	-	-	1600	>2000	With camera	[37]
	1600	9	790	310	69	140	-	-	-	580	-	-	1600		490	-	9	-	-	-	1400	37000	2700	-	-	1800	>2000	With camera	[37]
	1400	-	12	360	14	22	-	110	100	210	-	44	1400		100	-	2	-	-	-	480	57000	15	54	-	1000	na	With camera	[37]
	1200	-	20	780	11	31	-	190	110	300	-	18	3100		340	-	3	-	-	-	1000	62000	8.0	85	-	2200	na	Without camera	[37]
	1700	-	-	410	-	-	-	-	-	-	-	-	-		240	-	-	-	-	-	890	26000	2800	-	100	-	na		[37]
650	20	7	100	11	49	-	-	95	320	-	-	860		120	-	-	-	540	11	230	47000	26	-	-	110	na		[37]	
CRT TV	35	ND	-	420	-	ND	-	-	ND	-	-	36	-	-	-	110	-	-	-	-	670	7400	ND	-	-	72	na		[2]
	4.6	-	-	36	-	-	-	-	-	-	3.4	-	-	-	20	-	-	-	-	-	3200	20000	-	-	-	-	na		[38]
	ND	ND	-	ND	-	ND	-	ND	ND	-	ND	-	-	-	ND	-	ND	-	ND	-	3300	9900	ND	-	ND	ND	1986	14-inch model	[34]
	ND	ND	-	ND	-	ND	-	ND	ND	-	ND	-	-	-	ND	-	ND	-	ND	-	2000	17000	ND	-	ND	ND	1995-97	14-inch model	[34]
	ND	ND	-	ND	-	ND	-	ND	ND	-	ND	-	-	-	ND	-	ND	-	ND	-	4400	22000	ND	-	ND	ND	1991	29-inch model	[34]
	ND	ND	-	ND	-	ND	-	ND	ND	-	ND	-	-	-	ND	-	ND	-	ND	-	2500	18000	ND	-	ND	ND	1996	29-inch model	[34]
	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		[39]
	4.6	-	-	36	-	-	-	-	-	-	-	3.4	-	-	-	20	-	-	-	-	-	3200	20000	-	-	-	-		[38]
	1	1	-	8.4	-	1	-	1	1	1	1.7	1	7.1	2.4	-	1	-	-	-	-	1	250	13000	1	-	1	1		[36]
	100	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	300	8300	100	-	-	-	na	
300	-	-	-	-	-	-	100	-	100	100	-	-	100	100	-	-	-	-	-	-	1300	21000	-	-	-	-	na		[35]

	Metal content of printed wiring board (mg/kg PWB)																									Model	Description	source	
	Au	Be	Ce	Co	Dy	Ga	Gd	Ge	In	Ir	La	Li	Nb	Nd	Os	Pd	Pr	Pt	Re	Rh	Ru	Sb	Sn	Ta	Tb				Te
LCD TV	200	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	1800	29000	-	-	-	-	na		[35]
	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	[39]
VCR	23	1	10	90	-	9.0	-	-	-	-	-	-	-	50	-	6	-	5	6	1200	27000	23	-	1	8	na		[32]	
	ND	ND	-	5	-	ND	-	-	ND	-	3	-	-	ND	-	-	-	-	-	1400	8600	ND	-	-	30	na		[2]	
DVD player	150	1	10	110	-	10	-	-	-	-	-	-	-	20	-	2	-	5	3	1200	22000	150	-	1	9	na	HDD/DVD rec.	[32]	
	81	1	10	10	-	8.0	-	-	-	-	-	-	-	10	-	7	-	5	1	1500	24000	3.0	-	1	4	na		[32]	
Stereo system	200	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	100	100	-	-	-	-	-	900	21000	-	-	-	-	na		[35]	
	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	[39]	
Radio cassette recorder	6.2	ND	-	3	-	ND	-	-	ND	-	-	trace	-	-	-	-	-	-	-	470	22000	ND	-	-	85	na		[2]	
Digital camera	35	1	10	10	-	12	-	-	-	-	-	-	-	10	-	2	-	5	1	5300	37000	9.0	-	1	5	na		[32]	
	17	ND	-	8	-	ND	-	-	ND	-	8	-	-	34	-	-	-	-	-	770	10000	ND	-	-	42	na		[2]	
Camcorder	300	-	-	100	-	-	-	-	100	200	-	100	200	200	-	-	-	-	-	2000	30000	300	-	-	-	na		[35]	
	1400	100	10	130	-	13	-	-	-	-	-	-	-	60	-	1	-	5	6	1400	29000	7000	-	1	290	na		[32]	
	1000	-	-	150	90	-	-	-	-	210	-	-	490	280	-	-	-	-	-	430	12000	11000	-	-	1200	na		[37]	
	1100	-	-	84	-	-	-	-	-	52	52	390	230	200	-	-	-	-	-	2400	47000	7000	-	-	490	na		[37]	
	640	13	180	220	69	-	-	-	-	220	-	-	380	300	-	-	-	-	-	1900	47000	23000	-	-	760	na		[37]	
	860	20	170	130	94	15	-	-	-	160	-	-	360	170	-	-	-	-	-	1900	48000	13000	-	-	690	na		[37]	
	690	200	-	300	-	200	-	-	-	100	-	-	500	130	-	-	-	-	-	1500	22000	8800	-	-	1800	na		[37]	
	690	-	10	180	16	21	-	140	110	91	-	85	320	260	-	1	-	-	-	1800	65000	120	18	-	300	na		[37]	
	970	-	-	240	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	240	-	-	-	-	-	3800	27000	11000	-	110	-	na		[37]
	290	9	12	110	12	10	-	-	150	79	-	-	210	55	-	-	-	470	15	870	66000	170	-	-	21	na		[37]	

	Metal content of printed wiring board (mg/kg PWB)																									Model	Description	source		
	Au	Be	Ce	Co	Dy	Ga	Gd	Ge	In	Ir	La	Li	Nb	Nd	Os	Pd	Pr	Pt	Re	Rh	Ru	Sb	Sn	Ta	Tb				Te	W
Portable CD player	700	-	100	200	100	-	100	-	100	400	-	700	500		1500	100	-	-	-	-	1700	38000	1800	-	-	200	na		[35]	
	460	1	140	10	-	15	-	-	-	-	-	-	-		600	-	6	-	5	13	2200	40000	2600	-	1	160	na		[32]	
	590	-	77	180	25	-	-	-	-	-	570	-	-	1000		1200	-	10	-	-	-	830	18000	12000	-	-	1200	na		[37]
	290	-	690	120	-	-	-	-	-	-	900	-	-	1400		1200	-	30	-	-	-	3400	51000	15000	-	-	1200	na		[37]
	590	-	320	150	61	-	-	-	-	-	380	-	-	600		1200	-	6	-	-	-	2400	38000	19000	-	-	670	na		[37]
	380	-	-	200	100	200	-	-	-	-	300	-	-	400		370	-	3	-	-	-	1300	25000	4000	-	-	500	na		[37]
	310	-	9	220	22	52	-	200	140		120	-	72	1000		740	-	6	-	-	-	2500	82000	64	30	-	120	na		[37]
	910	-	-	130	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		70	-	-	-	-	-	780	17000	15000	-	430	-	na		[37]
Portable MD player	500	-	-	100	100	-	-	-	100	100	-	-	200		100	-	-	-	-	-	1600	64000	400	-	-	-	na		[35]	
	240	0	100	60	-	-	-	140	-	-	-	-	270	-		10	-	-	-	-	1200	36000	930	-	-	20	na		[37]	
Refrigerator	900	-	-	200	100	-	-	-	100	100	-	-	100		100	-	-	-	-	-	700	53000	200	-	-	200	na		[35]	
	970	60	20	100	-	-	-	120	-	-	20	550	-		550	-	-	-	-	-	1600	43000	19000	-	-	10	na		[37]	
Washing machine	44	ND	-	120	-	ND	-	ND	ND	-	ND	-	-		ND	-	ND	-	ND	-	2700	83000	ND	-	ND	56	na		[2]	
Air conditioner	17	ND	-	16	-	ND	-	ND	ND	-	18	-	-		ND	-	ND	-	ND	-	150	9100	ND	-	ND	26	na		[2]	
Video game	15	ND	-	29	-	ND	-	ND	ND	-	3	-	-		ND	-	ND	-	ND	-	310	19000	ND	-	ND	58	na		[2]	
	200	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-		100	-	-	-	-	-	2300	29000	-	-	-	-	na		[35]	
	200	0	300	50	-	-	-	-	-	-	10	150	-		10	-	-	-	-	-	4400	27000	-	-	-	-	na		[37]	
	230	-	10	-	-	11	-	-	-	-	-	-	-		10	-	2	-	-	1	2600	21000	83	-	-	110	na		[32]	
	330	-		200	-	200	-	-	-	200	-	-	200		44	-	-	-	-	-	2100	21000	1700	-	-	200	na		[37]	
	230	-	14	100	15	20	-	220	63		400	-	8	800		43	-	-	-	-	-	5000	43000	17	12	-	40	na		[37]
	430	-	-	48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		50	-	-	-	-	-	3200	24000	1400	-	40	-	na		[37]

Anhang 4

