Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.

Bliersheimer Straße 60

47229 Duisburg



(Luftbild mit Büro- und Laborgebäude sowie den beiden Technikumhallen in Duisburg)

Handbuch: Verwertung von LCD-Geräten

Angefertigt von Dipl.-Ing. F. Blauth

Staatl. gepr. Techniker H.J. Prause Staatl. gepr. Technikerin B. Schiemann

Dipl.-Ing. J. Schiemann Dipl.-Ing. E. Walter

Bekannt gegebene Messstelle für Messungen/Untersuchungen nach §§ 26, 28 BImSchG Zertifizierter Entsorgungsfachbetrieb Zugelassene Prüfstelle im Sinne TA Luft 5.4.8.10.3, 5.4.8.11.3

Inhaltsverzeichnis

	leitungsterzerlegung	
2.1.	Kriterien der Musterzerlegung	6
2.2.	Demontagestrategien für die jeweiligen Gerätetypen	7
3. Ark	peitssicherheit	14
3.1.	Gefahrpotenzial	14
3.2.	Maßnahmen zur Einhaltung des Arbeitsschutzes	15
4. Fra	ktionen und Mengenströme	17
4.1.	Mengenströme der unterschiedlichen Gerätetypen	18
5. Ch	arakterisierung und Recycling der erzeugten Fraktionen	21
5.1.	Flüssigkristallanzeigen (LCD)	21
5.1.1. 5.1.2. 5.1.3. 5.1.4.	HerstellungsverfahrenRecycling der Displayfraktion	23 23
5.2.	Eisenmetalle	
5.2.1. 5.2.2.	3	
5.3.	Edelmetalle	27
5.3.1. 5.3.2.	3	
5.4.	Nicht-Eisen-Metalle	28
5.4.1. 5.4.2. 5.4.3.	Aufbereitung von Kupferschrott	29
5.5.	Kunststoffe	29
5.6.	Platinen	30
5.6.1. 5.6.2.	3	
5.7.	Elektrolytkondensatoren	31
5.8.	Kabel und Trafos	32
	chtliche Grundlagen und betriebliche Umsetzungeraturverzeichnis	

Tabellenverzeichnis	
Tabelle 1: Europäische Schrottsortenliste	26
Tabelle 2: durchschnittliche Metallpreise März 2011	28
Abbildungsverzeichnis	
Abbildung 1: beschädigtes LCD-Gerät mit zerbrochener Hintergrundbeleuchtun	ıq6
Abbildung 2: Arbeitsanweisung Demontage von Computermonitoren	•
Abbildung 3: Arbeitsanweisung Demontage von Fernsehgeräten	
Abbildung 4:Arbeitsanweisung Demontage von Laptops	12
Abbildung 5: Arbeitsanweisung Demontage von TFT-Panels	13
Abbildung 6: Sicherheitswerkbank	16
Abbildung 7: Hauptfraktionen der LCD-Demontage	
Abbildung 8: Exemplarische Fraktionsverteilung LCD-Monitor	18
Abbildung 9: Fraktionsmenge nach Demontage	18
Abbildung 10: Exemplarische Fraktionsverteilung LCD-Fernsehgerät	
Abbildung 11: Fraktionen nach LCD-Fernsehdemontage	19
Abbildung 12: Exemplarische Fraktionsverteilung Laptop	
Abbildung 13: Fraktionen der Laptop-Demontage	
Abbildung 14: Fraktionen der LCD-Geräte-Demontage	
Abbildung 15: Displayaufbau [5]	
Abbildung 16: Schema der produktspezifischen Aufarbeitung von Osram	25
Abbildung 17: aktuelle Stahlschrottpreise Februar 2010 bis Februar 2011 in	
Deutschland in €/t [12]	25

Copyright ©:

Institut für Energie- und Umwelttechnik IUTA Bliersheimer Str. 58 – 60 47229 Duisburg

Der vorliegende Bericht ist gemäß den "Grundsätzen für die Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis an der Universität Duisburg-Essen", Amtliche Mitteilung Jahrgang 2 Duisburg/Essen 10.08.2004 Seite 187 ff. Nr. 19 erstellt worden und dient ausschließlich Informationszwecken.

Der Nachdruck und die Vervielfältigung, einschliesslich der Speicherung und Nutzung auf optischen und elektronischen Datenträgern ist nur in Abstimmung mit dem Herausgeber des Berichtes erlaubt.

Die teilweise Verwertung von Informationen und das zitieren einzelner Passage des Berichtes ist nur mit dem entsprechenden Quellenhinweis erlaubt.

IUTA übernimmt keinerlei Haftung oder Garantie für Druckfehler oder Unvollständigkeiten in diesem Bericht. Aus denen in diesem Bericht enthaltenen Informationen ergibt sich keine weiterführende Haftung.

1. Einleitung

Der Markt der Elektro- und Elektronikgeräte unterliegt einem ständigen Wandel. Die Entwicklungen auf dem Markt der Unterhaltungselektronik, insbesondere im Bereich der Bildschirmgeräte führten dazu, dass inzwischen im Bereich der Computermonitor- und Fernsehgeräte die CRT- (cathode ray tube) fast vollständig durch die LCD-Technologie (liquid crystal display) verdrängt worden ist.

Im Jahr 2009 wurden alleine in Deutschland 7 Mio Fernsehgeräte mit der LCD-Technologie verkauft [1]. Zusätzlich verfügen weitere Geräte wie z.B. PC-Bildschirme, Laptops, Notebooks, Handys über LC-Displays. Die Zahl der auf dem Markt befindlichen Geräte mit LCD-Baugruppen ist somit noch deutlich höher.

Mittlerweile treten bereits die ersten LCD-Geräte in den zur Entsorgung rücklaufenden Mengenströmen auf. Für das Jahr 2015 wird mit 1,2 Millionen LCD Computerbildschirmen und Fernsehgeräten zur Entsorgung gerechnet [2].

Die zur Entsorgung anstehenden LCD-Geräte fallen unter die Gesetzgebung für die Verwertung von Elektro- und Elektronikaltgeräten.

Am 24. März 2005 ist in Deutschland das Elektro- und Elektronikgerätegesetz (Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten - ElektroG) in Kraft gesetzt worden, mit dem die europäische Richtlinie 2002/96/EG über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEEE) in nationales Recht umgesetzt wurde.

Darin wird unter der Zielsetzung der Abfallvermeidung die Produktverantwortung der Hersteller neu definiert. Die Produktverantwortung beginnt explizit bereits bei der Produktgestaltung und Konzipierung, insbesondere bei der Materialauswahl. Auch für die Vorgehensweise nach Ablauf der Nutzungszeit der Geräte sind entsprechende Vorgaben bindend. Es sollen möglichst weitgehend qualitativ hochwertige Verwertungsschritte durchgeführt werden. Einzelne Produktgruppen sind mit zu realisierenden Rücknahme- und Verwertungsquoten versehen. Stoffliche und thermische Verwertungstechnologien werden unterschieden und mit jeweiligen Quoten bewertet. Somit sind folgende relevante Vorgaben von den Herstellern und Importeuren zu erfüllen:

- Die richtlinienkonforme Entsorgung der Altgeräte ist sicher zu stellen.
- Es sind Mindestmengen für die gesammelten Altgeräte zu erreichen.
- Je nach Gerätekategorie müssen zwischen 70 % und 80 % der eingesammelten Altgeräte verwertet werden.
- Zwischen 50 % und 70 % der eingesammelten Altgeräte sind dem stofflichen Recycling zuzuführen.

Es ergibt sich somit ein gesetzlicher Zwang zur Verwertung dieser Geräte.

Darüber hinaus beinhalten LCD-Geräte viele werthaltige Stoffe. Unter anderem ist in ihnen das seltene Element Indium enthalten. Indium gehört zu denen für Deutsch-

land strategisch sehr wichtigen Metallen. Um die Wirtschaftlichkeit zu verbessern und das Element auch langfristig verfügbar zu machen, müssen speziell auf diese Stoffe zugeschnittene Verwertungsverfahren entwickelt werden.

Des Weiteren macht der Einsatz einer Vielzahl von aus ökologischer Sicht als schädlich oder zumindest bedenklich einzustufenden Werk-, Hilfs- und Betriebsstoffen die Entwicklung und Anwendung spezieller Entsorgungsverfahren notwendig.

Zusätzlich sind insbesondere die Kosten zu betrachten, da alle Rücknahme- und Verwertungskosten zunächst vom Hersteller und Importeur zu tragen sind. Bei einer Umlage dieser Entsorgungskosten auf den Verkaufspreis sind umweltgerechte und kostenbewusste Ansätze gleichermaßen wichtig.

Verwertungs- und Entsorgungskosten werden im Wesentlichen durch die Komplexität und die Toxizität der Stoffe bestimmt. Aber auch Art und Menge der anfallenden Abfälle haben einen Kosten beeinflussenden Faktor.

Der europäische Abfallkatalog (EAK) listet die unterschiedlichsten Abfallarten auf. Insbesondere werden hier die gefährlichen Abfälle festgelegt. Gefährlich sind z.B. Abfälle, die Schwermetalle oder andere gefährliche Zusatzstoffe enthalten. Dies ist auch bei LCD-Geräten der Fall. An die Verwertung und Entsorgung der gefährlichen Abfälle werden besondere Anforderungen gestellt, deren Erfüllung zusätzlichen Aufwand und zusätzliche Kosten bei Transport, Verwertung und Entsorgung verursacht. Die Nachweispflicht ist obligatorisch und deutlich komplexer, als für ungefährliche Abfälle.

Eine "vereinfachende" Deklaration der alten, zu entsorgenden LCD-Geräte als ungefährlicher Abfall bzw. "elektrische und elektronische Bauteile ohne schädliche Anhaftungen" wird hier nicht empfohlen, da eine derartige Fehldeklaration eine erhebliche Ordnungswidrigkeit ggf. eine Straftat darstellt. Die richtige Deklaration muss 160215 oder 200135 lauten.

Um die Kosten der Verwertung legal zu beeinflussen, ist es ratsam eine qualifizierte Abfalltrennung vorzunehmen, um ungefährliche und gefährliche Komponenten (Fraktionen) separat zu erfassen und sie insbesondere von den Wertstofffraktionen definiert getrennt zu halten. Eine derartige Demontage und Sortierung kann die Umweltbelastung, den Ressourcenverbrauch und gleichzeitig die Unternehmerkosten deutlich senken.

Das vorliegende Handbuch soll behilflich sein, sich über die wesentlichen Gerätebauarten zu informieren. Einen Überblick über die unterschiedlichen enthaltenen Wert- und Schadstoffe zu erhalten, Zerlegestrategien kennen zu lernen und einen Einblick in Verwertungs- und Entsorgungsmöglichkeiten der Altgeräte zu erlangen.

2. Musterzerlegung

Die folgenden Daten und die Erfahrungen, die im Handbuch beschrieben werden, basieren auf Musterzerlegungen. Sie sind in einem Fachbetrieb für die Zerlegung von Elektronikschrott, der nach 4. BlmSchV genehmigt und gemäß Entsorgungsfachbetriebe-VO regelmäßig zertifiziert wird, vorgenommen worden.

2.1. Kriterien der Musterzerlegung

Die Zerlegeschritte sind in starker Anlehnung an die Kriterien der Fraktionserzeugung nach gewerblichen Ausrichtungen entstanden. Um die Aussagekraft der Untersuchungen zu erhöhen, sind die Zerlegungstiefen und die Zerlegungssorgfalt nach wissenschaftlichen Kriterien ausgelegt worden. Es sind dazu über 2.500 Geräte zerlegt worden. Auf diese Weise lässt sich den entwickelten Arbeitsschritten eine allgemeingültige Charakteristik zuordnen. Es sind Handhabungsanweisungen für die einzelnen Schritte der Zerlegung kompletter Geräte, wie auch insbesondere für die anfallenden Displayeinheiten entwickelt worden.

Für die Handhabung der Geräte ist bereits ihr Zustand nach der Anlieferung von Bedeutung. Der Transport erfolgt in der Regel in Gitterboxen. Dabei können die Geräte beschädigt und dadurch die Hintergrundbeleuchtung zerstört werden.







Abbildung 1: beschädigtes LCD-Gerät mit zerbrochener Hintergrundbeleuchtung

Diese Zerstörung kann in der Regel durch den Zerlegebetrieb nicht beeinflusst werden. Es ist jedoch ratsam, jeden Zulieferer, im Rahmen der Möglichkeiten, darauf hinzuweisen, diese Beschädigungen zu minimieren.

Im Rahmen der Musterzerlegungen verursachten die vorzerstörten Geräte keine Beeinträchtigung, da das eingesetzte Personal entsprechend geschult und sensibilisiert war. Zeitweise wurde zu den Projektarbeiten begleitend ein Quecksilbermonitor eingesetzt, um die maximale Arbeitsplatzbelastung kontinuierlich zu überwachen. Dabei ist keine unzumutbare Gefährdung festgestellt worden. Dennoch ist eine solche Gefährdung, insbesondere in Unkenntnis über den Zeitpunkt der Vorzerstörung, nicht auszuschließen!

Die Prioritäten der Musterzerlegung wurden wie folgt festgelegt:

- Arbeitsschutz,
- Emissionsschutz,
- Sortenreinheit,
- Reproduzierbarkeit,
- Nachvollziehbarkeit.

Für die Entwicklung geeigneter Handhabungen bei der manuellen Demontage anfallender LCD-Alt-Geräte sind die Geräte in die drei Kategorien Monitor, Fernsehgerät und Laptop eingeteilt und entsprechend untersucht worden.

Kleingeräte, deren Bildschirmgröße 100 cm² nicht überschreitet müssen nach ElektroG nicht vorbehandelt werden, sondern können dem stofflichen Recycling direkt zugeführt werden. Diese wurden daher bei der Musterzerlegung nicht berücksichtigt.

Ziel war die Entwicklung von Handhabungs- und Demontagestrategien unter Berücksichtigung einer zerstörungsfreien Entnahme der quecksilberhaltigen Beleuchtungsröhren. Der hersteller- und gerätespezifische Konstruktionsaufbau, insbesondere die Identifikation von Gemeinsamkeiten und Unterschieden sind obligatorisch für die Entwicklung gültiger Arbeitsanweisungen.

2.2. Demontagestrategien für die jeweiligen Gerätetypen

Als Zerlegewerkzeuge für die Untersuchungen sind diverse Kreuz- und Senkschlitzschraubendreher, Innensechskant- und Innensternschraubendreher, unterschiedliche gerade und angeschrägte Zangen sowie Kneifzangen und Seitenschneider gewählt worden.

Für die Demontage von LCD-Geräten lässt sich allgemein folgender Demontageplan zu Grunde legen:

- Kabel entfernen
- 2. Standfuß lösen und zerlegen
- 3. Gerätegehäuse lösen und entfernen
- Ausbau der Platinen
- 5. Displayeinheit demontieren
- 6. Display entfernen
- 7. Hintergrundbeleuchtung zerstörungsfrei entfernen
- 8. Entfernung von Kondensatoren

Die nachfolgenden Beschreibungen geben die Zerlegungen der unterschiedlichen LCD-Gerätetypen exemplarisch wieder.

Computermonitore

Bei der Demontage der Computermonitore sind im ersten Schritt vorhandene Kabel, danach der Standfuß sowie das Kunststoffgehäuse und die Metallrückwand des Monitors zu demontieren. Die Arbeitsschritte lassen sich leicht vollziehen. Die am Kunststoffrahmen und der Metallrückwand befindlichen Platineneinheiten lassen sich ebenfalls leicht demontieren. Nach diesen Arbeitsschritten können die Fraktionen Kunststoff, FE-Metall, Platinen und die Displayeinheit gebildet werden.

Weitere Demontagearbeiten sind an der Displayeinheit auszuführen. An der Rückwand des Bauteils, genauer an dem oberen und dem unteren Rand, sind die Kabel der Hintergrundbeleuchtung sichtbar. Diese geben einen Anhaltspunkt für die Lage der Beleuchtungsröhren. Die Metallrückwand und der vordere Metallrahmen sind entsprechend vorsichtig zu lösen. In Folge dieser Arbeitsschritte wird die Hintergrundbeleuchtung freigelegt. Bei den Computermonitoren sind in der Regel zwischen zwei bis sechs Kapillare enthalten. Die Kapillare sind in Metallschienen eingefasst, die einen leichten Schutz vor Bruch der Kapillaren bieten. Die Röhren lassen sich aus der Konstruktion lösen und können separat fraktioniert werden.

Fernsehgeräte

Es müssen zuerst Kabel und der Standfuß demontiert werden. Anders als bei den Monitoren kann bei den Fernsehgeräten der vordere Kunststoffrahmen nicht direkt entfernt werden. Zuerst müssen die auf der Rückseite des Geräts befindlichen Platinen gelöst werden. Erst danach ist die Demontage des vorderen Kunststoffrahmens möglich.

Sind die ersten oben beschriebenen Arbeitsschritte beendet, ist auch bei den LCD-Fernsehgeräten die Displayeinheit freigelegt. In diesem Demontagestadium sind die Anschlüsse der Hintergrundbeleuchtung sichtbar. Anhand dieser Anordnung kann die Lage der Beleuchtungsröhren identifiziert werden. Im Gegensatz zu den Monitoren sind die Röhren nicht nur an dem oberen und unteren Rand der Displayeinheit angeordnet, sondern flächig über den gesamten Bildschirm verteilt. Bei der Durchführung der weiteren Demontageschritte ist die Gefahr eine Beleuchtungskapillare zu zerbrechen deutlich höher als bei den zuvor beschriebenen Monitoren.

Bei der Displayeinheit gilt es zuerst den Metallrahmen zu lösen. In Folge kann das Display gelöst und abgehoben werden. Im weiteren Verlauf muss bei der Displayeinheit ein weiterer Metallrahmen von hinten gelöst und von vorne abgehoben werden. Nach diesem Arbeitsschritt werden mehrere Kunststoffplatten freigelegt, die abgehoben werden können. Die Hintergrundbeleuchtung ist nach diesen Arbeitsschritten freigelegt und kann demontiert werden.

Bei den Fernsehgeräten sind die Röhren nicht durch eine Metallschiene geschützt. Die Fixierung der Kapillare erfolgt jeweils an fünf Punkten. An dem rechten und linken Bildschirmrand befinden sich Kunststoffschienen, an denen die Enden der Kapillare befestigt sind. Zur Stabilisierung der langen Beleuchtungsröhren sind diese zu-

sätzlich mit drei Kunststoffverbindungen mit der Rückwand des Geräts verbunden. Die Verbindungen lassen sich lösen, jedoch muss bei der Demontage besonders sorgfältig vorgegangen werden, um eine Quecksilberfreisetzung durch Bruch der Lampen zu vermeiden.

Laptops

Die Gerätekategorie der Laptops unterscheidet sich bauartbedingt von den beiden anderen beschriebenen Geräteausführungen. Vor der Demontage wird der Akku aus dem Laptop entfernt. Für die Durchführung der Demontage gilt es, zuerst das Display von der Rechnereinheit zu trennen. Die Rechnereinheit kann in Folge in einzelne Fraktionen separiert werden: z.B. Platinen, Festplatte, Laufwerke, Tastatur, u.w.

Die Demontage der Displayeinheit beginnt mit dem Lösen und Abheben des Kunststoffgehäuses. Nach Anheben der Gehäuserückwand, wird die Displayeinheit sichtbar, deren Verschraubungen nun gelöst werden können. Von der Displayeinheit sind die Platineneinheiten zu demontieren. Wie bereits bei den anderen Gerätekategorien sind an der Rückwand dieser Einheit die Kabel der Beleuchtung sichtbar. Die Beleuchtungsröhren befinden sich an dem oberen Rand des Displays und sind, wie bei den Monitoren, durch eine Metallschiene geschützt. Wird diese Schiene entfernt, kann die Hintergrundbeleuchtung entnommen werden.

Aus den Musterzerlegungen sind die folgenden Arbeitsanweisungen für die drei Gerätetypen entwickelt worden.

Arbeitsanweisung Monitordemontage



1. Arbeitsschritt

Kabel entfernen





2. Arbeitsschritt

Verschraubungen lösen und Standfuß entfernen





3. Arbeitsschritt

Verschraubungen lösen und Kunststoffrückwand entfernen





4. Arbeitsschritt

Verschraubungen lösen und Kunststoffrahmen entfernen



5. Arbeitsschritt

Verschraubungen lösen und Platinen entfernen





6. Arbeitsschritt

Kondensatoren entfernen



7. Arbeitsschritt

Verschraubungen lösen und Metallrückwand entfernen



8. Arbeitsschritt

TFT-Einheit weiterer Demontage zuführen siehe Arbeitsanweisung TFT-Panel-Demontage



Abbildung 2: Arbeitsanweisung Demontage von Computermonitoren

Arbeitsanweisung Fernsehgerätdemontage



1. Arbeitsschritt

Verschraubungen lösen und Standfuß entfernen





2. Arbeitsschritt

Verschraubungen lösen und Kunststoffrückwand entfernen





3. Arbeitsschritt

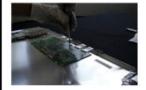
Verschraubungen lösen und Platinenabdeckung entfernen





4. Arbeitsschritt

Verschraubungen lösen und Platinen entfernen





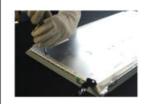
5. Arbeitsschritt

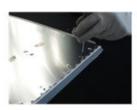
Kabelverbindungen trennen



6. Arbeitsschritt

Verschraubungen der Metallrückwand lösen

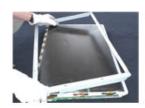




7. Arbeitsschritt

Verschraubungen lösen und Metallrahmen entfernen

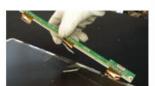




8. Arbeitsschritt

Verschraubungen lösen und Platinen entfernen





weitere Demontage des TFT-Panels, siehe TFT-Panel-Demontage

Abbildung 3: Arbeitsanweisung Demontage von Fernsehgeräten

Arbeitsanweisung Laptopdemontage



1. Arbeitsschritt

Akku entfernen



2. Arbeitsschritt

Displayeinheit von der Rechnereinheit trennen





3. Arbeitsschritt

Entfernen der Rechnerkomponenten: Platinen, Festplatte, Laufwerke, Tastatur, usw.







4. Arbeitsschritt

Entfernung des Kunststoffgehäuses von der Displayeinheit



weitere Demontage des Displays, siehe Arbeitsanweisung TFT-Panel-Demontage

Abbildung 4:Arbeitsanweisung Demontage von Laptops

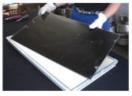
Arbeitsanweisung TFT-Panel-Demontage

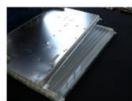


Aufgrund der möglichen Gefährdung durch Quecksilberdampf dürfen die folgenden Arbeitsschritte nur in einer speziellen Sicherheitswerkbank durchgeführt werden.

1. Arbeitsschritt

Entfernen des Displays bei Fernsehgeräten und Abheben der Metallrückwand





2. Arbeitsschritt

Lösen der Lampenbefestigungen





3 a. Arbeitsschritt

bei Fernsehgeräten: Hintergrundbeleuchtung von der Rückseite entfernen





3 b. Arbeitsschritt

bei Monitoren und Laptopdisplays: Hintergrundbeleuchtung aus der seitlichen Halterung entfernen





Arbeitsschritt Folien entfernen



5. Arbeitsschritt

Kunststoffplatten entfernen

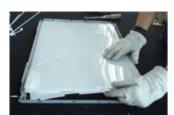


Abbildung 5: Arbeitsanweisung Demontage von TFT-Panels

3. Arbeitssicherheit

3.1. Gefahrpotenzial

In LCD-Geräten werden KKL-Röhren (Kaltkathodenlampe) als Hintergrundbeleuchtung eingesetzt. Hierbei handelt es sich um dünne quecksilberhaltige Glaskapillare mit einem Durchmesser von 2 bis 4 mm. Bedingt durch die Anordnung dieser Kapillare in den Geräten können diese sehr schnell zerbrechen und das enthaltene metallische Quecksilber wird freigesetzt.

Die Anzahl der eingesetzten Hintergrundbeleuchtungsröhren hängt in erster Linie von der Gerätekategorie und von der Bildschirmdiagonalen der Geräte ab. Das in den Röhren enthaltene Quecksilber liegt dampfförmig vor und die eingesetzte Menge variiert zwischen 3 bis 5 mg. Bei einem LCD-Fernsehgerät mit einer Bildschirmdiagonalen von 32" kommen bis zu 20 solcher Röhren vor. Das entspricht einer eingesetzten Quecksilbermenge zwischen 60 bis 100 mg pro Fernsehgerät.

Quecksilber ist ein giftiges Schwermetall. Es gelten die folgenden R- und S-Sätze:

R-Sätze: R61-26-48 / 23-50/53

S-Sätze: S53-45-60-61







umweltgefährlich

Der AGW (Arbeitsplatzgrenzwert) für den Umgang mit Quecksilber liegt bei 0,1 mg/m³ (Quelle: technische Regeln für Gefahrstoffe).

In der europäischen Richtlinie RL 2009/161/EU wird ein Arbeitsplatz-Richtgrenzwert von 0,02 mg/m³ angegeben. Diese Angabe ist in Deutschland kein geltendes Recht, stellt aber eine wissenschaftliche Empfehlung dar (Quelle: Ifa Gestis).

Bei dem Umgang mit LCD-Geräten geht ein großes Risiko durch eventuelle unsystematisch auftretende Quecksilbermengen aus.

Für den sicheren Umgang mit Quecksilber und quecksilberhaltigen Produkten müssen daher bestimmte Verhaltensregeln und Umgangsregeln eingehalten werden [4].

- Auf Sauberkeit am Arbeitsplatz achten.
- Keine Vorratsflaschen im Arbeitsraum lagern.

- Gefäße nicht offen stehen lassen.
 Ist dies nicht möglich, so sollte das Quecksilber mit Wasser oder flüssigem Paraffin überschichtet werden.
- Für das Ab- und Umfüllen möglichst dicht schließende Anlagen mit Absaugung einsetzen.
- Nicht mit Druckluft f\u00f6rdern.
- Verspritzen vermeiden.
- Nur in gekennzeichnete Gebinde abfüllen.
- Bei offenem Hantieren jeglichen Kontakt vermeiden.
- Eindringen in den Boden sicher verhindern (Stahlwanne).
- Beim Transport in zerbrechlichen Gefäßen geeignete Überbehälter benutzen.

Für die Demontage der Altgeräte ist es unbedingt erforderlich für das Betriebspersonal eine ausreichend hohe Sicherheitseinrichtung bereit zu stellen, so dass der beim Umgang mit Quecksilber einzuhaltende AGW-Wert zu jeder Zeit eingehalten wird. Darüber hinaus muss gewährleistet sein, dass freigesetzte Quecksilbermengen nicht in der Umgebungsluft verbleiben, sondern einer speziell für diesen Fall zweckentsprechenden Vorrichtung zugeführt werden.

Ein weiterer Gefahrstoff, der in LCD-Geräten enthalten sein kann, sind polychlorierte Biphenyle (PCB) in den Kondensatoren. PCB dürfen bei der Produktion in Deutschland nicht mehr eingesetzt werden. Allerdings kann bei der Entsorgung von Geräten ausländischer Hersteller eine PCB-Freiheit nicht vorausgesetzt werden.

3.2. Maßnahmen zur Einhaltung des Arbeitsschutzes

Die Demontage der Displayeinheit mit der Entnahme der Hintergrundbeleuchtung ist ausschließlich in einer speziellen Sicherheitswerkbank durchzuführen, um eine Gefährdung der Mitarbeiter auszuschließen. Diese Werkbank muss in der Lage sein, Quecksilberdämpfe zuverlässig zurückzuhalten. Dies ist nicht mit Absaugungen oder Werkbänken für partikuläre Kontaminationen zu erreichen. Eine technisch erfolgreiche Lösung besteht darin, dass ein adsorptiver Aktivkohlefilter mit integrierter Quecksilbersenke genutzt wird. Die Adsorption sorgt für die notwendige Verweilzeit im Filter, um eine chemische Umsetzung des Quecksilbers zu gewährleisten [4].

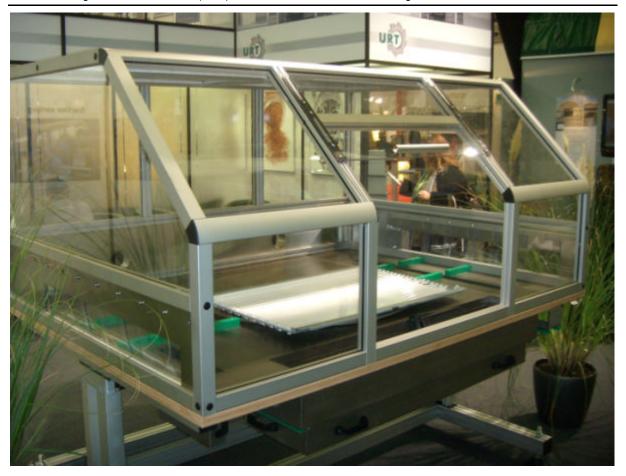


Abbildung 6: Sicherheitswerkbank

Während des gesamten Demontagevorganges der LCD-Geräte ist das Tragen von Sicherheitshandschuhen und einer Schutzbrille notwendig.

Erste Anforderungen an einen sachgerechten Umgang müssen bereits bei der Sammlung und dem Transport der Geräte gestellt werden. Der Transport erfolgt in der Regel in Gitterboxen. Dabei sind starke Erschütterungen und sonstige Beanspruchungen, die zu Beschädigungen der Geräte führen können, zu vermeiden.

Bei bereits offensichtlich zerstörten oder stark beschädigten LCD-Geräten muss die gesamte Demontage in der Sicherheitswerkbank durchgeführt werden.

4. Fraktionen und Mengenströme

Wie bereits zu Anfang ausgeführt, fallen LCD-Geräte unter die Gesetzgebung für die Verwertung von Elektro- und Elektronikaltgeräten. Bei den in Kapitel 2 dargestellten Zerlegungen wurden die Geräte in Fraktionen unterteilt, die bereits aus der Elektronikschrottdemontage bekannt sind. Eine derartige Vorgehensweise stellt nicht nur für die Demontage eine praktikable, reproduzierbare Handhabung dar, sondern erleichtert die Identifikation und somit die Einstufung und Bewertung der Fraktionen auf dem Sekundärmaterialmarkt nach der Zerlegung.

Bei den Zerlegeversuchen wurden Geräte unterschiedlicher Größe und unterschiedlicher Hersteller untersucht und die darin vorkommenden Fraktionen katalogisiert. Abbildung 7 zeigt die Mengenanteile der erzeugten Hauptfraktionen.

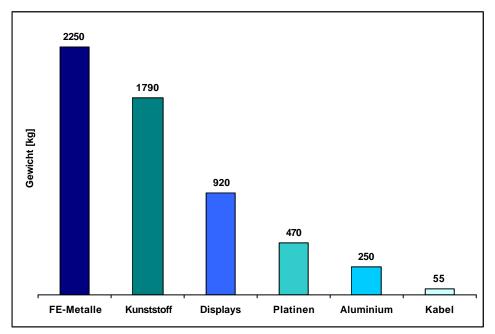


Abbildung 7: Hauptfraktionen der LCD-Demontage

Die Datenkataloge für die gebildeten Gerätekategorien ermöglichen Schlussfolgerungen auf die anfallenden Mengen Erlös bringender Fraktionen. Aus der Gesamtheit aller demontierten 2.500 Geräte sind die folgenden werthaltigen Materialmengen angefallen:

Fe-Metall	2.434 kg
Platinen	504 kg
Aluminium	271 kg
Kabel	65 kg

Zu den identifizierten Schadstoffen zählt die quecksilberhaltige Hintergrundbeleuchtung. In Abhängigkeit von der Bildschirmdiagonalen ist bei den drei Gerätekategorien eine unterschiedliche Anzahl von Beleuchtungsröhren verbaut. Der Umgang mit diesem Bauteil stellt das Gefahrstoffrisiko bei der Zerlegung der Geräte dar.

4.1. Mengenströme der unterschiedlichen Gerätetypen

Die folgenden Abbildungen veranschaulichen exemplarisch die Materialzusammensetzung und die Gewichtsverteilung der untersuchten Gerätekategorien.

Mengenströme der Computermonitordemontage

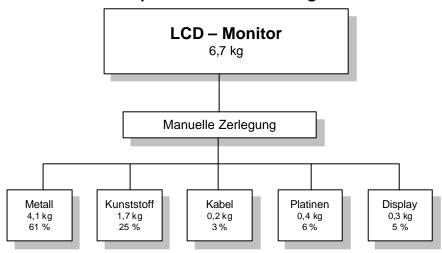


Abbildung 8: Exemplarische Fraktionsverteilung LCD-Monitor

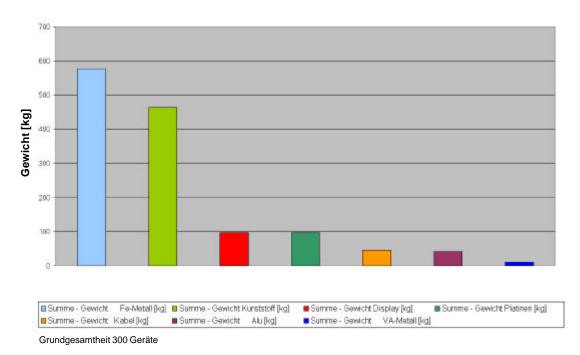


Abbildung 9: Fraktionsmenge nach Demontage

Mengenströme der Fernseherdemontage

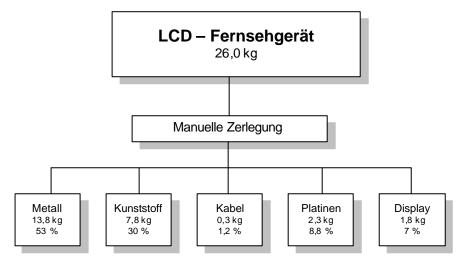


Abbildung 10: Exemplarische Fraktionsverteilung LCD-Fernsehgerät

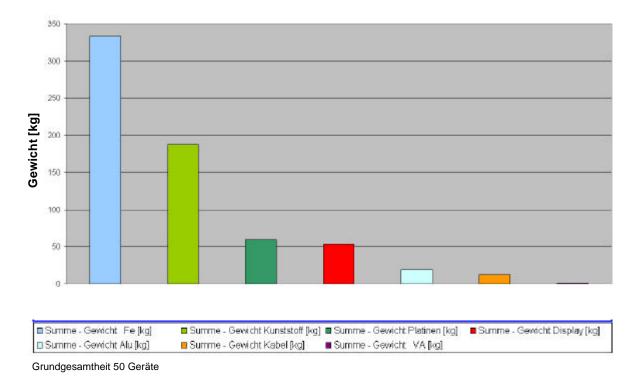


Abbildung 11: Fraktionen nach LCD-Fernsehdemontage

Bei den demontierten Monitoren und Fernsehgeräten stellen die Metalle und die Kunststoffe prozentual die größten Fraktionen dar.

Mengenströme der Laptopdemontage

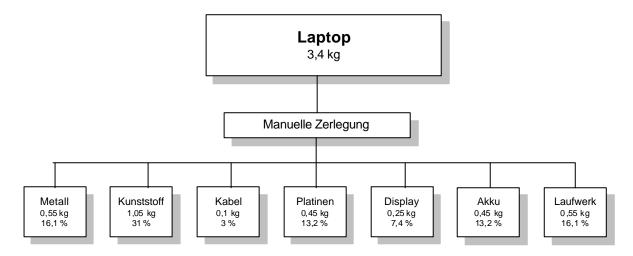


Abbildung 12: Exemplarische Fraktionsverteilung Laptop

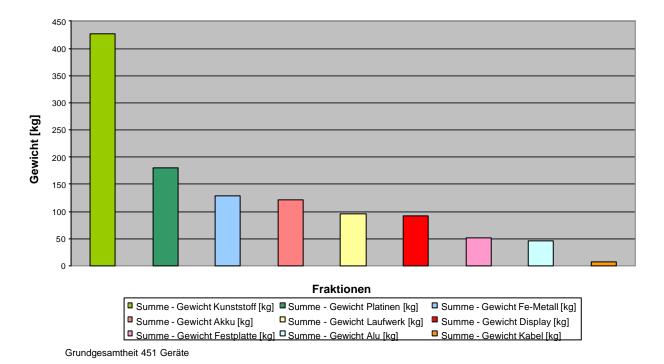


Abbildung 13: Fraktionen der Laptop-Demontage

Im Gegensatz zu den Gerätekategorien Monitore und Fernsehgeräte fällt bei der Gewichtsverteilung der erzeugten Laptop-Fraktionen auf, dass der Metallanteil deutlich geringer ausfällt. Bei den Laptops bilden die Fraktionen "Akku" und "Laufwerk" zusammen fast 30% des Gesamtgewichts.

5. Charakterisierung und Recycling der erzeugten Fraktionen

Die bei der Zerlegung eines LCD-Gerätes erzeugten Fraktionen werden entsprechenden Verwertungs- und Entsorgungswegen zugeführt. Abbildung 14 gibt einen Überblick über die weiteren Recyclingpfade der einzelnen Fraktionen.

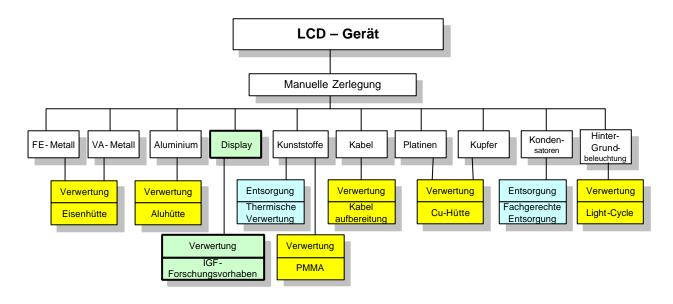


Abbildung 14: Fraktionen der LCD-Geräte-Demontage

5.1. Flüssigkristallanzeigen (LCD)

5.1.1. Funktionsbeschreibung

LCD-Displays sind passive Anzeigeelemente. Sie bestehen aus zwei rückseitig mit einer Polarisationsfolie kaschierten Glasscheiben, zwischen denen sich eine Flüssig-kristallschicht befindet. Beide Scheiben sind am Rand miteinander verklebt und tragen Bauelemente zur elektrischen Ansteuerung der Bildpunkt-Matrix. Der Glasanteil beträgt ca. 85%, der Kunststoffanteil beträgt ca. 15% [5].

Ein Bild entsteht in dem Licht einer Hintergrundbeleuchtung, bedingt durch die pixelweise elektrisch schaltbare Lichtdurchlässigkeit der Flüssigkristallschicht, helle oder dunkle Bildpunkte erzeugt. Die einzelnen Pixel bestehen bei Farbdisplays im additiven RGB-Farbsystem aus drei Grundfarben, die als Farbstoffschichten auf das Glas aufgebracht werden. Angesteuert und geschaltet werden die Pixel über gitterförmige metallische Leiterbahnen und die zugleich transparente und elektrisch leitende Indium-Zinn-Oxidschicht auf dem Glas. Bei den zur Zeit dominierenden ThinFilmTransistor-Displays werden die elektrischen Steuerimpulse durch einen kleinen direkt auf dem Glas erzeugten Transistor verstärkt [6].

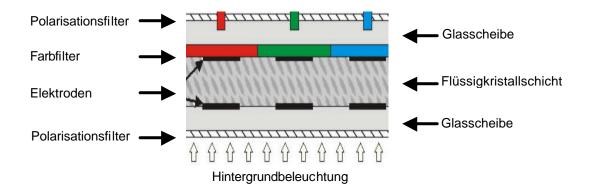


Abbildung 15: Displayaufbau [5]

Ein Flachbildschirm-Display besteht aus Bildpunkten (Pixel). Jeder Bildpunkt wiederum besteht aus drei LCD-Zellen (Sub-Pixel), entsprechend den Farben Rot, Grün und Blau. Ein 15-Zoll Bildschirm enthält etwa 800.000 Bildpunkte oder ungefähr 2,4 Millionen LCD-Zellen.

Die Funktionsweise einer Flüssig-Kristall-Zelle (LCD-Zelle) lässt sich anschaulich am Beispiel eines Polarisationsfilters erklären: Verdreht man zwei polarisierte Gläser im Winkel von 90° zueinander kommt kein Licht hindurch und man sieht nichts mehr. Dieser Effekt kommt deshalb zustande, weil polarisiertes Glas nur für Lichtwellen durchlässig ist, die in einer bestimmten Ebene schwingen. Bei einer Verdrehung von 90° kann ein Teil des Lichts noch durch das erste Glas hindurchgelangen, jedoch nicht mehr durch das zweite.

Eine LCD-Zelle funktioniert nach dem gleichen Prinzip: Sie besteht aus zwei gegeneinander um 90° verdrehten polarisierten Gläsern, durch welche kein Licht hindurchgelangen kann. Dazwischen befindet sich eine Schicht aus Flüssigkristallen, welche die Eigenschaft hat, die Schwingungsebene von Licht zu drehen. Die Flüssigkristall-Schicht ist gerade so dick, dass das Licht, welches durch das erste polarisierte Glas hindurchgelangt, um 90° zurückgedreht wird, und damit auch durch das zweite polarisierte Glas gelangen kann. Durch das Anlegen einer Spannung werden die Flüssigkristall-Moleküle aus ihrer natürlichen Position weggedreht, so dass weniger Licht durch die Zelle hindurch gelangt und der Bildpunkt dunkel wird [7].

5.1.2. Herstellungsverfahren

Die Herstellung der LC-Displayeinheiten umfasst 5 Schritte:

- Glasplattenherstellung
- Beschichtung der Frontplatte mit Indium-Zinn-Oxid
- Beschichtung der Rückplatte
- Verbindung der beiden Platten
- Montage der Hintergrundbeleuchtung

Die LC-Displayeinheiten werden anschließend in Kunststoffgehäusen mit entsprechenden elektronischen Einheiten montiert.

5.1.3. Recycling der Displayfraktion

Die Beurteilung von Behandlungsverfahren für Flüssigkristallanzeigen (Liquid Crystal Display, LCD) muss unter Berücksichtigung dessen erfolgen, dass hierin quecksilberhaltige Leuchtstoffröhren als Hintergrundbeleuchtung enthalten sein können. Werden diese Röhren nicht von den Displays getrennt, wird nur die thermische Entsorgung oder die Untertagedeponierung als quecksilberhaltiger Abfall als Behandlungsoptionen gesehen [8]. Die in den Displays verwendeten Flüssigkristalle werden in den bei diesen Geräten verwendeten Mengen mittlerweile als unschädlich angesehen [9]

Nach einer Demontage der Leuchtstoffröhren, ist eine werkstoffliche Verwertung der Displays möglich. Die Fraktion wird derzeit jedoch noch in Müllverbrennungsanlagen entsorgt.

Für die Behandlung der LCD-Module ist deren Aufbau als Mehrschichtverbund von Glas (rund 80 %), Kunststofffolien und Metallschichten sowie Kunststoffgehäusen und Leiterplatten zu berücksichtigen. Die Flüssigkristalle selbst stellen hierbei einen Anteil von 0,1 % dar [9]. Eine Abtrennung des Glases von den anderen Komponenten ist nach dem Stand der Technik nur nach einer Vorbehandlung, wie dem vakuumthermischen Verfahren, möglich. Das gereinigte Glas könnte anschließend einer Verwertung zugeführt werden. Diesem abfallwirtschaftlich positiv einzustufenden Verfahren stehen jedoch die vergleichsweise hohen Kosten gegenüber. Jede thermische Behandlung (z.B. thermische Behandlung zusammen mit Abfällen oder in Schmelzen) muss unter Berücksichtigung des Mehrschichtaufbaus und der möglichen Reaktionsprodukte der enthaltenen Komponenten in Anlagen mit entsprechender Rauchgasreinigung erfolgen [9]. Dies ist z.B. in Kupferhütten möglich.

Das Berliner Recyclingunternehmen Vicor GmbH bietet ein Recyclingverfahren an, in dem nach mechanischer Zerkleinerung die Flüssigkristalle durch Unterdruck entfernt

und anschließend über einen Katalysator bei 400 – 500 °C im geschlossenen System zerstört werden.

Ein von IUTA bearbeitetes und erfolgreich abgeschlossenes F&E-Projekt befasste sich explizit mit den bei der Demontage anfallenden Displays mit dem Ziel die darin enthaltenen strategischen Metalle zurück zu gewinnen und diese Fraktion damit einer werkstoffliche Verwertung zuzuführen. Im Rahmen der Projektarbeiten wurden Arbeitsabläufe für die Demontage von LCD-Geräten entwickelt, betriebsorientierte Materialfraktionen definiert und zugehörige Verwertungsverfahren aufgezeigt bzw. Untersuchungen zu fehlenden Verfahren durchgeführt. Für die seltenen Elemente und ihre Verbindungen wurden Trenn- und Anreicherungsverfahren entwickelt, die ein anschließendes Recycling der Stoffe ermöglichen. Die geschaffene Wissensbasis bildet die Grundlage für die sachgerechte Verwertung dieser für die Elektronikschrottverwertung neuen Geräteklasse.

5.1.4. Recycling der Hintergrundbeleuchtung

Bei der Demontage des Displaymoduls ist auf die zerstörungsfreie Entnahme der Hintergrundbeleuchtung zu achten. Röhren, die keinen Bruch aufweisen, können über das Lightcycle-System entsorgt werden. Bei Mengen ab 4.000 Stück pro Jahr bietet Lightcycle einen direkten und kostenlosen Holservice mit Standardsammelbehältern (Rungenpaletten und Gitterboxen) an [10]. Zerstörte Hintergrundbeleuchtung kann nicht über das Lightcycle-System abgeholt werden. Diese Fraktion muss daher bei der Demontage separat in abgeschlossenen Behältern gesammelt werden. Ein Entsorgungsweg für die zerbrochenen Röhren ist noch nicht bekannt.

Von OSRAM ist ein produktspezifisches Aufarbeitungsverfahren für die zur Entsorgung anfallenden Entladungslampen entwickelt worden. Ziel dieses Verfahrens ist es, nicht nur das Glas der Röhrenkolben und das in den Lampen enthaltene Quecksilber einer Wiederverwertung zuzuführen, sondern auch den Wiedereinsatz von Leuchtstoffen bzw. seinen Komponenten zu ermöglichen.

Für die Aufarbeitung der Leuchtstofflampen und Rückgewinnung der Hauptkomponente Röhrenglas werden zuerst die Lampenenden abgetrennt und das Glas durch Ausblasen mit Druckluft vom Leuchtstoff separiert. Eine Anlage dieser Art besteht aus Kappenabtrennmaschine, Filtereinheit zur Leuchtstoffabscheidung und einer Quecksilberadsorptionseinheit [11]. Abbildung 16 skizziert den Verfahrensweg.

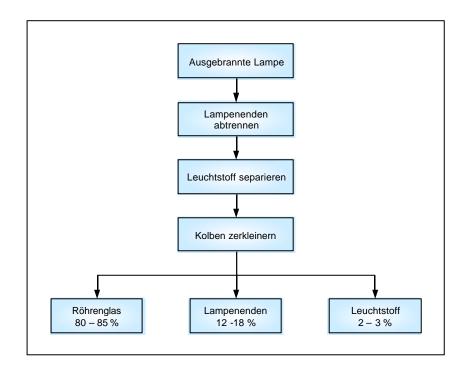


Abbildung 16: Schema der produktspezifischen Aufarbeitung von Osram

5.2. Eisenmetalle

5.2.1. Verwendung und wirtschaftliche Bedeutung von FE-Schrott

Der Schrottanteil in der deutschen Rohstahlerzeugung liegt derzeit bei 47 %. In der Stahlindustrie und in der Schrottwirtschaft werden drei Schrottsorten nach ihrer Herkunft unterschieden: der Rücklauf- oder Eigenschrott aus den Werken, der Neuschrott aus der verarbeitenden Industrie und der Altschrott aus Abbruch, Verschrottung oder Sammelvorgängen. Altschrott wird von der Recyclingwirtschaft erfasst und aufbereitet.

Die Mengenbilanz und die Preisentwicklung hängen entscheidend von der Stahlnachfrage ab. Die folgende Abbildung veranschaulicht die Preisentwicklung im vergangenen Jahr.

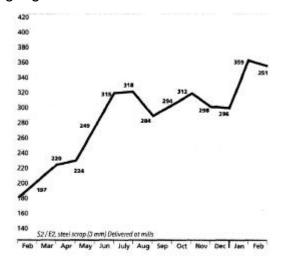


Abbildung 17: aktuelle Stahlschrottpreise Februar 2010 bis Februar 2011 in Deutschland in €/t [12]

5.2.2. Aufbereitungsverfahren für die FE-Metallfraktion

Für die Erzeugung von Rohstahl gibt es zwei prinzipielle Verfahren: das Oxygenstahlverfahren und das Elektrostahlverfahren. Der Einsatz von Stahlschrott im Oxygenstahlverfahren in 2010 betrug 20%. Dort dient der Schrott der Abkühlung des Schmelzprozesses. In Elektrostahlwerken kann Stahlschrott zu 100% eingesetzt werden. Dieses Verfahren macht in Deutschland 32 % der Stahlherstellung aus [13].

Für den Einsatz im Stahlwerk muss eine ungefähre Analyse des Schrottes vorhanden sein. Bestimmte Elemente wie Kupfer oder Zinn sollen nicht in den Hochofen gelangen. Deshalb ist eine sorgfältige Zerlegung und Sichtung erforderlich. Unlegierte Stahlsorten müssen frei sein von Chrom, Nickel und Molybdän. Schwefel und Phosphor mindern die Qualität der Stähle. Als Edelstähle bezeichnet man die legierten oder unlegierten Sorten, deren Schwefel- oder Phosphorgehalt 0,035 % nicht übersteigt.

Diese Merkmale sind in der Gemeinsamen Europäischen Schrottsortenliste festgelegt, durch die seit 1995 die Stahlsorten klassifiziert werden:

Kategorien	Sorten	Angestrebte Analysenwerte (Reststoffe) in %				
		Cu	Sn	Cr,Ni,Mo	S	Р
Altschrott	E 3	<u><</u> 0,250	<u><</u> 0,010	S <u><</u> 0,250		
	E 1	< 0,400	< 0,020	S < 0,300		
Neuschrott						
mit niedrigem Ge-	E2		S <u><</u> 0,300			
halt an Begleit-						
elementen (Rest-	E8		S ≤ 0,300			
stoffe), frei von Beschichtungen	E6		S < 0,300			
Shredderschrott	E 40	< 0,250	< 0,020			
Stahlspäne	E 5H	Eine vorherige chemische Analyse kann gefordert wer- den				
	E 5M	< 0,400	< 0,030	S <u><</u> 1,0	< 0,100	
leicht legierter						
Schrott	EHRB	<u><</u> 0,450	<u><</u> 0,030	S < 0,350		
Schrott mit hohem Reststoffanteil	EHRM	<u><</u> 0,400	≤ 0,030	S <u><</u> 1,0		
geschredderter Schrott aus Müllverbrennung	E46	<u><</u> 0,500	≤ 0,070			

Tabelle 1: Europäische Schrottsortenliste

5.3. Edelmetalle

5.3.1. wirtschaftliche Bedeutung

Das Edelmetallrecycling ist in wirtschaftlicher Hinsicht besonders interessant. In diesem Bereich sind die Rohstoffpreise in den letzten Monaten stark gestiegen. Im Januar 2011 lag der Preis für Platin bei ca. 41 €/g, für Gold bei ca. 33 €/g, für Palladium bei ca. 18 €/g und der von Rhodium bei über 59 €/g [14].

5.3.2. Aufbereitungsverfahren für Edelmetalle

Die Rückgewinnung der Edelmetalle erfolgt nach unterschiedlichen Verfahren, die nachfolgend kurz vorgestellt werden.

Kupfer- oder Nickelhütten

Die Rückgewinnung von Platin und Platingruppenmetallen (PGM) sowie Gold und Silber erfolgt zum Teil in modernen Kupferhütten. Der Schrott wird meist bei der Rohkupfererzeugung im Konverter zugesetzt und aufgeschmolzen, wobei die organischen Bestandteile verbrennen. Dies erfordert eine aufwendige Abgasreinigung. Bei der nachfolgenden Raffination des Rohkupfers im Anodenschachtofen verbleiben die Edelmetalle im Anodenschlamm. Die weitere Aufarbeitung der Schlämme erfolgt in Edelmetallscheideanstalten.

Schmelzextraktionsverfahren in Elektroöfen

Ein weiteres Verfahren der großtechnischen Wiedergewinnung von PGM ist das thermometallurgische Schmelzextraktionsverfahren [15], das auf der Abtrennung der Wertmetalle mit einem Sammlermetall basiert. Das Recyclinggut wird unter Zugabe von Metalloxid, einem Reduktionsmittel und Schlackebildnern in einem elektrischen Widerstandsofen geschmolzen. Das Sammelmetall bildet sich dabei in situ als fein verteilte Tröpfchen. Sie begieren mit den PGM und trennen sich aufgrund ihrer Dichte von der Schlacke. Das Verfahren ist energieintensiv und mit 10 - 20 % des rückgewonnenen Metallwerts relativ teuer. Das Sammlermetall wird anschließend nasschemisch mit Hilfe von Salzsäure oder Königswasser aufbereitet und der Großteil der Edelmetalle dabei wiedergewonnen. Die Ofenschlacke kann an Kupferhütten als Zuschlagstoff abgegeben werden, um dort die darin enthaltenen Reste von Kupfer und Edelmetallen zu vergüten [16].

Elektrochemische Verfahren

Bei der Gewinnung der Edelmetalle in den Scheideanstalten kommt den elektrochemischen Verfahren besondere Bedeutung zu. Sie bilden meist die letzte Raffinationsstufe, nachdem in den vorgehenden Prozessen die metallische Phase abgetrennt wurde. Es handelt sich um Standardverfahren der wässrigen Raffinationselektrolyse. Edelmetalle sammeln sich dabei im Anodenschlamm, der dann wiederum elektrolytisch oder hydrometallurgisch verarbeitet wird [17].

Hydrometallurgische Verfahren

Bevor organische Edelmetallrückstände in das oben erwähnte Schmelzextraktionsverfahren eingehen können, werden sie verascht. Bestehende Anlagen ohne spezielle Abgasreinigung dürfen dafür nicht genutzt werden, da der Schwefel- und Fluor-Gehalt der organischen Edelmetallrückstände sich als kritisch erweist. Bei der Anwendung hydrometallurgischer Verfahren kann das Problem umgangen werden. Hierbei werden einzelne Bestandteile wie Platin oder Palladium mit Königswasser ausgelaugt. Laugentests haben jedoch eine relativ geringe Edelmetallausbeute ergeben. Außerdem bleibt als Problem häufig die Beladung der Rückstände.

Im Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration wurde ein entsprechendes Verfahren zur hydrometallurgischen Goldrückgewinnung entwickelt. Das cyanidfreie Bad ist ungiftig und biologisch abbaubar. Die industrielle Umsetzung dieses Verfahrens ist nicht bekannt.

5.4. Nicht-Eisen-Metalle

5.4.1. wirtschaftliche Bedeutung von NE-Metall-Schrott

Die aktuellen durchschnittlichen Preise für NE-Metalle sind nachfolgender Tabelle zu entnehmen [12,18].

Aluminium	2.500 US\$/ t
Kupfer	9.500 US\$/ t
Zink	2.600 US\$/ t
Nickel	29.000 US\$/ t

Tabelle 2: durchschnittliche Metallpreise März 2011

Aus ökologischer Sicht ist die Erzeugung von Sekundärkupfer weitaus ressourcenschonender als die Erzeugung von Primärkupfer, da die besonders energie- und stoffstromintensiven Prozesse zum großen Teil beim Erzabbau und der Konzentratgewinnung liegen. Für eine Tonne Sekundärkupfer werden im Durchschnitt in Deutschland 30,7 MJ Energie und ein Materialfluss von 2,12 t veranschlagt, für 1 Tonne Primärkupfer hingegen 59,0 GJ und 84,1 t [19].

Das Sekundäraluminium ist dem Primäraluminium völlig gleichwertig. Bei der Erzeugung von Sekundäraluminium wird etwa 95 % der zur Primäraluminiumerzeugung erforderlichen Energie eingespart, außerdem fallen erheblich weniger Abfälle, Restprodukte und Emissionen an [18].

5.4.2. Aufbereitung von Kupferschrott

Kupferschrott wird in den Sekundärkupferhütten meist bei der Rohkupfererzeugung im Konverter zugesetzt und bei 1150 – 1250 °C aufgeschmolzen. Die im Kupferschrott enthaltenen organischen Verunreinigungen machen eine aufwendige Abgasreinigung erforderlich. Das Rohkupfer hat einen Kupfergehalt von ca. 95,5 %.

Bei der nachfolgenden Raffination werden im Anodenschachtofen einige Elemente aus dem Rohkupfer entfernt. Die Kupferschmelze wird zu Anoden mit einem Kupfergehalt von 98 – 99 % vergossen. In einer zweiten Raffinationsstufe wird durch Elektrolyse ein Reinkupfer mit 99,5 – 99,99 % Kupfergehalt erzeugt [17].

Sekundärkupfer wird z.B. erzeugt bei

- der Aurubis AG, (ehemals Norddeutsche Affinerie AG) in Hamburg, die zu den größten Kupferlohnhütten der Welt zählt. Hier wird ein Drittel des produzierten Elektrolytkupfers aus Altmetallen und Schrott produziert.
- der DK Recycling, (ehemals Duisburger Kupferhütte).

In diesen Betrieben werden außer Kupfer auch andere NE-Metalle und Edelmetalle erzeugt.

5.4.3. Aufbereitung von Aluminium-Schrott

Aluminiumschrott kann je nach Mischung und Zusammensetzung des Schrotts ungeschmolzen oder raffiniert werden; diese Verfahrensschritte erfolgen in Spezialunternehmen. Das Umschmelzen kann in verschiedenen Arten von Öfen durchgeführt werden. Für Schrotte mit einem hohen Verunreinigungsgrad oder für Schaum und Krätze stellen Drehtrommelöfen noch immer die wirkungsvollste Lösung dar. In diesen Öfen wird das Material unter einer Salzdecke geschmolzen. Für das Umschmelzen von lackiertem Schrott wird das sogenannte Zweikammerverfahren eingesetzt. In der ersten Kammer wird der Lack abgeschwelt, erst dann gelangt der Schrott in den Schmelzofen. Moderne Öfen sind mit Hochleistungsnachbrennern und Filtrationssystemen ausgerüstet. Je nach Qualität der Schmelze muss allenfalls ein zusätzlicher Schritt, die Raffination, durchgeführt werden [20]. Dabei wird die Schmelze gereinigt und durch die Hinzufügung von Legierungselementen oder durch die Beseitigung von Verunreinigungen die gewünschte Qualität erreicht. Das geschmolzene Sekundäraluminium wird in Masseln oder Barren gegossen, die dann in der Produktion weiterverarbeitet werden können.

5.5. Kunststoffe

Für das werkstoffliche Recycling von Kunststoffen ist eine der entscheidenden Voraussetzungen die Sortenreinheit und Schadstofffreiheit der zur Wiederverwertung

anstehenden Materialströme. Wegen der begrenzten Verträglichkeit von unterschiedlichen Kunststoffen untereinander führt eine Vermischung verschiedener Kunststoffe in der Regel zu einer deutlichen Eigenschaftsverschlechterung [21].

Darüber hinaus sind Kunststoffe häufig mit umweltgefährdenden Additiven (chlorierte oder bromierte Verbindungen und Schwermetalle wie Cadmium), Füllstoffen oder Verstärkungsfasern modifiziert. Das ElektroG verbietet allerdings seit Juli 2006 die Verwendung von Cadmium und bestimmten Bromverbindungen in den meisten Geräten.

Voraussetzung für eine werkstoffliche Verwertung sortenreiner Kunststoffe, ist eine einwandfreie Identifizierung. Diese wird erschwert durch ähnliche Eigenschaften verschiedener Kunststoffe (z.B. Dichte) und die Vielzahl von Zusatzstoffen. Zur Zeit werden hauptsächlich Trennverfahren nach Dichteunterschieden praktiziert (Schwimm-Sink-Trennung, Hydrozyklon-Trennung und Trennzentrifuge). Es existieren auch Trennverfahren nach elektrostatischer Aufladung und nach Löslichkeit. All diese Verfahren machen aber nur dann Sinn, wenn nur sehr wenige verschiedene Kunststoffsorten mit klaren und unterschiedlichen Eigenschaften getrennt werden sollen.

Bei den Kunststoffen aus dem Elektronikschrott ist dies nicht der Fall. Darum kommt hier am ehesten eine Sortierung durch Kunststofferkennung in Frage. Technische Bedeutung haben röntgenographische Verfahren und vor allem die Infrarotspektroskopie [22]. Es existieren nur wenige industrielle Anwendungen dieser Verfahren im E-Schrott-Bereich, so dass die Kunststoff-Mischfraktion größtenteils thermisch verwertet wird.

Werkstoffliches Recycling erfolgt am ehesten bei Gehäuseteilen aus ABS und Polyamid. Da bei organischen Werkstoffen wie Kunststoff bei jedem Verwertungsschritt ein Teil der Materialeigenschaften verloren geht, muss dem Recyclingkreislauf kontinuierlich Neuware zugeführt werden, um eine definierte hohe Qualität des Rezyklates zu erreichen [22]. Es ist eine Frage der Zeit, dass durch Verknappung und Preisanstieg der Rohstoffe die werkstoffliche Verwertung von Kunststoffen zunehmend wirtschaftlich betrieben werden kann.

5.6. Platinen

5.6.1. Zusammensetzung

Platinenschrott muss gesondert erfasst werden, weil bei der Verbrennung krebserregende Stoffe freigesetzt werden können.

Das Platinengrundmaterial selbst ist aus Hartpapier oder bei höheren Qualitäten aus Kunstharzen hergestellt. Vielfach sind die Platinenbasismaterialien mit Glasfasern verstärkt. Das Basismaterial ist meist mit einem Brandschutz versehen, der im Brandfall wirksam wird und zur Selbstverlöschung führen soll. Der Brandschutz wur-

de bisher vorwiegend durch bromierte organische Verbindungen, wie z.B. Pentabromdephenylether, erreicht. Diese Brandschutzmittel stehen jedoch unter dem Verdacht, karzinogen zu sein. Bei der Verbrennung von Platinen mit diesen halogenierten Brandschutzmitteln besteht die Gefahr der Bildung von polychlorierten und polybromierten Dibenzodioxinen und Dibenzofuranen [23].

Die genannten Brandschutzmittel dürfen für die Herstellung in Deutschland nicht mehr verwendet werden, können aber in Produkten aus dem Ausland enthalten sein.

Aus dem Platinenschrott werden Metalle wie Kupfer, Aluminium, Gold und Edelmetalle zurückgewonnen.

5.6.2. Aufarbeitung der Platinen

Die Verarbeitung des Platinenschrotts erfolgt in mehreren Stufen. Zunächst werden die Platinen einer mechanischen Vorbehandlung unterzogen. Diese dient der Vergrößerung der spezifischen Oberfläche der Materialien und der Lockerung von Materialverbünden [17]. Bei der anfänglichen Zerkleinerung in Shreddern oder Hammermühlen, Schneidmühlen oder Granulatoren muss sichergestellt sein, dass das Material nicht zu heiß wird und schmilzt. Über Siebe, Sichter, Zyklone, nasse und magnetische bzw. elektrostatische Trennverfahren wird das Gut in seine Bestandteile zerlegt. Aus der erzeugten Metallmischfraktion werden metallurgisch die reinen Sekundärmetalle als Handelsprodukt zurück gewonnen [24].

5.7. Elektrolytkondensatoren

Elektrolytkondensatoren werden getrennt erfasst und entsorgt, weil alte oder ausländische Produkte polychlorierte Biphenyle (PCB) enthalten können. PCB sind hoch giftig und dürfen nach Internationalem Datensicherheitsblatt aufgrund ihrer Persistenz unter keinen Umständen in die Umwelt freigesetzt werden (Halbwertzeiten zwischen 10 und 100 Jahre). Da es kein wirtschaftliches Verfahren gibt, zwischen PCB-haltigen und nicht PCB-haltigen Kondensatoren zu unterscheiden, wird eine Mischfraktion aller Elektrolytkondensatoren ab einer Größe (Durchmesser oder Kantenlänge) > 25 mm als gefährlicher Abfall eingestuft. (Behandlungsgrundsätze für Elektroaltgeräte im Bundesabfallwirtschaftsplan, 1968).

Die Entsorgung dieser Mischfraktion erfolgt nach der PCB/PCT-Abfallverordnung (Verordnung über die Entsorgung polychlorierter Biphenyle, polychlorierter Terphenyle und halogenierter Monomethyldiphenylmethane, PCBAbfallV). Danach sind die entsprechenden Bauteile zu entfernen, getrennt zu halten und in zugelassenen Anlagen getrennt zu entsorgen (Zulassung nach § 4 des BlmSchG oder § 31 Abs. 2 des Krw-/AbfG und Beseitigung nach festgelegten Verfahren D8, D9, D10, D12 oder D15 nach Anhang II A des Krw-/AbfG).

5.8. Kabel und Trafos

Kabel bestehen vor allem aus Kupfer und Kunststoff (z.B. PVC; PP). Nach optischer Sichtung werden sie zerkleinert (z.B. in Schneidmühlen) und mittels Windsichtung und Lufttrenngerät in Metall und Kunststoff getrennt [25]. In Trafos ist ein hoher Kupferanteil und Eisen enthalten. Diese Fraktionen sind entsprechend den bereits vorgestellten Methoden zu entsorgen.

6. Rechtliche Grundlagen und betriebliche Umsetzung

Für die Entsorger von LCD-Geräten sind eine Reihe wichtiger Gesetze maßgebend, die den Umgang mit dieser Fraktion regeln.

Auf europäischer Ebene ist es zum einen die EU-Richtlinie 2002/96/EG auch als WEEE-Richtlinie bekannt (Waste Electrical and Electronic Equipment). Zum anderen die EG-Richtlinie 2002/95/EG auch als RoHS (Restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment) bekannt. Die WEEE-Richtlinie befasst sich mit der Reduktion der zunehmenden Menge an Elektronikschrott aus nicht mehr benutzten Elektro- und Elektronikgeräten. Das Ziel der Richtlinie ist es durch eine erweiterte Herstellerverantwortung für die Produkte die zunehmende Menge an Elektronikschrott zu vermeiden, zu verringern sowie umweltverträglich zu entsorgen.

Die WEEE Direktive der EU unterscheidet die folgenden Produktgruppen:

- 1. Große Haushaltgeräte (Backofen, Kühlschrank usw.)
- 2. Kleine Haushaltgeräte (Toaster, Staubsauger usw.)
- 3. Büro & Kommunikation (PC, Drucker, Telefon, FAX usw.)
- 4. Unterhaltungselektronik (TV, HiFi, portabler CD-Player usw.)
- 5. Leuchtmittel (vor allem Fluoreszenz-Röhren)
- 6. E-Werkzeug (Bohrmaschine, Rasenmäher usw.)
- 7. Spiel- & Freizeitgeräte (Modelleisenbahn, Fitnessmaschine usw.)
- 8. Medizinische Geräte und Instrumente
- 9. Überwachungsgeräte
- 10. Automatische Ausgabesysteme (Fahrkartenautomat usw.)

Die RoHS befasst sich mit der Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten. Das Ziel ist dabei, im Zuge der massiven Ausweitung von Wegwerfelektronik äußerst problematische Bestandteile aus der Produktion zu verbannen. Von der Richtlinie betroffen sind die folgenden Substanzen:

- 1. Blei
- 2. Quecksilber
- 3. Cadmium
- 4. Sechswertiges Chrom
- 5. Polybromierte Biphenyle
- 6. Polybromierte Diphenylether

Auf nationaler Ebene werden die oben genannten Richtlinien im Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) umgesetzt.

Dieses Gesetz legt Anforderungen an die Produktverantwortung nach § 22 des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes für Elektro- und Elektronikgeräte fest. Es bezweckt vorrangig die Vermeidung von Abfällen von Elektro- und Elektronikgeräten und darüber hinaus die Wiederverwendung, die stoffliche Verwertung und andere Formen der Verwertung solcher Abfälle, um die zu beseitigende Abfallmenge zu reduzieren sowie den Eintrag von Schadstoffen aus Elektro- und Elektronikgeräten in Abfälle zu verringern. Das Ziel bis zum 31. Dezember 2006 war es durchschnittlich mindestens vier Kilogramm Altgeräte aus privaten Haushalten pro Einwohner pro Jahr getrennt zu sammeln.

Elektro- und Elektronikgeräte im Sinne des Satzes 1 sind insbesondere die in Anhang I des ElektroG aufgeführten Geräte. Die Liste entspricht den Produktgruppen der WEEE-Richtlinie.

Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz ist das zentrale Gesetz des deutschen Abfallrechts. Ziel des Kreislaufwirtschaftsgesetzes ist es, den Ressourceneinsatz je Erzeugniseinheit zu minimieren. Hierbei kann für die Umweltpolitik in Anlehnung an § 4 des Gesetzes folgende Zielhierarchie gegeben werden:

- Vermeidung
- vor Verminderung
- vor Verwertung
- vor Beseitigung.

Das KrW-/AbfG wird ergänzt durch eine ganze Reihe von Rechtsverordnungen, die aufgrund von entsprechenden Ermächtigungsgrundlagen des KrW-/AbfG ergangen sind. Sie dienen in der Regel dazu, die Bestimmungen des KrW-/AbfG für jeweils ganz bestimmte Materien zu konkretisieren und zu vervollständigen

7. Literaturverzeichnis

- [1] http://www.bitkom.org/de/markt_statistik/64086_60845.aspx; Stand März 2011
- [2] http://www.empa.ch; Stand März 2011
- [3] DBU-Projekt; Entwicklung einer Demontagesicherheitswerkbank für die Sekundärrohstoffgewinnung, Juni 2010
- [4] Ifa Gestis Stoffdatenbank
- [5] http://www.izu.bayern.de/praxis/detail_praxis.php?pid=0201010100298, Stand März 2011
- [6] http://www.sed-fernseher.eu/images/lcd-schema.jpg
- [7] http://www.flatscreens.ch/Listen/Technik.htm, Stand April 2011
- [8] Gabriel, R.: Behandlungsmöglichkeiten für definierte Bauteile aus Elektroaltgeräten, Studie i.A. des BMLFUW, Österreich
- [9] Martin, R., Simon-Hettich, B., Becker, W.: Möglichkeiten der Verwertung von LCDs; Merck KgaA; Generalversammlung des Fachverbandes VREG Recycling, April 2004
- [10] Lightcycle Retourlogistik und Service GmbH, Broschüre; Stand Oktober 2009
- [11] http://www.osram.de/osram_de/Ueber_uns/Gesellschaft_und_Umwelt_-_Global_Care/Umweltbewusstes_Entsorgen, Stand April 2011
- [12] Recycling International, Ausgabe 2, März 2011
- [13] http://recyclingportal.eu; Stand Oktober 2009
- [14] http://heraeusedelmetallhandel.de/de/home/Homepage_ Edelmetallhandel.aspx, Stand März 2011
- [15] Reddy, R. G. (1987): Precious Metalls 1987, Proc. Of the 11th Int. Prec. Met. Inst. Conf., pp. 177ff., IMPI, Boulder, Colorado, USA, 1987
- [16] Hagelüken, C. (2001): Autoabgaskatalysatoren Grundlagen Herstellung Entwicklung – Recycling – Ökologie, Kontakt & Studium, Band 612, Renningen, 2001
- [17] Angerer, G.: Recyclingpraxis Elektronik, Kap.: Rückgewinnung der Edelmetalle, ISBN 3-8249-0204-4
- [18] http://www.alu.ch/Recycling; Stand März 2011
- [19] BMBF-Projekt "Nachhaltige Metallwirtschaft Hamburg", Effizienzgewinne durch Kooperation bei der Optimierung von Stroffströmen in der Region Hamburg, Mai 2000
- [20] http://www.recyclingportal.eu/artikel/26177.shtml; Stand März 2011
- [21] Rohr, M.: Recyclingpraxis Elektronik, Erkennungskriterien, in Tiltmann / Schüren, Verlag TÜV Rheinland
- [22] Willenberg, B.: Physikalische und chemische Aufbereitungsverfahren für Kunststoffe, in Werner Nickel, Recycling Handbuch, VDFVerlag

- [23] Schmidt, K. G.: Recyclingpraxis Elektronik, in Tiltmann / Schüren, Verlag TÜV Rheinland
- [24] Angerer, G.: Technologien zur Schrottrückgewinnung aus Platinenschrott, in Tiltmann / Schüren, Recyclinghandbuch Elektronik, Verlag TÜV Rheinland
- [25] Kettler, H.-J., Kabel und Leitungen, in: Werner Nickel, Recyclinghandbuch, VDI-Verlag

Abfallschlüssel / Fraktionen

Abfallschlüssel gemäß Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung-AVV)

Abfall	Abfallschlüssel	Abfallbezeichnung	Überwachungsbedürftigkeit
Kabel	17 04 11	Kabel mit Ausnahme derjeni- gen, die unter 17 04 10 fallen	
	16 02 16	aus gebrauchten Geräten ent- fernte Bestandteile mit Aus- nahme derjenigen, die unter 16 02 15 fallen	
Edelstahl	19 12 02	Eisenmetalle	
Eisenmetalle	19 12 02	Eisenmetalle	
Kupfer	19 12 03	Nichteisenmetalle	
Leiterplatten	16 02 16	aus gebrauchten Geräten ent- fernte Bestandteile mit Aus- nahme derjenigen, die unter 16 02 15 fallen	
Aluminium	19 12 03	Nichteisenmetalle	

		gebrauchte Katalysatoren, die	
		Gold, Silber, Rhenium, Rhodi-	
		um, Palladium, Iridium oder	
		Platin enthalten (außer 16 08	
Katalysatoren	16 08 01	07)	
		* gebrauchte Katalysatoren,	
		die gefährliche Übergangsme-	
	40.00	talle oder deren Verbindungen	
	16 08 02	enthalten	*gefährlich
		gebrauchte Katalysatoren, die	
		Übergangsmetalle oder deren	
Katalysatoren	16 08 03	Verbindungen enthalten, a.n.g.	
		* gebrauchte Katalysatoren,	
	16 08 05	die Phosphorsäure enthalten	* gefährlich
		* gebrauchte Katalysatoren,	
		die durch gefährliche Stoffe	
	16 08 07	verunreinigt sind	* gefährlich
		anorganische Abfälle mit Aus-	
		nahme derjenigen, die unter	
Graphit	16 03 04	16 03 03 fallen	
		aus gebrauchten Geräten ent-	
		fernte Bestandteile mit Aus-	
		nahme derjenigen, die unter	
Kondensatoren	16 02 16	16 02 15 fallen	

16.02.09	* Transformatoren und Kon-	
10 02 03	derisatoren, die i Ob entraiten	gerannen
17 04 07	gemischte Metalle	
19 12 04	Kunststoff und Gummi	
	 * aus gebrauchten Geräten entfernte gefährliche Bestand- 	
16 02 15	teile	* gefährlich
	aus gebrauchten Geräten ent- fernte Bestandteile mit Aus- nahme derjenigen, die unter	
16 02 16	16 02 15 fallen	
19 12 02	Eisenmetalle	
16 02 16	aus gebrauchten Geräten ent- fernte Bestandteile mit Aus- nahme derjenigen, die unter 16 02 15 fallen	
16 02 16	aus gebrauchten Geräten ent- fernte Bestandteile mit Aus- nahme derjenigen, die unter 16 02 15 fallen	
	19 12 04 16 02 15 16 02 16 19 12 02 16 02 16	densatoren, die PCB enthalten 17 04 07 gemischte Metalle 19 12 04 Kunststoff und Gummi * aus gebrauchten Geräten entfernte gefährliche Bestandteile aus gebrauchten Geräten entfernte Bestandteile mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 02 16 19 12 02 Eisenmetalle aus gebrauchten Geräten entfernte Bestandteile mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 02 16 10 02 15 fallen aus gebrauchten Geräten entfernte Bestandteile mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 02 16 aus gebrauchten Geräten entfernte Bestandteile mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 02 16 aus gebrauchten Geräten entfernte Bestandteile mit Ausnahme derjenigen, die unter

		* getrennt gesammelte Elektro-	
		lyte aus Batterien und	
Natronlauge	16 06 06	Akkumulatoren	* gefährlich
	06 02 04	* Natrium- und Kaliumhydroxid	* gefährlich
		* getrennt gesammelte Elektro- lyte aus Batterien und	
Kalilauge	16 06 06	Akkumulatoren	* gefährlich
	06 02 04	* Natrium- und Kaliumhydroxid	* gefährlich
	40.00.00	* getrennt gesammelte Elektro- lyte aus Batterien und	
Phosphorsäure	16 06 06	Akkumulatoren	* gefährlich
	06 01 04	* Phosphorsäure und phos- phorige Säure	* gefährlich
Gold	19 12 03	Nichteisenmetalle	
Silber	19 12 03	Nichteisenmetalle	
Platin	19 12 03	Nichteisenmetalle	
Messing	19 12 03	Nichteisenmetalle	
		aus gebrauchten Geräten ent- fernte Bestandteile mit Aus- nahme derjenigen, die unter	
Polytetrafluorethylen (PTFE)	16 02 16	16 02 15 fallen	

Glaskeramik	16 03 04	anorganische Abfälle mit Aus- nahme derjenigen, die unter 16 03 03 fallen	
Künstliche Mineralfasern	16 03 04	anorganische Abfälle mit Aus- nahme derjenigen, die unter 16 03 03 fallen	
		* anderes Dämmmaterial, das aus gefährlichen Stoffen be- steht oder solche Stoffe enthält	