Entsorgung von Flachbildschirmen in der Schweiz

Schlussbericht

März 2011

EMPA
Materials Science & Technology

Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa
Lerchenfeldstrasse 5
CH-9014 St. Gallen

Bearbeitung: H. Böni, R. Widmer

SWICO recycling

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis ... 3
Abbildungsverzeichnis ... 3
Abkürzungsverzeichnis ... 4
Zusammenfassung ... 5
1 Einleitung ... 6
1.1 Ausgangslage ... 6
1.2 Zielsetzung der Studie ... 6
2 Grundlagen ... 7
2.1 Flachbildschirmtechnologien ... 7
2.2 Bauteile von Flachbildschirmen ... 8
2.3 Rechtliche Grundlagen ... 10
2.3.1 Europa ... 10
2.3.2 Schweiz ... 10
3 Zusammensetzung und Inhaltsstoffe von Flachbildschirmen ... 12
3.1 LCD-Bildschirme ... 12
3.1.1 Hauptkomponenten ... 12
3.1.2 Schad- und Wertstoffe ... 13
3.2 Plasma-Bildschirme ... 18
3.2.1 Hauptkomponenten ... 18
3.2.2 Schad- und Wertstoffe ... 18
3.3 OLED-Bildschirme ... 19
3.3.1 Hauptkomponenten ... 19
3.3.2 Schad- und Wertstoffe ... 19
4 Mengen und Frachten ... 20
4.1 Bisherige Entwicklung ... 20
4.1.1 Verkaufszahlen Schweiz 2000-2008 ... 20
4.1.2 Entsorgte Mengen 2006-2009 ... 20
4.2 Künftige Entwicklung ... 22
4.2.1 Technologieentwicklung ... 22
4.2.2 Prognose entsorgte Mengen Schweiz 2012-2020 ... 23
4.3 Quecksilber ... 24
4.4 Indium ... 24
5 Sammlung und Transport ... 25
6 Entsorgung ... 26
6.1 Übersicht ... 26
6.2 Verbrennung in KVA ... 27
6.3 Mechanische Verarbeitung ... 28
6.3.1 Verarbeitungsversuch ... 28
6.3.2 Kompaktanlagen ... 30
6.4 Manuelle Zerlegung ... 30
6.5 Rückgewinnung von Indium ... 34
6.6 Zwischenlagerung ... 34
7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen ... 35
7.1 Schlussfolgerungen ... 35
7.2 Ziele einer künftigen Verarbeitung von Flachbildschirmen ... 36
7.2.1 Umweltrechtliche Prinzipien und Grundsätze ... 36
7.2.2 Tendenzen auf globaler und europäischer Ebene ... 37
7.2.3 Tendenz in der Schweiz ... 37
7.3 Anpassung der SWICO-SENS Verarbeitungsvorschriften ... 38
Literaturverzeichnis ... 39

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die gebräuchlichsten Flachbildschirmtechnologien 7
Tabelle 2: MAK-Werte und Kurzzeit-Grenzwerte der SUVA für Quecksilberemissionen (SUVA 2009) 11
Tabelle 3: Zusammensetzung von LCD-Bildschirmen (Resultate Batchversuch September 2009) 12
Tabelle 4: Globale, anthropogene Quecksilberemissionen (Pirrone and et al. 2010) 13
Tabelle 5: Analyse des Quecksilbergehaltes in CCFL-Röhrchen 14
Tabelle 6: Schichtdicke, ITO- und Indium-Gehalt in LCD 17
Tabelle 7: Zusammensetzung eines 42“-PDP-TV und Vergleich mit dem LCD-TV Mix 18
Tabelle 8: Schichtdicke, ITO- und Indium-Gehalt in Plasma-Bildschirmen 18
Tabelle 9: Schichtdicke, ITO- und Indium-Gehalt in OLED-Bildschirmen 19
Tabelle 10: Verkaufszahlen Schweiz PC-Monitore, TV-Bildschirme und Desktop PC/Laptop 2000-08 20
Tabelle 11: Entsorgte Mengen Schweiz PC-Monitore, TV-Bildschirme und Desktop PC/Laptop 2006-09 20
Tabelle 12: Prognose entsorgte Mengen PC-LCD-Monitore, TV-Flachbildschirme und Laptop 2012-20 23
Tabelle 13: Abschätzung der Quecksilber-Fracht bei einer vollständigen Verbrennung der Flachbildschirme in KVAs 27
Tabelle 14: Versuchsparameter Quecksilberdampfmessungen mechanische Verarbeitung von LCD Modulen mit CCFL Hintergrundbeleuchtung 28
Tabelle 15: Resultate Quecksilberdampfmessungen mechanische Verarbeitung von LCD Modulen mit CCFL Hintergrundbeleuchtung (RUAG, Altdorf/CH) 28
Tabelle 16: Resultate Feststoffanalysen mechanische Verarbeitung von LCD Modulen mit CCFL Hintergrundbeleuchtung (RUAG, Altdorf/CH) 29
Tabelle 17: Übersicht Anbieter und Anlagen zur Verarbeitung von Flachbildschirmen (Stand Oktober 2010) 30
Tabelle 18: Resultate Quecksilberdampfmessungen manuelle Verarbeitung von LCD Flachbildschirmen mit CCFL Hintergrundbeleuchtung 31
Tabelle 19: Resultate Quecksilberbestimmung in Wischproben 31
Tabelle 20: Prognose Volumenbedarf LCD Modul von PC-Monitoren, TV-Flachbildschirmen und Laptops 2012, 2016 und 2020 34

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau eines LCD und eines Plasma-Bildschirmes 8
Abbildung 2: Bauteile von LCD-Bildschirmen 9
Abbildung 3: Zusammensetzung von LCD-Bildschirmen 12
Abbildung 4: Verwendung von Indium 2007 (Tolcin 2008) 15
Abbildung 5: Preisentwicklung von Indium 1936 bis 2010 nach USGS 15
Abbildung 6: Produktion von Indium und Zink 2000 bis 2009 nach USGS 16
Abbildung 7: Geschätzte Reichweiten der weltweiten Indiumreserven nach USGS 16
Abbildung 8: Verkaufszahlen Schweiz Desktop PC Monitore, TV-Bildschirme und PC 2000-2008 [Stück] 21
Abbildung 9: Entsorgte Mengen Schweiz PC-Monitore, TV-Bildschirme und Desktop PC/Laptop 2006-09 [Stück] 21
Abbildung 10: Technologiewechsel von CCFL zu LED Hintergrundbeleuchtung für PC Monitore, TV-Geräte und Laptops (Camaroto 2009) 22
Abbildung 11: Entwicklung der Anteile der verschiedenen Technologien im Lager Schweiz 22
Abbildung 12: Prognose entsorgte Mengen PC-LCD-Monitore, TV-Flachbildschirme und Laptop 2012-20 23
Abbildung 13: Entwicklung des Quecksilberinputs, -outputs und –lagers 24
Abbildung 14: Entwicklung des Indiuminputs, -outputs und -lagers 24
Abbildung 15: Transport von Flachbildschirmen 25
Abbildung 16: Mögliche Entsorgungsoptionen für Flachbildschirme 26
Abbildung 17: Fotos Verarbeitungsversuch mechanische Verarbeitung 29
Abbildung 18: Fotos Verarbeitungsversuch manuelle Demontage 32

Abkürzungsverzeichnis

BAFU	Bundesamt für Umwelt
CCFL	Kaltkathodenfluoreszenzlampe (Cold Cathode Fluorescence Lamp)
CE	Consumer Electronics
CRT	Röhrenbildschirm (Cathode Ray Tube)
EERA	European Electronics Recycling Association
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
FPD	Flachbildschirm (Flat Panel Display)
Hg	Quecksilber
ICT	Informations- und Kommunikationstechnologien
In	Indium
ITO	Indium Zinnoxid (Indium Tin Oxide)
KZW	Kurzzeitgrenzwert
LCD	Flüssigkristallbildschirm (Liquid Cristal Display)
LED	Leuchtdiode (Light Emitting Diode)
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
OLED	Organische Leuchtdiode (Organic Light Emitting Diode)
PbO	Bleioxid
PDP	Plasmabildschirm (Plasma Display Panel)
SUVA	Schweizerische Unfall- und Versicherungsanstalt
Swico	Schweizerischer Wirtschaftsverband der Anbieter von Informations-, Kommunikations- und Organisationstechnik
TS	Trockensubstanz
TFT	Dünnschichttransistor (Thin Film Transistor)
WEEE-Forum	Europäisches Forum der Betreiber kollektiver Rücknahmesysteme für Elektro- und Elektronikgeräte

Zusammenfassung

In der Schweiz wurden im Jahre 2009 über Swico Recycling ca. 300'000 PC LCD-Monitore, ca. 60'000 TV Flachbildschirme und ca. 240'000 Laptops entsorgt. Diese Mengen werden in den kommenden Jahren stark ansteigen. Flachbildschirme sind damit heute die am stärksten wachsende Gerätekategorie innerhalb der von Swico Recycling verarbeiteten Elektronikabfälle.

Die Hintergrundbeleuchtung von herkömmlichen LCD-Flachbildschirmen enthält Quecksilber. Flachbildschirme enthalten in ihrem Aufbau zudem eine oder zwei Schichten aus Indium-Zinnoxid, welche als transparente und dünne Leiter das Metall Indium enthalten. Indium, ein Begleitmetall im Zinkabbau, gilt aufgrund seines geringen Vorkommens in der Erdkruste als seltenes Metall.

In der vorliegenden Studie wird die aktuelle und zukünftige Entsorgung von Flachbildschirmen in der Schweiz dargelegt. Die Studie gibt Angaben zu den verkauften und entsorgten Mengen an Flachbildschirmen, zu deren Zusammensetzung und prognostiziert die künftig zu erwartenden Rücklaufmengen und die damit verbundenen Quecksilber und Indium Flüsse.

Basierend auf den geltenden gesetzlichen Rahmenbedingungen werden mögliche Optionen für eine künftige Entsorgung beurteilt: Die thermische Verwertung in Abfallverbrennungsanlagen (KVA), die manuelle Demontage sowie die mechanische Verarbeitung.

Eine thermische Verwertung führt zu relativ geringfügigen zusätzlichen Quecksilberbelastungen in den KVA. Unter dem Gesichtspunkt des geringen Heizwertes von Flachbildschirmen und des Verlustes vorhandenen wertvollen Metalle ist diese Option jedoch ungeeignet.

Die manuelle Demontage hat sich als möglicher Entsorgungsweg herausgestellt. Pro Stunde können 3-4 Flachbildschirme manuell demontiert werden. Die Anzahl gebrochener Hintergrundbeleuchtungen beträgt bei TV Geräten ca. 20% und bei PC Monitoren unter 5%. Die bei der Zerlegung durch den Bruch von quecksilberhaltigen Hintergrundbeleuchtungen emittierten Quecksilbermengen führen nicht zu Überschreitungen des in der Schweiz geltenden MAK-Wertes von 50 µg/m³.

Bei der mechanischen Verarbeitung ist es möglich, die an die Feststoffe gebundenen Quecksilbermengen in der in die Entsorgung gelangenden Feinfraktion aufzukonzentrieren. Die Anhaftungen an den metallenen Wertstoffen betragen weniger als 1 mg Hg/kg. Die mechanischen Prozesse führen jedoch zu gasförmigen Emissionen im Bereich von schätzungsweise 65-75% der gesamthaft zugeführten Quecksilbermengen. Diese Emissionen erfordern eine geschlossene und unter Unterdruck betriebene Anlage. Derartige Anlagen sind inzwischen verfügbar, entsprechende Abnahmemessungen für die Verarbeitung von Flachbildschirmen stehen jedoch noch aus.

Der ökonomische Wert des gemäß den Modellrechnungen maximal in der Schweiz die Entsorgung gelangenden Indiums beträgt jährlich ca. 66'000 USD. Aus wirtschaftlicher Sicht besteht kein Anreiz für dessen Rückgewinnung. Eine solche kann jedoch aufgrund der Knappheit des Indiums trotzdem sinnvoll werden.

Die Studie empfiehlt, die bestehenden technischen Vorschriften von Swico Recycling und SENS anzupassen und eine thermische Verwertung ganzer, resp. teilzerlegter Flachbildschirme nicht mehr zuzulassen. Bei der manuellen Verarbeitung sind die arbeitshygienischen Anforderungen einzuhalten, eine mechanische Verarbeitung soll nach dem Stand der Technik erfolgen und nur in geschlossenen und mit Unterdruck betriebenen Kompaktanlagen erlaubt sein.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Von 2003 bis 2007 haben sich die weltweiten Verkaufszahlen von Flachbildschirmen (TV Flachbildschirme und PC Monitore) von ca. 85 Mio. auf 230 Mio. Stück nahezu verdreifacht. Für 2012 wird die Zahl auf ca. 670 Mio. Stück geschätzt (Becker 2009).

In der Schweiz wurden im Jahre 2003 49'000 TV-Flachbildschirme verkauft, 2008 waren es 648'000 Stück oder rund 12 mal mehr (SWICO 2008). Im gleichen Zeitraum ging die Anzahl verkaufter TV-Röhrenbildschirme von 308'000 auf 10'000 Geräte zurück (SWICO 2008).

Bei den PC-Monitoren hat gegenüber dem TV Segment der Umstieg auf die Flachbildschirmtechnologie früher stattgefunden: Im Jahre 1999 wurden bereits 162'000 PC-Flachbildschirme verkauft, seit 2004 stagniert die Anzahl bei ca. 800'000 (755-865'000) verkauften Geräten.

Bei den Rechnern hat im gleichen Zeitraum eine eigentliche Trendwende stattgefunden: Während im Jahre 2000 nur ca. jeder Vierte verkaufte PC ein Laptop war, hat 2008 der Anteil verkaufter Laptop PCs die Anzahl verkaufter Desktop Computer überholt. 2009 betrug der Anteil der Laptops an der Gesamtzahl verkaufter Rechner bereits 65%.

Mit der Zunahme der verkauften Anzahl an Flachbildschirmgeräten sind auch die von Swico Recycling zurückgenommenen Mengen stark gestiegen. Der Anteil der PC-Flachbildschirmmonitore an den gesamthaft entsorgten PC Monitoren stieg von 13% im Jahre 2006 auf über 50% im Jahre 2009. Bei den TV-Flachbildschirmen hat sich dieser Anteil im gleichen Zeitraum von 1% auf 16% erhöht. Im Jahre 2009 wurden schätzungsweise rund 300'000 Flachbildschirm PC Monitore, über 60'000 Flachbildschirm TV-Geräte und rund 240'000 Laptops entsorgt. Die Anzahl hat sich damit im Zeitraum 2006-2009 jeweils pro Jahr nahezu verdoppelt. Im vergangenen Jahr dürfte die Anzahl entsorgter Geräte nochmals deutlich gestiegen sein.

Der Technologiewechsel von Röhren- zu Flachbildschirmen bei PC Monitoren und TV Geräten bringt neue Herausforderungen in der Entsorgung mit sich: Die Hintergrundbeleuchtung (Kaltkathodenfluoreszenzlampen oder CCFL) von herkömmlichen LCD-Flachbildschirmen enthält Quecksilber (Hg). Die CCFL haben die Form von dünnen Glasröhrchen. Auch Camcorders, Fotokameras, Audiogeräte, Fax, Kopiergeräte und Printer verfügen über Hintergrundbeleuchtungen mit CCFL. Angesichts des tiefen arbeitshygienischen Grenzwertes für Quecksilber von 50 µg/m³ (MAK-Wert) stellen sich u.a. Fragen betreffend möglicher Freisetzungen von Quecksilber im Recyclingprozess.

Flachbildschirme enthalten in ihrem sandwichartigen Aufbau eine oder zwei Schichten aus Indium-Zinnoxid (ITO), welche als transparente und dünne Leiter das Metall Indium (In) enthalten. Indium, ein Begleitmetall im Zinkabbau, gilt aufgrund seines geringen Vorkommens in der Erdkruste als seltenes Metall. Die zunehmende Nachfrage nach Indium in Elektronik und Photovoltaik hat in den letzten Jahren zu einer starken Preisanstieg geführt. Aufgrund seines begrenzten Vorkommens in der Erdkruste und der feinen Verteilung in Flachbildschirmgeräten stellt sich die Frage nach der Rückgewinnung des Indiums.

1.2 Zielsetzung der Studie

Zielsetzung der vorliegenden Studie ist die Festlegung der künftigen Rahmenbedingungen an eine umweltgerechte und ökonomische Entsorgung von Flachbildschirmen.

Die Studie deckt folgende Fragen ab

Mengen, Zusammensetzung und Frachten

- Aus welchen Bestandteilen setzen sich Flachbildschirme zusammen?
- Welche Mengen an Flachbildschirmen sind in Zukunft zu erwarten und welche Frachten an Quecksilber (Hg) und Indium (In) sind in der Gesamtmenge der Flachbildschirme enthalten?

Manuelle Zerlegung

- Welche Immissionen und Expositionsrisiken bestehen bei der manuellen Entfernung von quecksilberhaltigen CCFL-Hintergrundbeleuchtungen aus Flachbildschirmen?
- Welche Arbeitsplatz-Anforderungen sind an eine manuelle Demontage von Flachbildschirmen zu stellen?

Mechanische Verarbeitung

- Welche Immissionen und Expositionsrisiken bestehen bei der mechanischen Verarbeitung von Flachbildschirmen?
- Wie verteilt sich das Quecksilber auf die verschiedenen aus dem Recyclingprozess hervorgehenden Fraktionen?
- Welche Anforderungen sind an eine mechanische Verarbeitung zu stellen?

Entsorgung in Kehrichtverbrennungsanlagen

- Welche Probleme können bei der Entsorgung von Flachbildschirmen in KVAs entstehen?
- Soll in zukunft eine Verbrennung von unzerlegten oder vorzerlegten Flachbildschirmen in KVAs zugelassen werden

Zwischenlagerung

- Welcher Platzbedarf besteht, wenn die sandwichartigen Panels von Flachbildschirmen zwischengelagert würden und ist eine solche Zwischenlagerung ökonomisch sinnvoll?

2 Grundlagen

2.1 Flachbildschirmtechnologien

Ein Bildschirm ist ein Ausgabegerät oder ein Teil eines Ausgabegerätes auf welchem visuelle Informationen dargestellt werden können (Behrendt, Fichter et al. 2008). Die englische Bezeichnung dafür ist „monitor“, wobei „display“ und „screen“ oft synonym verwendet werden. Im deutschen Sprachgebrauch wird die englische Bezeichnung „monitor“ vor allem für PC Bildschirme verwendet.

Ein Flachbildschirm (englisch: Flat Panel Display oder kurz FPD) ist ein Bildschirm, der eine geringe Bautiefe aufweist. Flachbildschirme lassen sich nach verschiedenen technischen Prinzipien herstellen. Diese können in drei Klassen untergeteilt werden: Projektionsanzeigen, Direktansichtsanzeigen und die schirmlose Anzeigen (Theis 2000). Die in dieser Studie untersuchten Ausgabegeräte kommen alle aus der Klasse der Direktansichtsanzeigen. Sie lassen sich in selbstleuchtende und nicht selbstleuchtende Anzeigen unterteilen. Bei selbstleuchtenden Anzeigen ist die Lichtquelle in der Anzeige integriert, im Gegensatz zu den nicht selbstleuchtenden Anzeigen, welche eine externe Lichtquelle benötigen. Zu letzteren gehören Flüssigkristallbildschirme (LCD) mit Kaltkathodenröhren (CCFL) oder Leuchtdioden (LED) als Hintergrundbeleuchtung sowie Plasmadisplays mit dem Prinzip der Gasentladung. Organische Leuchtdioden-Bildschirme (OLED) hingegen sind selbstleuchtende Anzeigen. Tabelle 1 zeigt eine Zusammenstellung der heute gebräuchlichsten Flachbildschirmtechnologien.

Tabelle 1: Übersicht über die gebräuchlichten Flachbildschirmtechnologien

Kategorien	Häufigste Anwendungen	Hintergrundbeleuchtung
LCD-Bildschirm LCD - Liquid Crystal Display	Desktop PCs, Laptop PCs, TV Geräte	Kaltkathodenfluoreszenzlampen (CCFL) Leuchtdioden (LED)
PDP-Bildschirm PDP - Plasma Display Panel	TV Geräte	Nicht erforderlich
OLED-Bildschirm OLED - Organic Light Emitting Diode	Mobiltelefone, Laptop PCs	Nicht erforderlich

Ein Nachteil von LCD-Bildschirmen mit CCFL Hintergrundbeleuchtung gegenüber Plasma- und Röhrenbildschirmen ist der geringere Kontrastwert und die ungleichmäßigere Ausleuchtung. Der bilderzeugende Flüssigkristall wird mithilfe der CCFL durchleuchtet. Meistens sind dafür mehrere CCFL-Röhrchen notwendig, welche am Rande des Bildschirmes (bei Laptop PCs und PC Monitoren) oder über die gesamte Fläche (bei TV Geräten) nebeneinander angeordnet sind. Um eine regelmäßige Ausleuchtung zu erreichen, nutzt man einen lichtleitenden Kunststoff (Diffusor). Dennoch ist es möglich, dass an den Stellen, wo sich die CCFL-Röhrchen befinden, unterschiedlich helle Bereiche auftreten.

LCD-Bildschirme mit LED-Hintergrundbeleuchtung beheben diesen Nachteil weitgehend, da eine große Anzahl von LED auf der gesamten Fläche des Monitors verteilt werden kann. Zudem besteht die Möglichkeit, die verschiedenfarbigen LEDs einzeln anzusteuern, was erlaubt, einzelne Teile der beleuchteten Fläche, die z.B. ein tiefes Schwarz darstellen sollen, separat zu dimmen, bzw. abzuschalten. Dadurch wird auch ein kontrastreicheres Bild erzeugt. LED sind energiesparender, was beim Betrieb von Laptops einen längeren Akkubetrieb erlaubt. Viele der neuen Laptopmodelle arbeiten bereits mit dieser Technologie, aber auch bei Desktop und TV Flachbildschirmen hat sie mittlerweile Einzug gehalten.

Plasmabildschirme spielen gegenüber LCD-TVs am Markt nur eine untergeordnete Rolle (unter 5%). Zudem werden Plasmabildschirme von den meisten Anbietern erst ab einer Bildschirmdiagonale von 37“ (94 cm) angeboten

OLED (Organic Light Emitting Diode; Organische Leuchtdiode) Bildschirme werden in den nächsten Jahren die LCD Technologie ablösen. Dabei handelt es sich um dünne Glasscheiben oder Plastikfolien, welche mittels Ink-Jet-Technik mit organischen Polymerverbindungen bedruckt und anschließend versiegelt werden. Durch Halbleiterelemente werden OLED zum Leuchten angeregt. OLED-Bildschirme sind extrem dünn, biegsam und daher praktisch überall einsetzbar. Bei kleineren Bildschirmformaten und Geräten mit kürzerer Gebrauchszeit (z.B. Handys, Laptops) wird die OLED-Technologie bereits erfolgreich angewandt. Das größte Problem ist die hohe Empfindlichkeit gegenüber Sauerstoff und Feuchtigkeit, welche das polymere Material durch chemische Reaktionen zersetzen können.

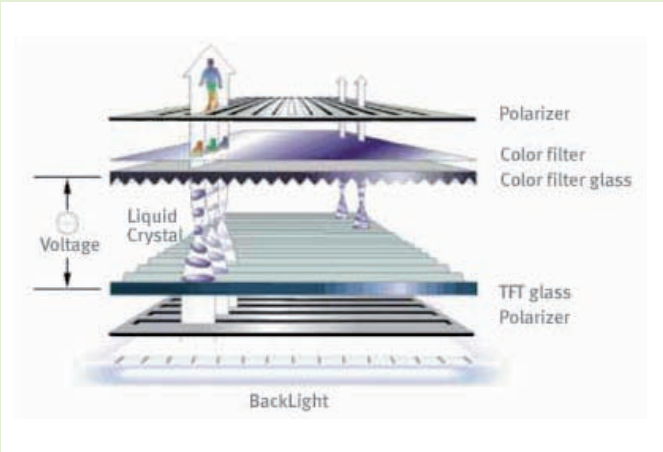
2.2 Bauteile von Flachbildschirmen

Ein LCD PC Monitor, resp. ein LCD TV Bildschirm besteht aus Gehäuse, Standfuss, Kabel, dem LCD-Modul sowie elektronischen Komponenten. Das LCD-Modul besteht aus dem LCD-Panel, der Hintergrundbeleuchtung und elektronischen Bauteilen. Das LCD-Panel besteht aus zwei Kunststoffscheiben, mit der darin eingeschlossenen LCD-Flüssigkeit, verschiedenen Filter- und Diffusorfolien sowie einer transparenten Schutzplatte, welche sandwichartig in einem Rahmen zusammengehalten werden (Abbildung 1 und Abbildung 2).

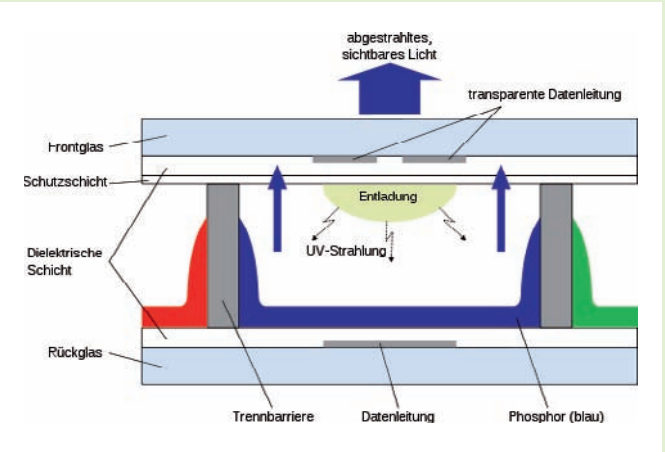
Ein Plasmabildschirm unterscheidet sich vom LCD-Bildschirm dadurch, dass das LCD-Panel durch ein Plasmapanel ersetzt ist. Ein Plasmabildschirm benötigt keine Hintergrundbeleuchtung. Im Gegensatz zum LCD Bildschirm sind die Scheiben im Panel meistens aus Glas (Abbildung 1).

Abbildung 1: Aufbau eines LCD und eines Plasma-Bildschirme

LCD Bildschirm



Plasmabildschirm



Quelle: Wikipedia

Abbildung 2: Bauteile von LCD-Bildschirmen

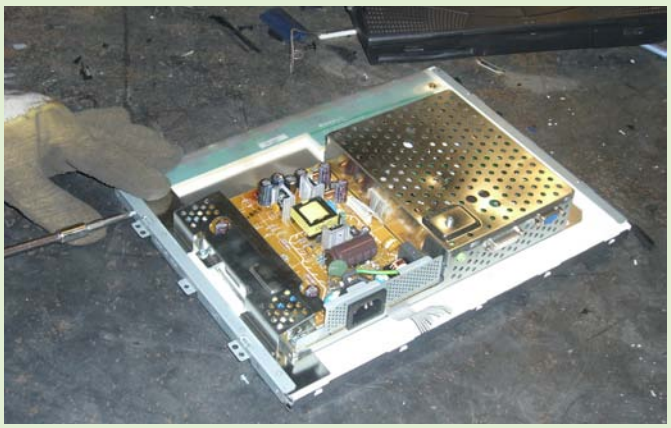


Bild 1: LCD-Modul eines PC Monitors

Bild 3: CCFL Hintergrundbeleuchtung eines LCD-TV

Bild 2: LCD-Panel

Bild 4: LCD-Panel

2.3 Rechtliche Grundlagen

2.31 Europa

WEEE-Richtlinie

Anhang II der Richtlinie 2002/96/EG des europäischen Parlamentes und des Rates vom 27. Januar 2003 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte legt in ANNEX II fest, dass Flüssigkristallanzeigen (gegebenenfalls zusammen mit dem Gehäuse) mit einer Oberfläche von mehr als 100 cm^2 und hintergrundbeleuchtete Anzeigen mit Gasentladungslampen aus getrennt gesammelten Elektro- und Elektronik-Altgeräten entfernt werden müssen.

RoHS-Richtlinie

Die Richtlinie 2002/95/EG des europäischen Parlamentes und des Rates vom 27. Januar 2003 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (RoHS-RL) fordert die Mitgliedstaaten auf sicherzustellen, dass ab dem 1. Juli 2006 neu in Verkehr gebrachte Elektro- und Elektronikgeräte kein Blei, Quecksilber, Cadmium, sechswertiges Chrom, polybromiertes Biphenyl (PBB) bzw. polybromierten Diphenylether (PBDE) enthalten. Am 18. August 2005 wurde im Anhang der RoHS-Richtlinie ein Konzentrationshöchstwert von jeweils 0,1 Gewichtsprozent Blei, Quecksilber, sechswertigem Chrom, polybromierten Biphenylen (PBB) oder polybromierten Diphenylethern (PBDE) je homogenem Werkstoff und von 0,01 Gewichtsprozent Cadmium je homogenem Werkstoff toleriert.

Quecksilber in Lampen ist vom Verbot ausgenommen, wobei die Kommission u.a. vorrangig die Verwendungen von Quecksilber in stabförmigen Leuchtstofflampen für besondere Verwendungszwecke überprüfen muss. Seit 1. Juli 2006 liegt der Hg-Grenzwert in CCFL für neue Geräte bei 5 mg pro Röhrchen.

Bleioxid in Strukturelementen von Plasma- und SED-Displays („surface conduction electron emitter displays“) wie der dielektrischen Schicht von Vorder- und Rückglas, der Bus-Elektrode, dem Black Stripe, der Adresselektrode, der Trenn-Barriere, der Glasfritte für die Befestigung (seal frit) und dem Glasfrittering (frit ring) sowie in Druckpasten, ist zugelassen.

2.3.2 Schweiz

ChemRRV

Nach Anhang 1.7 der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung vom 18. Mai 2005 (ChemRRV, SR 814.81) ist das Inverkehrbringen quecksilberhaltiger Zubereitungen und Gegenstände grundsätzlich verboten. Das Verbot gilt nicht für Zubereitungen und Gegenstände, bei denen nach dem Stand der Technik ein Ersatz ohne Quecksilber fehlt. Im Falle von Elektro- und Elektronikgeräten, worunter auch Beleuchtungskörper fallen, gelangen gemäss der jüngsten Änderung der ChemRRV die Bestimmungen über Elektro- und Elektronikgeräte der Ziffer 5 Anhang 2.16 ChemRRV zur Anwendung. Sie entsprechen materiell jenen der Richtlinie 2002/95/EG (RoHS-RL). Für Bauteile von Geräten, welche Quecksilber und andere geregelte Schwermetalle noch enthalten dürfen, verweist die ChemRRV auf den Anhang der RoHS-RL. Er erhielt mit dem Beschluss 2010/571/EU der Kommission vom 24. September 2010 eine Neufassung. Darin sind u.a. die zulässigen Quecksilber-Gehalte von Leuchten differenziert nach Leistung, Grösse und/oder Lebensdauer im Detail festgelegt.

SUVA-Grenzwerte am Arbeitsplatz

Der Maximale Arbeitsplatzkonzentrationswert (MAK-Wert) ist eine Beurteilungsgrundlage für die Bedenklichkeit oder Unbedenklichkeit am Arbeitsplatz auftretender Konzentrationen von Stoffen. Er bezeichnet die höchstzulässige Durchschnittskonzentration eines gas-, dampf- oder staubförmigen Arbeitsstoffes in der Luft, die nach derzeitiger Kenntnis in der Regel bei Einwirkung während einer Arbeitszeit von 8 Stunden täglich und bis 42 Stunden pro Woche auch über längere Perioden bei der ganz stark überwiegenden Zahl der gesunden, am Arbeitsplatz Beschäftigten die Gesundheit nicht gefährdet.

Die MAK-Werte sind 8-Stunden-Mittelwerte. In der Praxis schwankt jedoch die aktuelle Konzentration der Stoffe in der Atemluft häufig in erheblichem Ausmaß. Die Überschreitung des Mittelwertes bedarf bei vielen Stoffen der Begrenzung, um Gesundheitsschäden zu verhüten. Basierend auf toxikologischen und arbeitshygienischen Kriterien werden kurzzeitige Abweichungen der aktuell gemessenen Raumluftkonzentration über den publizierten auf die Arbeitsschicht bezogenen Grenzwert des Arbeitsstoffes hinsichtlich Höhe, Dauer und Häufigkeit pro Arbeitstag oder Schicht begrenzt.

Für lokal reizende Stoffe entspricht der Kurzzeitgrenzwert für eine 15-minütige Probenahme in der Regel dem Schichtmittelwert. Dies bedeutet, dass der MAK-Wert bei diesen Stoffen, auch über einen Zeitraum von 15 Minuten gemessen, nicht überschritten werden darf. Für Stoffe mit einem Kurzzeitgrenzwert über dem MAK-Wert werden die Kurzzeitgrenzwerte als Mittelwert über 15 Minuten angegeben. Der Abstand zwischen den vier erlaubten Expositionsspitzen pro Schicht soll mindestens eine Stunde betragen. Der 8-Stunden-Mittelwert ist in jedem Falle einzuhalten. Bei starken Reizstoffen kann durch kurzzeitige Konzentrationsspitzen die Wirkungsschwelle überschritten werden.

Die SUVA hat MAK-Werte sowie die Kurzzeitgrenzwerte für Quecksilber (Hg) festgelegt (vgl. Tabelle 2). Der MAK-Wert für Quecksilber in der Schweiz beträgt 50 $\mu g/m^3$, während er auf europäischer Ebene bei 20 $\mu g/m^3$ festgelegt wurde (SCOEL May 2007).

Tabelle 2: MAK-Werte und Kurzzeit-Grenzwerte der SUVA für Quecksilberemissionen (SUVA 2009)

	MAK-Wert mg/m³	**Kurzzeit-Grenzwert** mg/m³
Quecksilber (Dampf u. Aerosol)	0.05	-
Quecksilberverbindungen, organische (als Hg berechnet)	0.01 **e**	0.4
Quecksilberverbindungen, anorganische (als Hg berechnet)	0.1 **e**	0.8 **e**

e = einatembarer Staub; Unter einatembarem Staub versteht man die Gesamtheit der Partikel in der Atemluft, welche durch Mund und Nase eingeatmet werden können.

SWICO-SENS Verarbeitungsvorschriften

In den technischen Vorschriften zur Entsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten von Swico Recycling und SENS vom 10. Juni 2009 sind bezüglich quecksilberhaltigen Komponenten und Flüssigkristallanzeigen folgende Bestimmungen festgehalten:

Allgemeine technische Vorschriften (Auszug)

D.6.1 Quecksilberhaltige Komponenten sind grundsätzlich zu entfernen und Quecksilberemissionen sind auf geeignete Weise zu verhindern. Die Komponenten sind unter Einhaltung entsprechender Sicherheitsvorkehrungen einer separaten Entsorgung zuzuführen.

Richtlinie 2: IKT und UE-Geräte (Auszug)

1.1 Kaltkathodenfluoreszenzlampen in Flüssigkristallanzeigen grösser als 100 cm² müssen entfernt und einer fachgerechten Verwertung oder Entsorgung zugeführt werden.

1.2 Eine Verarbeitung von Flüssigkristallanzeigen ohne vorherige Entfernung der Kaltkathodenfluoreszenzlampen ist nach Rücksprache mit den Kontrollorganen möglich, sofern sichergestellt ist, dass keine in den Kaltkathodenfluoreszenzlampen enthaltenen Schadstoffe, insbesondere Quecksilber, auf die im Verfahren erzeugten Fraktionen verteilt werden und die Schadstoffe einer fachgerechten Verwertung oder Entsorgung zugeführt werden.

1.3 Bei der Entfrachtung und Verarbeitung von Flüssigkristallanzeigen muss dafür gesorgt werden, dass die Schadstoffemissionen - insbesondere die Quecksilberemissionen - so niedrig gehalten werden, dass sich daraus weder eine Beeinträchtigung der Umwelt noch der Gesundheit der Mitarbeiter ergibt.

Richtlinie 3: Leuchtmittel (Auszug)

1.3 Recyclingbetriebe, welche Leuchtmittel entsorgen, verfügen über die technischen und organisatorischen Voraussetzungen um Leuchtmittel so zu behandeln, dass eine möglichst vollständige Rückgewinnung der schadstoffhaltigen Leuchtschicht und eine möglichst vollständige Verwertung der Leuchtmittelbestandteile erfolgen.

2.1 Die Arbeitsschritte und Anlagen zur Aufbereitung von Leuchtmitteln sind so auszulegen, dass die Emissionen von gas- und staubförmigem Quecksilber sowie anderer Schadstoffe aus der Leuchtschicht so niedrig wie möglich sind.

2.2 Die Anlagen sind mit geeigneten Rückhaltesystemen auszurüsten und so zu betreiben, dass die Funktionstüchtigkeit ständig überprüft werden kann.

2.3 Recyclingbetriebe müssen über Industriestaubsauger mit funktionstüchtigen Aktivkohlefiltern sowie verschließbaren Gebinden für quecksilberhaltige Fraktionen und Leuchtmittelbruch verfügen.

2.4 Fraktionen die direkt oder über eine weitere Aufbereitung einer stofflichen Verwertung zugeführt werden, dürfen folgende Quecksilbertotalgehalte (Hg) pro kg Trockensubstanz (TS) nicht überschreiten:

Glasfraktionen:	5 mg/kg
Metallfraktionen:	10 mg/kg
Andere Fraktionen:	10 mg/kg

4.1 Die Luftemissionen von Quecksilber aus Produktionsräumen und Anlagen mit Prozessabluft sind kontinuierlich zu überwachen, so dass erhöhte Emissionen durch Betriebsstörungen oder technische Defekte jederzeit erkannt werden können.

4.2 Es hat eine regelmäßige Kontrolle der Immissionen an den kritischen Arbeitsplätzen nach Massgabe der Ergebnisse und Anordnung der arbeitsrechtlichen Vollzugsinstanzen zu erfolgen. Zusätzlich sind die Mitarbeiter an exponierten Arbeitsplätzen mindestens einmal pro Jahr medizinisch auf Quecksilberaufnahme und Exposition zu untersuchen

3 Zusammensetzung und Inhaltsstoffe von Flachbildschirmen

3.1 LCD-Bildschirme

3.1.1 Hauptkomponenten

LCD-Bildschirme bestehen sowohl bei TV Geräten wie bei PC Monitoren überwiegend aus Metallen und Kunststoffen (Abbildung 3 und Tabelle 3).

Abbildung 3: Zusammensetzung von LCD-Bildschirmen

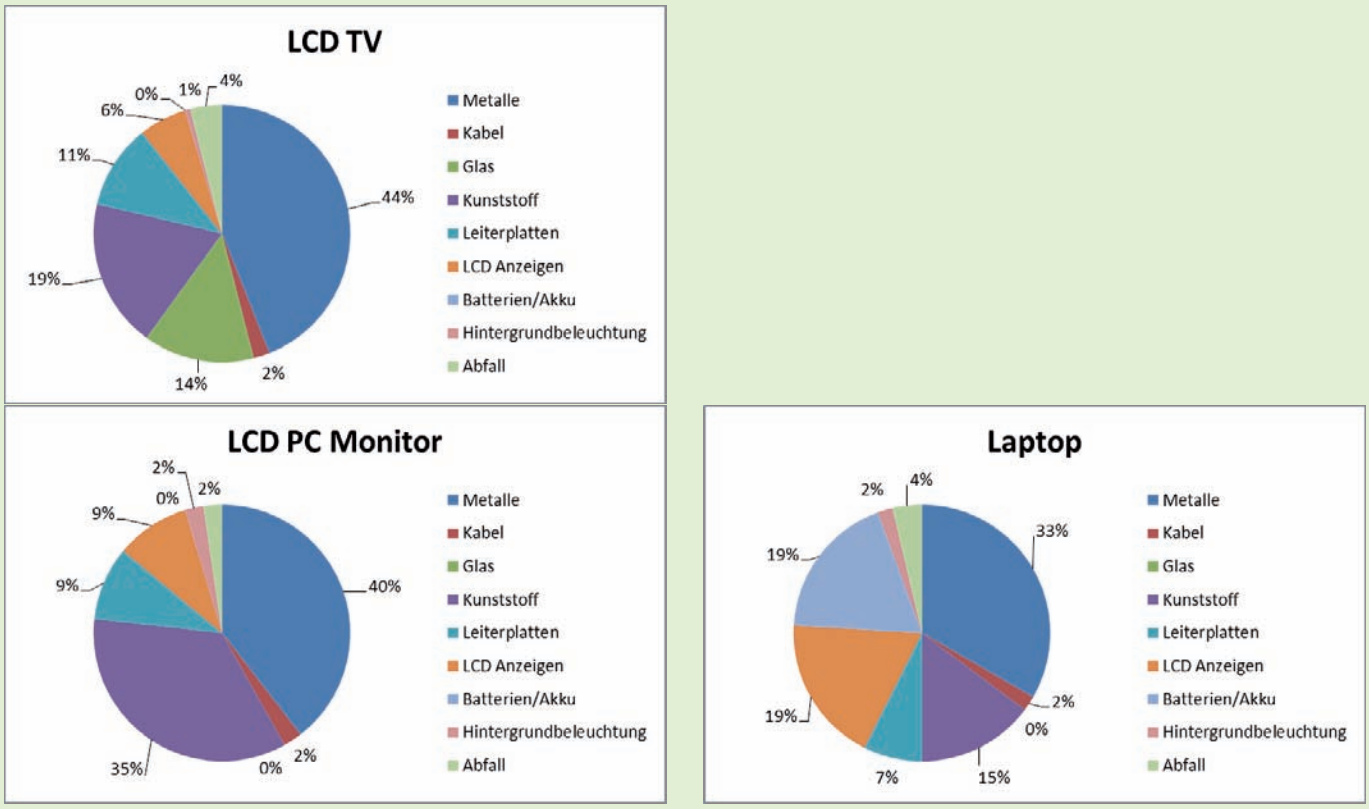


Tabelle 3: Zusammensetzung von LCD-Bildschirmen (Resultate Batchversuch September 2009)

	LCD PC Monitor		LCD TV		Laptop	
Zusammensetzung	[%]	[kg]	[%]	[kg]	[%]	[kg]
Metalle	39	1.7	44	6.6	35	0.9
Kabel	2.5	0.1	1.5	0.3	1	0.05
Glas	-	-	14	2.1	-	-
Kunststoff	36.5	1.5	18.5	2.8	14.5	0.4
Leiterplatten	8.5	0.4	11	1.6	6.5	0.2
LCD Anzeigen	9.5	0.4	6	0.9	18.5	0.5
Batterien/Akku	-	-	-	-	19.5	0.5
Hintergrundbeleuchtung	1	0.1	1	0.1	1	0.05
Abfall	3	0.1	4	0.6	4	0.1
Total	**100**	**4.3**	**100**	**15.0**	**100**	**2.7**
Anzahl Geräte zerlegt	*182*		*57*		*119*	

Quecksilber

Eigenschaften, Vorkommen und globale Flüsse

Quecksilber ist das einzige Metall des Periodensystems, welches bei Normalbedingungen flüssig ist. In der Erdkruste findet man Quecksilber in Gebieten mit ehemaliger vulkanischer Aktivität, am häufigsten in Form des Minerals Zinnober (HgS). Hauptabbaugebiete sind China, Kirgistan, Russland, Slowenien, Spanien und die Ukraine, wobei China aktuell rund 60% der jährlichen Abbaumenge liefert. Quecksilber findet in unterschiedlichen Bereichen Anwendung. Flüssigkeits- und Kontaktthermometer nutzen die hohe und zur Temperatur proportionale thermische Ausdehnung von Quecksilber. Quecksilberschalter (seit 2005 in der EU verboten) nutzen Quecksilber aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit und der hohen Oberflächenspannung. In der Zahnmedizin findet Quecksilber Anwendung als Zahnfüllmittel in Form eines Silberamalgams. Quecksilber wird auch in Gasentladungslampen eingesetzt, zu denen Leuchtstofflampen, Kompaktleuchtstofflampen und Kaltkathoden-Fluoreszenzlampen (CCFL) gehören.

Quecksilber und seine Verbindungen können die Funktion von Enzymen und Strukturproteinen im menschlichen Körper beeinträchtigen. Die Vergiftungsbilder sind je nach Substanz sehr unterschiedlich, wobei das zentrale Nervensystem das empfindlichste Zielorgan ist.

Der bedeutendste Aufnahmepfad von elementarem Quecksilber ist die Inhalation von Quecksilberdämpfen. Diese werden zu 80% in der Lunge zurückgehalten, wo das Quecksilber in den Blutkreislauf gelangt.

Zweiwertige anorganische Quecksilberverbindungen führen bei einer oralen Aufnahme zu schweren Verätzungen der Mundhöhle, des Rachens und der Speiseröhre sowie zu Übelkeit und blutigem Erbrechen. Im Magen-Darm-Trakt können anorganische Quecksilberverbindungen zu einem Kreislaufkollaps, Schock und dem Tod führen. Die kleinste tödliche Menge liegt beim Menschen bei etwa 3 – 15 mg pro kg Körpergewicht.

Bei den organischen Quecksilberverbindungen ist die hohe Toxizität des Methylquecksilbers von großer Bedeutung, da sich dieses in der Nahrungskette, vor allem in Fisch, anreichert. Methylquecksilber schädigt das zentrale Nervensystem und kann bei hohen Belastungen zu Krämpfen und spastischen Lähmungen, sowie zur Erblindung, Taubheit und einer verzögerten mentalen Entwicklung führen. Bei den organischen Quecksilberverbindungen ist die chronische Vergiftung durch kleine Mengen, die über längere Zeit täglich eingenommen werden, die größte Gefahr (Gesundheit 2010).

Tabelle 4: Globale, anthropogene Quecksilberemissionen (Pirrone and et al. 2010)

Quelle	Quecksilber-emission (t/Jahr)	Anteil
Verbrennung von Kohle und Öl	810	35%
Lokaler Goldabbau	400	17%
Metall-Herstellung (ohne Eisen)	310	13%
Zementherstellung	236	10%
Abfallentsorgung	187	8%
Natronlauge-Herstellung	163	7%
Quecksilber-Herstellung	50	2%
Roheisen- und Stahl-Herstellung	43	2%
Kohleflözen-Feuer	32	1%
Vinyl Chlorid Monomer-Herstellung	24	1%
Andere	65	3%
Total	***2320***	100%

Die Quellen anthropogener Quecksilberemissionen sind zahlreich und reichen von der Verbrennung von Kohle und Öl als Haupt Emittenten über den lokalen Goldabbau, der Metall- und Zementherstellung zur Abfallentsorgung und zu Spezialprozessen (vgl. Tabelle 4). Aufgrund einer Schätzung der EU geht man für 2006 von einer in LCD Hintergrundbeleuchtungen enthaltenen Quecksilbermenge allein für Europa von 2.8 t aus, zusätzlich zu 4.3 t in Leuchtstoffröhren (Huisman, Magalini et al. 2008).

Quecksilber in der Schweiz

In der Schweiz haben die Quecksilberemissionen in den letzten Jahren stark abgenommen. Betrug der gesamtschweizerische Quecksilber-Ausstoß im Jahre 1985 7’800 kg, so wurden im Jahr 2005 noch 1’100 kg emittiert (Hügi M and et al. 2008). Eine der Hauptquellen von Quecksilber-Emissionen sind nach wie vor die Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA), obwohl deren Anteil in den letzten Jahren abgenommen hat. Im Jahr 1985 wurden aus den schweizerischen KVA 4’400 kg Hg emittiert, was 56% der totalen Hg-Emissionen entsprach, im Jahr 2005 waren es noch schätzungsweise 290 kg Hg oder noch 26% der totalen Hg-Emissionen (Hügi M and et al. 2008). Der Rückgang ist auf den Erfolg der Stoffverordnung, auf freiwillige Massnahmen oder Vereinbarungen sowie den Betrieb von Separatsammelsystemen für Batterien zurückzuführen (Morf 2006). Weitere Quecksilberemissionsquellen sind Metallschmelzen und Krematorien, wobei Krematorien schätzungsweise 40 bis 80 kg Hg pro Jahr emittieren (Rietmann). Über den Klärschlamm werden jährlich rund 1 g Hg pro Tonne Trockensubstanz (TS) entsorgt, was bei 210’000 t TS Klärschlamm jährlich rund 210 kg Hg ergibt[1].

[1] wobei ca. ¼ des Klärschlammes heute über KVA entsorgt wird und dieser in der Fracht der KVA bereits enthalten ist

Quecksilber in LCD-Hintergrundbeleuchtungen

Den CCFL-Röhrchen in Hintergrundbeleuchtungen von LCD-Flachbildschirmen wird das Quecksilber gasförmig zudosiert. Das im Betrieb durch den Strom ionisierte Quecksilber gibt UV Licht ab, welches durch die Leuchtschicht in sichtbares Licht umgewandelt wird. Das Quecksilber amalgamiert mit zunehmender Betriebszeit an der Innenseite der Röhrchen, was schließlich zu dessen Ausfall führt. Die Lebensdauer und Helligkeit hängen von der verwendeten Menge Quecksilber ab (Getters 2010).

Es wird davon ausgegangen, dass die CCFL-Röhrchen pro Stück zwischen 4 und 5 mg Quecksilber enthalten (Socolof, Overly et al. 2005), wobei andere Schätzungen von 5 bis 10 mg ausgehen (King County Solid Waste 2008). (McDonnel 2010) geht aufgrund von Herstellerangaben von einem Durchschnitt von 3.5 mg Hg pro Röhrchen aus. Entscheidend ist nicht so sehr die Länge der Röhrchen, sondern deren Anzahl, d.h. kurzen und langen Röhrchen wird in etwa die gleiche Menge Quecksilber zudosiert.

In der vorliegenden Studie wird angenommen, dass die CCFL-Röhrchen von TV Geräten 5 mg und diejenigen von Laptops und Monitoren 3 mg Quecksilber enthalten. Dass die CCFL von Laptops und Monitoren weniger Quecksilber enthalten, als diejenigen der TV Geräte lässt sich damit begründen, dass die meisten TV Geräte mit typischerweise zwischen 450 und 700 cd/m² eine wesentlich höhere Helligkeit aufweisen, als die meisten PC-Monitore und Laptops mit einer Helligkeit im Bereich von 250-300 cd/m² (CNET 2010).

Bei den Fernsehgeräten wird angenommen, dass der mittlere Abstand zwischen den einzelnen CCFL Röhrchen 3 cm beträgt. Die Anzahl CCFL in den TVs leitet sich damit direkt von der Bildschirmdiagonale ab.

Bei den PC Monitoren sind die CCFL meist oben und unten paarweise eingebaut. PC Monitore verfügen damit je nach Bildschirmdiagonale damit über zwei, vier, sechs oder acht CCFL. Laptops verfügen je nach Größe über eine oder zwei CCFL.

Tabelle 5 zeigt die Auswertung einer Quecksilberanalyse von CCFL-Röhrchen aus PC Monitoren. Dabei wurden in der Festphase im Schnitt aus 5 Proben 166 µg/g Hg bestimmt. Über das Gewicht der Proben sowie der Annahme eines verflüchtigten Gasanteils von 50-70% ergibt sich ein Quecksilbergehalt von 1.33-2.63 mg pro Röhrchen. Resultatbestimmend ist die Annahme über den gasförmigen Anteil. Bis heute sind keine Untersuchungen bekannt, in welchen der Quecksilbergehalt von CCFL-Röhrchen sowohl in der festen wie in der dampfförmigen Phase analytisch bestimmt wurde[2].

[2] Eine erste Untersuchung wird 2011 im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) an der Empa durchgeführt werden.

Tabelle 5: Analyse des Quecksilbergehaltes in CCFL-Röhrchen

Analyse Hg-Gehalt in Mischprobe aus verschiedenen Leuchtstoffröhrchen			166	µg/g Hg
Masse der Proben		Min.	3	g
		Max.	15	g
Errechneter Hg-Gehalt pro Probe		Min.	0.50	mg
		Max.	2.49	mg
Errechneter Hg-Gehalt pro Röhrchen	fest	Min.	0.25	mg
	fest	Max.	0.83	mg
Errechneter Anteil gasförmiges entwichenes Hg	bei 50% Gasanteil		1.08	mg
	bei 70% Gasanteil		1.80	mg
TOTAL Hg-Gehalt pro Röhrchen		**Min.**	**1.33**	**mg**
		Max.	**2.63**	**mg**

Quelle: EMPA Prüfbericht Nr. 447'606 „Quantitative Bestimmung von Quecksilber in Leuchtstoffröhren aus Flachbildschirmen" vom 23. Januar 2008

Indium

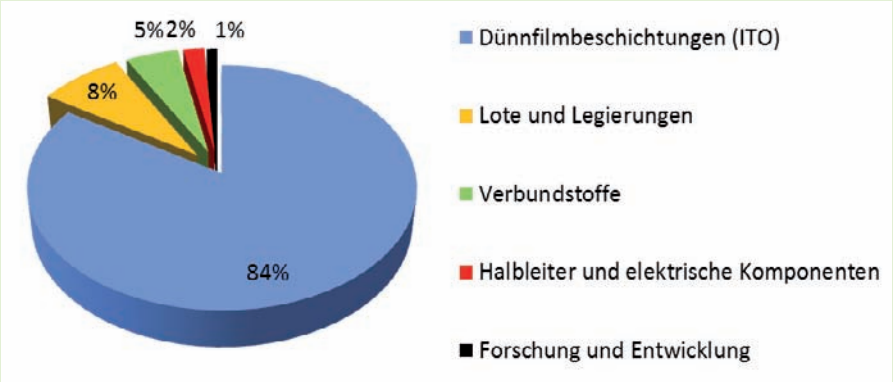
Eigenschaften, Vorkommen und globale Flüsse

Indium, ein Nebenprodukt aus dem Zink- und Bleiabbau, gehört zu den seltenen Elementen. Der Anteil beträgt schätzungsweise 0.05 ppm in der kontinentalen und etwa 0.072 ppm in der ozeanischen Erdkruste. Indium liegt damit direkt hinter Silber auf dem 68. Platz der Elementhäufigkeit (Angerer, Erdmann et al. 2009). Andere Quellen geben den Gehalt an Indium in der Erdkruste auf 0.24 ppm an, was gegenüber Silber einem dreimal größeren Vorkommen entspricht (Jorgenson and George 2005).

Die heute wichtigste Verwendung von Indium ist in der Form von Indium Zinnoxid (ITO) in Flachbildschirmdisplays und in der Photovoltaik. Die Verbindung bildet sich aus 90% In_2O_3 und 10% SnO_2, was einen Massenanteil von 78% Indium im ITO ergibt (Angerer, Erdmann et al. 2009). ITO ist leitfähig wie ein Metall und gleichzeitig transparent, da sichtbares Licht mit einer Wellenlänge von 0.4 bis 0.8 µm nicht reflektiert wird. Ein weiterer Vorteil ist die hitzeabweisende Eigenschaft von ITO. All diese Eigenschaften machen das ITO zum idealen Material für die Herstellung von dünnschichtigen Elektroden für Flachbildschirme. Die im Bereich der Photovoltaik eingesetzten Mengen an Indium sind im Vergleich zur Anwendung in der Flachbildschirmproduktion noch gering. Indium wird dabei als Dünnfilmbeschichtung auf Cadmium-Tellurid Solarzellen aufgebracht (Angerer, Erdmann et al. 2009).

Indium ist auch Bestandteil von Leuchtdioden (LED), z.B. als Aluminium-Indium-Gallium-Phosphid und als Indium-Gallium-Nitride mit unterschiedlichen Farbeigenschaften. Indium kann zudem in Loten enthalten sein, um das giftige Blei zu ersetzen. Weitere Anwendungsfelder sind die Zahnmedizin, Hochtemperaturthermometer und Steuerstäbe in Kernreaktoren. Verbindungen mit Nichtmetallen werden z.B. als Dichtungen und Überzüge zur Verbesserung der Widerstandsfähigkeit der beschichteten Materialien, oder in anderen Anwendungen wie z.B. Spezialbatterien oder Infrarotreflektoren eingesetzt. Als weiterer, jedoch relativ unbedeutender Verbraucher von Indium ist die Forschung und Entwicklung zu nennen (Abbildung 4).

Abbildung 4: Verwendung von Indium 2007 (Tolcin 2008)



Der jährliche Verbrauch von Indium hat sich von 1990 bis 2000 v.a. wegen der Herstellung von Flachbildschirmen durchschnittlich von 123 auf etwa 225 Tonnen fast verdoppelt (Jorgenson and George 2005). Die Preise für Indium reagierten auf diesen gesteigerten Verbrauch und stiegen in dieser Zeitspanne bis auf 400 USD/kg. Der Verbrauch in den darauf folgenden zehn Jahren von 2000 bis 2010 ist weiter angestiegen (Abbildung 6) und hat die Preise im Jahr 2006 auf den zweithöchsten Stand seit der Verwendung von Indium katapultiert.

Die hohen Preise wirkten sich vorübergehend positiv auf das Suchen von Lösungen für das Recycling von Indium aus. Besonders in Japan wurden einige Anstrengungen zur Verhinderung einer Verknappung der Versorgung durch Recycling unternommen.

Der Verbrauch von Indium erreichte im Jahr 2009 rund 600 t weltweit. Die weltweiten Reserven von Indium wurden 2007 vom U.S. Geological Survey auf rund 11'000 t geschätzt (Tolcin 2008), für die Jahre 2008 und 2009 wurden keine Angaben zu den Reserven gemacht (Tolcin 2010).

Abbildung 5: Preisentwicklung von Indium 1936 bis 2010 nach USGS

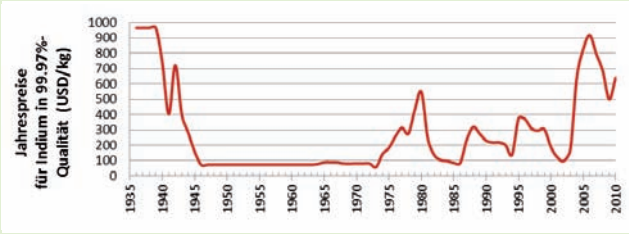


Abbildung 6:
Produktion von Indium und Zink 2000 bis 2009 nach USGS

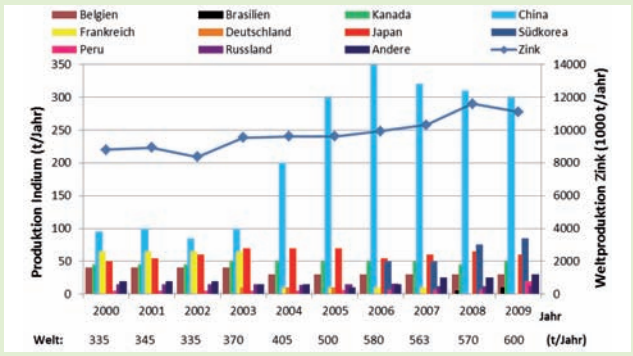
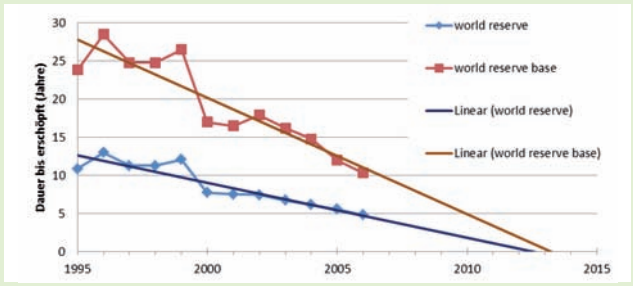


Abbildung 7 zeigt die geschätzten Reichweiten für die aktuellen d.h. technisch und ökonomisch abbaubaren Reserven (world reserve) sowie für die zukünftigen Reserven (world reserve base). Beruhend auf den Schätzungen vor 2007, könnte sich die Erschöpfung der Indiumreserven bereits in den kommenden drei bis vier Jahren abzeichnen. Die Schätzungen für das Jahr 2007 fielen deutlich höher aus, als in den Jahren zuvor. Daraus ergibt sich ein Trendbruch, der bei einem linear verlaufenden Trend für eine längere Reichweite der Reserven spricht, aber aufgrund der grossen Abweichung als sehr ungenau zu beurteilen ist. Die im Jahr 2007 deutlich höher geschätzten Reserven deuten aber auf eine weniger dramatische Verknappung von Indium hin.

Abbildung 7:
Geschätzte Reichweiten der weltweiten Indiumreserven nach USGS



Die Flachbildschirm-Industrie als Hauptabnehmer verbraucht mehr als 50% des primär gewonnenen und rund 80% des weltweit verfügbaren Indiums, inklusive dem aus der Rückgewinnung stammendem Anteil. Das bei der Dünnfilmbeschichtung mit Indium-Zinn-Oxid angewendete Spritzverfahren trägt weniger als 30% des Ausgangsmaterials auf den Träger auf. Die restlichen 70% bleiben als Schleifschlamm oder an den Wänden der Spritzkammer zurück und werden zurückgewonnen. Die Menge an Rückständen beläuft sich auf fast 1'000 t pro Jahr und ist somit doppelt so gross, wie die primär gewonnene Menge an Indium, die durch einen Rückgewinnungskreislauf von weniger als 30 Tagen Dauer weiter verringert werden kann (Mikolajczak 2009).

Die Herstellung von Dünnschichtsolarzellen ist ebenfalls auf Indium angewiesen. Wie bei den Flachbildschirmen wird eine Dünnfilmbeschichtung mit Indium-Zinn-Oxid als Elektrode verwendet. Die Marktanalysten von NanoMarkets erwarten in der Photovoltaikindustrie von 2009 (25 t) bis 2016 (225 t) eine Steigerung des Indiumverbrauchs um beinahe den Faktor neun. Gleichzeitig wird aber ausgesagt, dass ausgehend von den Indiumreserven keine Gefahr für das Marktwachstum der Dünnfilmsolarzellen bestehe (Osborne 2009).

Die Unsicherheiten in Bezug auf die zukünftige Versorgung und die Preisschwankungen für Indium haben die Suche nach Alternativen für Indium-Zinn-Oxid (ITO) in der Flachbildschirm-Industrie vorangetrieben. Das Indium im ITO lässt sich z.B. durch Antimon ersetzen. Das Antimon-Zinn-Oxid (ATO) wird mit einem Verfahren, das dem Tintenstrahldrucken ähnlich ist, auf das Trägermaterial aufgebracht. Ein zweiter möglicher Ersatzstoff sind die aus der Nanotechnologie entwickelten Kohlenstoff-Nanoröhrchen (carbon nanotubes). Die Beschichtungen aus Kohlenstoff-Nanoröhren eignen sich gut für berührungsempfindliche, flexible Bildschirme und Solarzellen. Als dritte Alternative werden leitfähige Polymere wie z.B. das Poly-3,4-ethylendioxythiophen (PEDOT) verwendet, die als gedruckte Elektronik in flexiblen Bildschirmen oder organischen Leuchtdiodenanzeigen verarbeitet werden. Weiter kann das ITO in Solarzellen und in Flachbildschirmen auch durch eine Schicht aus Graphen-Quantenpunkten (graphene quantum dots) oder Zink-Oxid-Nanopulver ersetzt werden. Graphen ist die Bezeichnung für zweidimensionale hexagonale Kohlenstoffkristallstrukturen. Das Zink-Oxid-Nanopulver ist noch nicht marktreif, könnte aber bis in etwa drei Jahren soweit sein. Das in der Halbleiterindustrie eingesetzte Indium-Phosphid lässt sich durch Gallium-Arsenid ersetzen und bei der Herstellung von Kontrollstäben für Atomreaktoren ist Hafnium ein geeigneter Ersatz für Indium. Die als Ersatz für Indium geeigneten Stoffe (Antimon, Gallium, Hafnium und Arsen) sind meist auch seltene Koppelprodukte im Abbau anderer mineralischer Rohstoffe oder wie im Fall von Arsen sehr giftig und dadurch auf lange Sicht auch problematisch.

Indium in Flachbildschirmen

Während in LCD Panels zwei ITO-Schichten eingebaut werden, um die Flüssigkristalle und damit die Leuchtstärke des Bildschirms zu regulieren, wird in den Plasma-und OLED-Bildschirmen nur eine Schicht eingebaut, da nur die dem Betrachter zugewandte Elektrode transparent sein muss.

Die Angaben bezüglich Indiumgehalt und Schichtdicke der ITO-Elektroden in der Literatur sind sehr unterschiedlich. Je nach Angabe wird in die Schichtdicke, den ITO-Gehalt pro m^2 oder den Indiumgehalt pro m^2 umgerechnet. Für die jeweilige Umrechnung wird die Dichte von ITO (1.2 g/cm^3) und der Massenanteil von Indium in ITO (78%) verwendet (Sigma-Aldrich 2010). In der vorliegenden Studie wird angenommen, dass die ITO-Schichtdicke 125nm beträgt, was **234 mg Indium/m^2** ergibt.

Tabelle 6: Schichtdicke, ITO- und Indium-Gehalt

	(Angerer, Erdmann et al. 2009)	(Socolof, Overly et al. 2005)	(Martin 2009)	(Becker, Simon-Hettich et al. 2003)	(Becker, Simon-Hettich et al. 2003)	(Bogdanski 2009)	(Bogdanski 2009)
mg ITO/m^2	4000	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

Flüssigkristalle

In LCD verwendete Flüssigkristalle sind persistente organische Verbindungen, die sowohl Eigenschaften von Flüssigkeiten als auch von Festkörpern aufweisen, d.h. sie sind einerseits mehr oder weniger flüssig, andererseits zeigen sie Eigenschaften wie Doppelbrechung. Flüssigkristalle bestehen aus Phenylcyclohexan und Biphenilen. Es gibt eine große Zahl unterschiedlicher Flüssigkristalle, welche zusammengemischt die jeweils gewünschten physikalischen und optischen Eigenschaften erbringen. Sie sind schwerlöslich und weisen einen niederen Dampfdruck auf. Viele enthalten auch fluorierte Bestandteile.

Flüssigkristallzusammensetzungen sind nicht leicht bioabbaubar (Becker, Simon-Hettich et al. 2003) (Becker and Simon-Hettich 2007). Ein Großteil der Untersuchungen über die Toxizität von Flüssigkristallen wurden bisher von den Herstellern selbst durchgeführt. Die umfangreichen Tests und Analysen bestätigen, dass für die eingesetzten Flüssigkristalle keine akute orale Toxizität, Mutagenität und Karzogenität besteht und diese keine Bioakkumulierbarkeit aufweisen. Flüssigkristalle gelten gemäss deutschem Umweltbundesamtes als unbedenklich: “Basierend auf diesen Untersuchungsergebnissen über die Ökotoxikologie von Flüssigkristallen sehen wir besondere Anforderungen an die Entsorgung von LCDs auf Grund des Anteils an Flüssigkristallen als nicht gerechtfertigt an. 3” Um die mit der WEEE-Richtlinie vorgegebene Recyclingquote von 65%, resp. Verwertungsquote von 75% für Bildschirmgeräte zu erreichen, muss auch das LCD Modul, welches typischerweise etwa 30% an das Gesamtgewicht eines Monitors beiträgt, verwertet werden. Dazu schlägt die Fa. Merck eine metallurgische Verwertung oder eine Industrieabfallverbrennung vor.

[3] Umweltbundesamt, Schreiben vom 16. März 2001

3.2 Plasma-Bildschirme

3.2.1 Hauptkomponenten

PDP TV Geräte sind rund doppelt so schwer wie ein LCD TV mittlerer Grösse. Der grösste Anteil besteht aus Glas, Metallen und der Elektronik, während bei LCD TV Metalle und Kunststoffe den Löwenanteil ausmachen.

Tabelle 7: Zusammensetzung eines 42"-PDP-TV und Vergleich mit dem LCD-TV Mix

	PDP-TV 42" (Baudin 2006)		LCD TV*	
Zusammensetzung	[%]	[kg]	[%]	[kg]
Metalle	34	11.0	44	17.0
Glas	40	12.8	14	5.4
Kunststoff	4	1.3	18.5	7.2
Elektronik	14	4.6	11	4.3
Weitere	8	2.8	12.5	4.8
Total	**100**	**32.5**	**100**	**38.7**

*Resultate Batchversuch, vgl. Tabelle 3

3.2.2 Schad- und Wertstoffe

Bleioxid

Das Glas in einem Plasmabildschirm enthält ca. 0.6 % oder ca. 0.2 kg Bleioxid (PbO) (Baudin 2006). Bei CRT Geräten sind im Konusglas4 rund 20-25% PbO enthalten oder umgerechnet im Durchschnitt 1.0-1.2 kg PbO, d.h. ca. 5 bis 6 mal mehr als in einem Plasmabildschirm.

Indium

In der vorliegenden Studie wird angenommen, dass die ITO-Schichtdicke 125 nm beträgt, was einem Indiumgehalt von 117 mg Indium pro m^2, resp. rund der Hälfte des Indiumgehaltes von LCD Displays entspricht.

[4] ca. ⅓ des Gewichtes einer Bildröhre

Tabelle 8: Schichtdicke, ITO- und Indium-Gehalt in Plasma-Bildschirmen

	PDP-TV (Angerer u. a. 2009)	PDP-TV (Baudin 2006)
mg ITO/m^2	94	202
nm/Schicht	78	168
mg In/m^2	73	158

3.3 OLED-Bildschirme

3.3.1 Hauptkomponenten

Zu den neuartigen OLED-Bildschirmen sind bisher keine Daten und Analysen zu deren Zusammensetzung bekannt.

3.3.2 Schad- und Wertstoffe

Indium

In der vorliegenden Studie wird angenommen, dass die ITO-Schichtdicke 125 nm beträgt, was einem Indiumgehalt von 117 mg Indium pro m², resp. rund der Hälfte des Indiumgehaltes von LCD Displays entspricht.

Tabelle 9:
Schichtdicke, ITO- und Indium-Gehalt in OLED-Bildschirmen

	OLED (Angerer u. a. 2009)	**OLED** (Steinfeldt u. a. 2004)
mg ITO/m²	188	120
nm/Schicht	157	100
mg In/m²	147	94

4 Mengen und Frachten

4.1 Bisherige Entwicklung

4.1.1 Verkaufszahlen Schweiz 2000-2008

Die Anzahl verkaufter PC-Monitore ist im Zeitraum 2000-2008 um rund 75% gestiegen. Der Technologiewechsel von CRT zu LCD Monitoren begann vor der Jahrtausendwende und war 2004 praktisch abgeschlossen (Tabelle 10 und Abbildung 8).

Bei den TV-Bildschirmen begann ein spürbares Wachstum der Verkaufszahlen parallel zum Technologiewechsel nach 2004.

Bei Laptops hat nach 2002 ein starkes Wachstum in den Verkaufszahlen eingesetzt, welches mit dem Technologiewechsel von Desktop PC zu Laptops einherging, während die Anzahl verkaufter Desktop PC praktisch auf gleichem Niveau blieb. Aktuell werden jährlich in der Schweiz rund 1 Mio. Laptops verkauft.

4.1.2 Entsorgte Mengen 2006-2009

Die entsorgte Mengen an PC LCD-Monitoren im Jahre 2009 von rund 300'000 Geräten entspricht in etwa der Anzahl verkaufter Geräte im Jahre 2001. Bei den TV-Flachbildschirmen entspricht die entsorgte Anzahl an Geräten des Jahres 2009 in etwa den Verkaufszahlen von 2003. Bei den Laptops sind im Jahr 2000 in etwa so viele Geräte verkauft worden, wie in 2009 entsorgt wurden (Tabelle 11).

Auffallend ist der starke Anstieg von 2008 auf 2009 der in die Entsorgung gelangten PC LCD-Monitore. Bei den TV Flachbildschirmen ist dieser Anteil seit 2007 kontinuierlich gewachsen. Er wird sich durch den Technologiewechsel auf LED-Hintergrundbeleuchtung in den kommenden Jahren verstärken.

Tabelle 10: Verkaufszahlen Schweiz PC-Monitore, TV-Bildschirme und Desktop PC/Laptop 2000-08

	2000		2002		2004		2006		2008	
	[Stück]	[%]	[Stück]	[%]	[Stück]	[%]	[Stück]	[%]	[Stück]	[%]
PC CRT Monitore	274'000	63	120'000	18	20'000	3	5'000	1	1'000*	0
PC LCD Monitore	162'000	37	540'000	82	780'000	97	755'000	99	762'000	100
TOTAL	**436'000**	**100**	**660'000**	**100**	**800'000**	**100**	**760'000**	**100**	**763'000**	**100**
TV CRT Bildschirme	472'000	99	373'000	99	268'000	71	75'000	15	10'000	2
TV Flachbildschirme	3'000	1	10'000	1	107'000	29	414'000	85	648'000	98
TOTAL	**475'000**	**100**	**374'000**	**100**	**375'000**	**100**	**489'000**	**100**	**658'000**	**100**
Desktop PC	800'000	75	691'000	68	789'000	60	724'000	53	726'000	42
Laptop	265'000	25	322'000	32	518'000	40	649'000	47	994'000	58
TOTAL	**1'065'000**	**100**	**1'013'000**	**100**	**1'307'000**	**100**	**1'373'000**	**100**	**1'720'000**	**100**

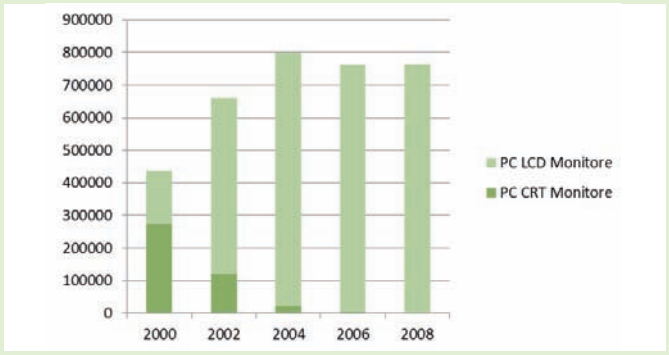
Quellen: SWICO Sekretariat IG CE, Weissbuch; *keine Daten verfügbar, eigene Schätzung

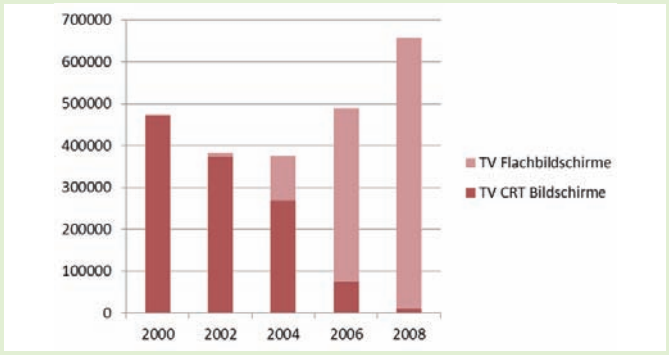
Tabelle 11: Entsorgte Mengen Schweiz PC-Monitore, TV-Bildschirme und Desktop PC/Laptop 2006-09

	Gewicht	2006		2007		2008		2009	
	[kg]	[Stück]	[%]	[Stück]	[%]	[Stück]	[%]	[Stück]	[%]
PC CRT Monitore	17-20	546'000	87	471'000	83	331'000	63	292'000	49
PC LCD Monitore	5.3-6.4	82'000	13	95'000	17	195'000	37	306'000	51
Total PC Monitore		**628'000**	**100**	**566'000**	**100**	**526'000**	**100**	**598'000**	**100**
TV CRT Bildschirme	29-31	234'000	99	258'000	93	293'000	89	327'000	84
TV Flachbildschirme	15	2'000	1	18'000	7	38'000	11	64'000	16
Total TV Displays		**236'000**	**100**	**276'000**	**100**	**331'000**	**100**	**391'000**	**100**
Desktop PC	13-16	536'000	91	443'000	77	351'000	77	471'000	67
Laptop PC	3.2-4.4	53'000	9	129'000	23	106'000	23	237'000	33
Total PC		**589'000**	**100**	**572'000**	**100**	**457'000**	**100**	**708'000**	**100**
TOTAL FPD[1]		**137'000**		**252'000**		**339'000**		**607'000**	

[1] PC LCD Monitore, TV Flachbildschirme und Laptop PC, Quelle: SWICO

Abbildung 8: Verkaufszahlen Schweiz Desktop PC Monitore, TV-Bildschirme und PC 2000-2008 [Stück]





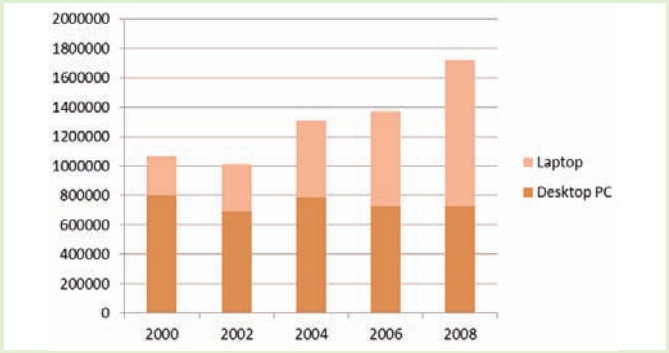
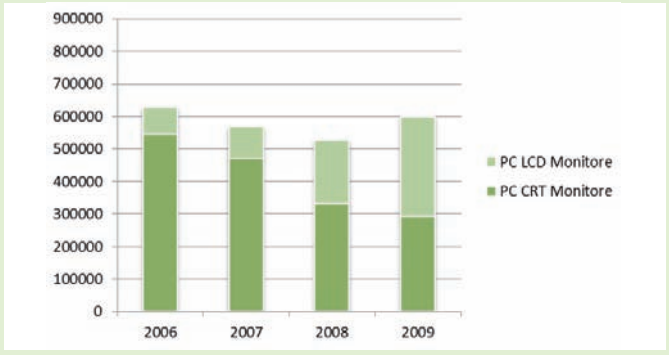
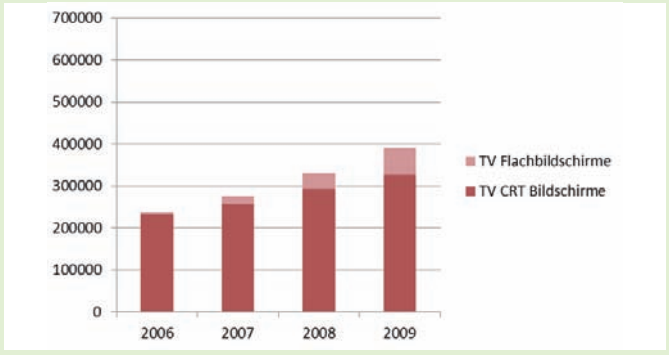
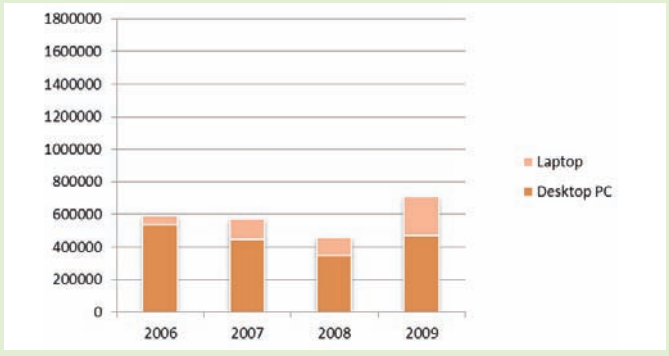


Abbildung 9: Entsorgte Mengen Schweiz PC-Monitore, TV-Bildschirme und Desktop PC/Laptop 2006-09 [Stück]







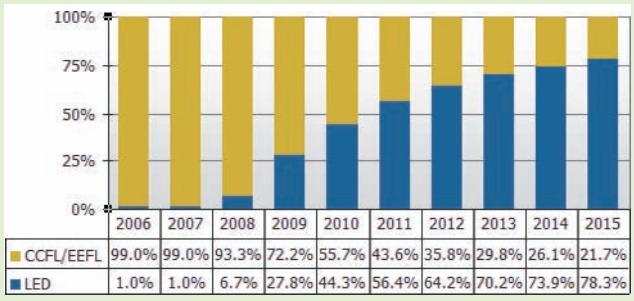
4.2 Künftige Entwicklung

Im Rahmen einer Bachelorarbeit wurde zusammen mit dem Institut für Systemdesign der ETH Zürich ein dynamisches Modell für die Abschätzung der zu entsorgenden Mengen an Flachbildschirmen erstellt (Benedetti and Zumbühl 2010). Die nachfolgend aufgeführten Mengenprognosen sind diesem Bericht entnommen.

4.2.1 Technologieentwicklung

Beim Verkauf ist sowohl bei TV Geräten als auch bei PC Monitoren der Wechsel zur Flachbildschirmtechnologie abgeschlossen. Bei den TV Geräten findet seit 2009 ein Wechsel von der CCFL zur LED Hintergrundbeleuchtung statt. Um den Wechsel von CCFL auf LED Hintergrundbeleuchtungen bis ins Jahr 2030 zu modellieren, wurden die Daten einer Prognose von (Camaroto 2009) verwendet.

Abbildung 10:
Technologiewechsel von CCFL zu LED Hintergrundbeleuchtung für PC Monitore, TV-Geräte und Laptops (Camaroto 2009)



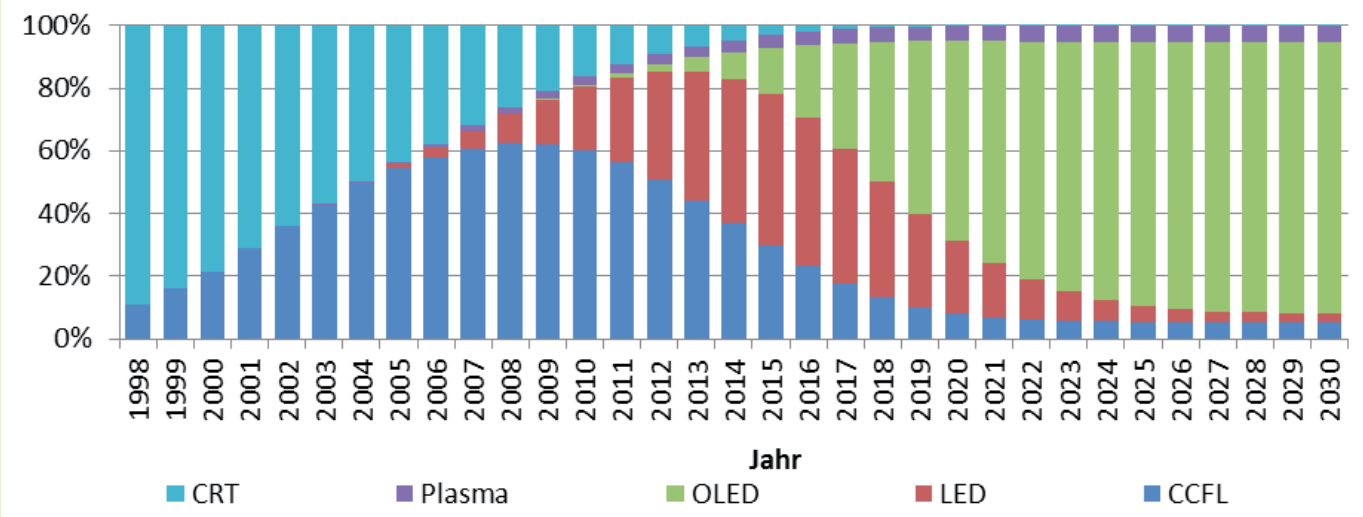
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
CCFL/EEFL	99.0%	99.0%	93.3%	72.2%	55.7%	43.6%	35.8%	29.8%	26.1%	21.7%
LED	1.0%	1.0%	6.7%	27.8%	44.3%	56.4%	64.2%	70.2%	73.9%	78.3%

Quelle: Displaysearch

Für kleine Diagonalen werden bereits Bildschirme in OLED-Technologie angeboten, es ist jedoch noch unbestimmt, wie schnell die OLED-Bildschirme die LCD für größere Flächen und langlebigere Produkte vom Markt verdrängen werden.

Abbildung 11 zeigt die Entwicklung der Anteile der verschiedenen Technologien an der gesamten Lagermenge (Marktdurchdringung) im Zeitraum 1998 bis 2030.

Abbildung 11: Anteile der in der Volkswirtschaft Schweiz gelagerten Flachbildschirmtypen 1998-2030



4.2.2. Prognose entsorgte Mengen Schweiz 2012-2020

Im dynamischen Modell wurden aufgrund der prognostizierten Verkaufszahlen (basierend auf einer angenommenen Marktentwicklung) die jährlichen Lager- und Outputmengen berechnet (Tabelle 12). Die Outputmenge bezeichnet diejenige Menge, welche aufgrund der Lebensdauer der Geräte (Obsoleszenz) aus dem Lager ausgeschieden wird. Die Lebensdauer variiert über die Zeit und ist abhängig von der Art des Gerätes und dessen Gebrauch. Die zeitabhängige Obsoleszenzrate multipliziert mit der Anzahl der in einem bestimmten Jahr verkauften Geräte ergibt die für dieses Jahr summierte Anzahl an Geräten, die als Output in die Entsorgung gelangen. Die mittlere Obsoleszenzrate für PC-Monitore wird im Referenzszenarium mit 5, für TV-Geräte mit 6 und für Laptops mit 3 Jahren angenommen.

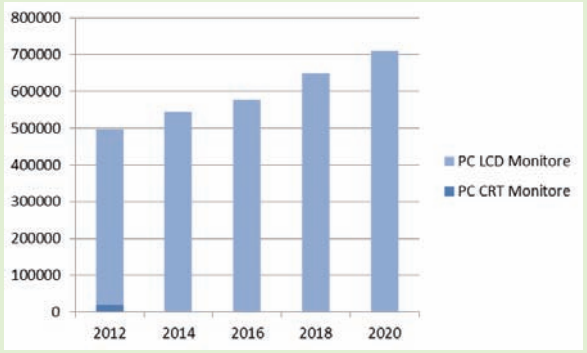
Die in Tabelle 12 dargestellte Outputmenge beschreibt eine theoretische Grösse, da nicht alle aus dem Erstgebrauch ausscheidenden Geräte auch in eine Entsorgung gelangen. Ein grösserer Anteil an Geräten wird zwischengelagert, von einem Zweitnutzer genutzt oder ins Ausland gebracht (über Internethandel, Gastarbeiter o.ä.).

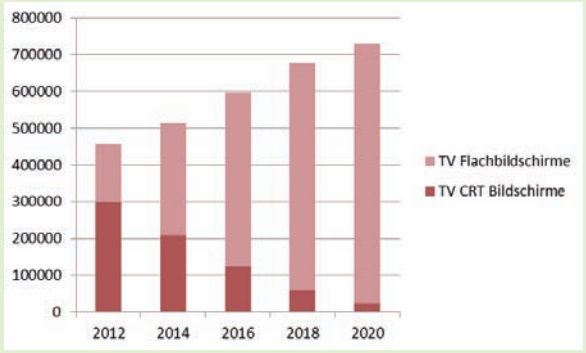
Tabelle 12: Prognose entsorgte Mengen PC-LCD-Monitore, TV-Flachbildschirme und Laptop 2012-20

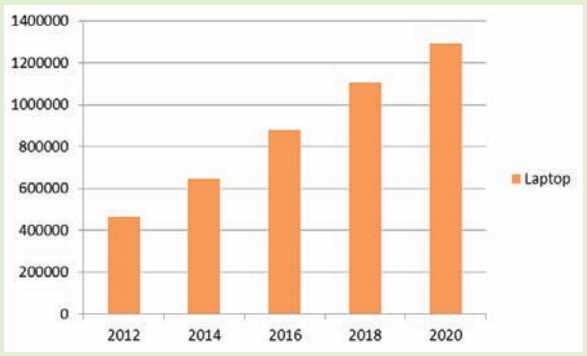
	2012		2014		2016		2018		2020	
	[Stück]	[%]	[Stück]	[%]	[Stück]	[%]	[Stück]	[%]	[Stück]	[%]
PC CRT Monitore	19'000	3	2'000	0	0	0	0	0	0	0
PC LCD Monitore	479'000	97	543'000	100	597'000	100	649'000	100	711'000	100
Total PC Monitore	**498'000**	**100**	**545'000**	**100**	**597'000**	**100**	**649'000**	**100**	**711'000**	**100**
TV CRT Bildschirme	298'000	65	208'000	40	124'000	20	60'000	9	23'000	3
TV Flachbildschirme	158'000	35	306'000	60	474'000	80	616'000	91	706'000	97
Total TV Bildschirme	**456'000**	**100**	**514'000**	**100**	**598'000**	**100**	**676'000**	**100**	**729'000**	**100**
Total Laptops	**465'000**		**654'000**		**876'000**		**1'104'000**		**1'293'000**	
TOTAL FPD[1]	**1'102'000**		**1'503'000**		**1'947'000**		**2'369'000**		**2'710'000**	

[1] PC LCD Monitore, TV Flachbildschirme und Laptop PC; Quellen: (Benedetti and Zumbühl 2010); (Widmer)

Abbildung 12: Prognose entsorgte Mengen PC-LCD-Monitore, TV-Flachbildschirme und Laptop 2012-20







4.3 Quecksilber

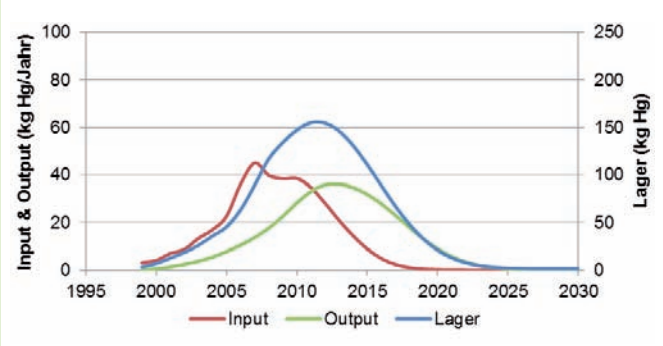
Die Quecksilbermengen, welche in die Entsorgung gelangen, betragen gemäß Modellberechnungen im Jahre 2014 **maximal ca. 36 kg,** wobei rund 20 kg aus den TV-Geräten stammen werden. Im Jahre 2020 liegt diese Menge schätzungsweise noch bei 10 kg. Die maximale Lagermenge beträgt ca. 150 kg (Abbildung 13). Die gesamthaft im Zeitraum 1998-2030 zu entsorgende Quecksilbermenge erreicht 388 kg.

In der Schweiz werden jährlich über die separat gesammelten Leuchtmittel 80 kg Quecksilber einer Entsorgung zugeführt (SENS Fachbericht 2009). Energiesparlampen enthalten im Durchschnitt 4-8 mg Quecksilber. Unter der Annahme einer jährlich zu entsorgenden Menge von 6 Mio. Energiesparlampen (Deutschland: 59.3 Mio.) ergibt sich für die Schweiz eine maximale Quecksilberfracht aus Energiesparlampen von 48 kg/a.

4.4 Indium

Die Indiummengen erreichen ihr Maximum von 115 kg im Jahre 2017 (Abbildung 14). Auch beim Indium stammt der überwiegende Anteil aufgrund der großen Displayflächen aus den TV Geräten. Die maximale Lagermenge beträgt ca. 250 kg. Die gesamthaft im Zeitraum 1998-2030 anfallende Indiummenge erreicht 2'065 kg.

Abbildung 13: Entwicklung des Quecksilberinputs, -outputs und –lagers



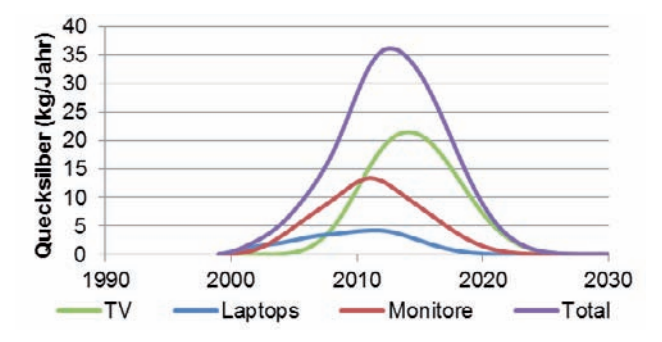
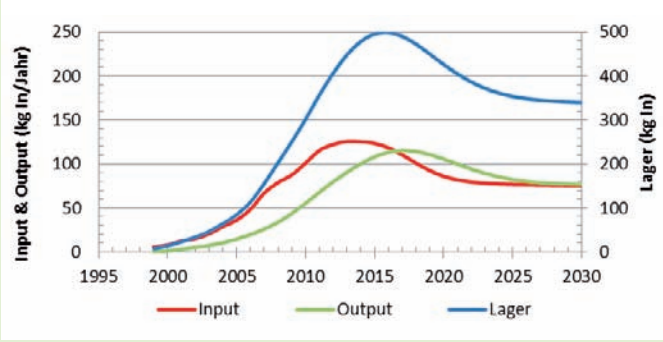
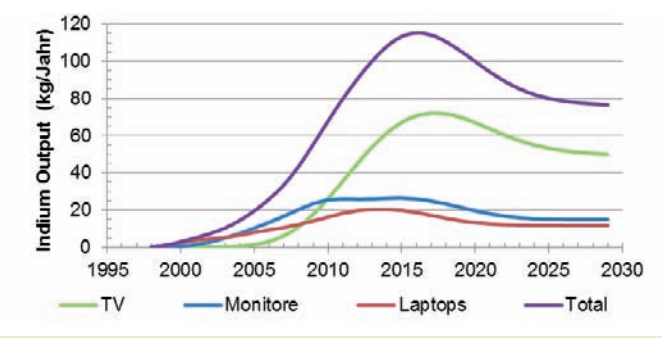


Abbildung 14: Entwicklung des Indiuminputs, -outputs und -lagers





5 Sammlung und Transport

Die Sammlung von Elektronikgeräten der Kategorie 3 (ICT) und 4 (Unterhaltungselektronik) erfolgt in der Schweiz zu ca. 54% über Abgabestellen (Gemeinden), zu je ca. 17-18% über Betriebe und aus dem Handel und zu ca. 10% über die Hersteller. Die Geräte werden von den meisten Abgabeorten gemeinsam mit anderen Geräten in den gleichen Behältnissen (Container, Paletten mit Gitterrahmen) zum Recycler befördert. Nur bei grösseren Abgabestellen und Grossverteilern erfolgt der Transport teilweise gerätespezifisch (Abbildung 15). Durch den gemeinsamen Transport oder eine unsachgemäße Beladung können Geräte beschädigt werden, was zu einem Austritt von Quecksilber aus den Hintergrundbeleuchtungen führen kann.

In der Schweiz wurden bisher keine Messungen von Quecksilberemissionen während der Sammlung oder beim Transport durchgeführt. In Frankreich hat der Systembetreiber „Eco-systèmes“ Messungen bei Transporten von horizontal, resp. vertikal gelagerten Flachbildschirmen gemacht und dabei keine Quecksilberemissionen über der Nachweisgrenze messen können (< 5 µg/m³) (LNE 2010).

Die Vereinigung der Elektrogeräterecycler in Europa (EERA) hat in einer Untersuchung die Quecksilber-emissionen aus beschädigten Flachbildschirmgeräten gemessen (Tromp 2009). Dazu wurden mit einem Kran LCD Displays aus ca. 2.5-4 m Höhe in einen Stahlcontainer gekippt und die dabei auftretenden Quecksilberemissionen gemessen. Die im (geschlossenen) Container gemessenen Konzentrationen erreichten nach ca. 1.5 Stunden ein Maximum von 10 µg Hg/m³, was 5-mal tiefer als der entsprechende MAK-Wert ist. Dabei wurden in rund 30% der Displays eines oder mehrere Hintergrundbeleuchtungen zerstört, insgesamt im Mittel ca. 20%.

Bei der manuellen Zerlegung (vgl. Kapitel 6.4) wurden über eine Versuchsreihe von 58 Flachbildschirmgeräten 3 Stück mit einer oder mehreren defekten Hintergrundbeleuchtungen ermittelt, was einer Bruchrate von ca. 5% bezogen auf die Anzahl der Geräte und < 1% in Bezug auf die Anzahl der Hintergrundbeleuchtungen entspricht. *Aufgrund dieser Resultate kann davon ausgegangen werden, dass Quecksilberemissionen bei Lagerung, Sammlung und Transport von Flachbildschirmen kein arbeitshygienisches Problem darstellen.*

Abbildung 15: Transport von Flachbildschirmen

6 Entsorgung

6.1 Übersicht

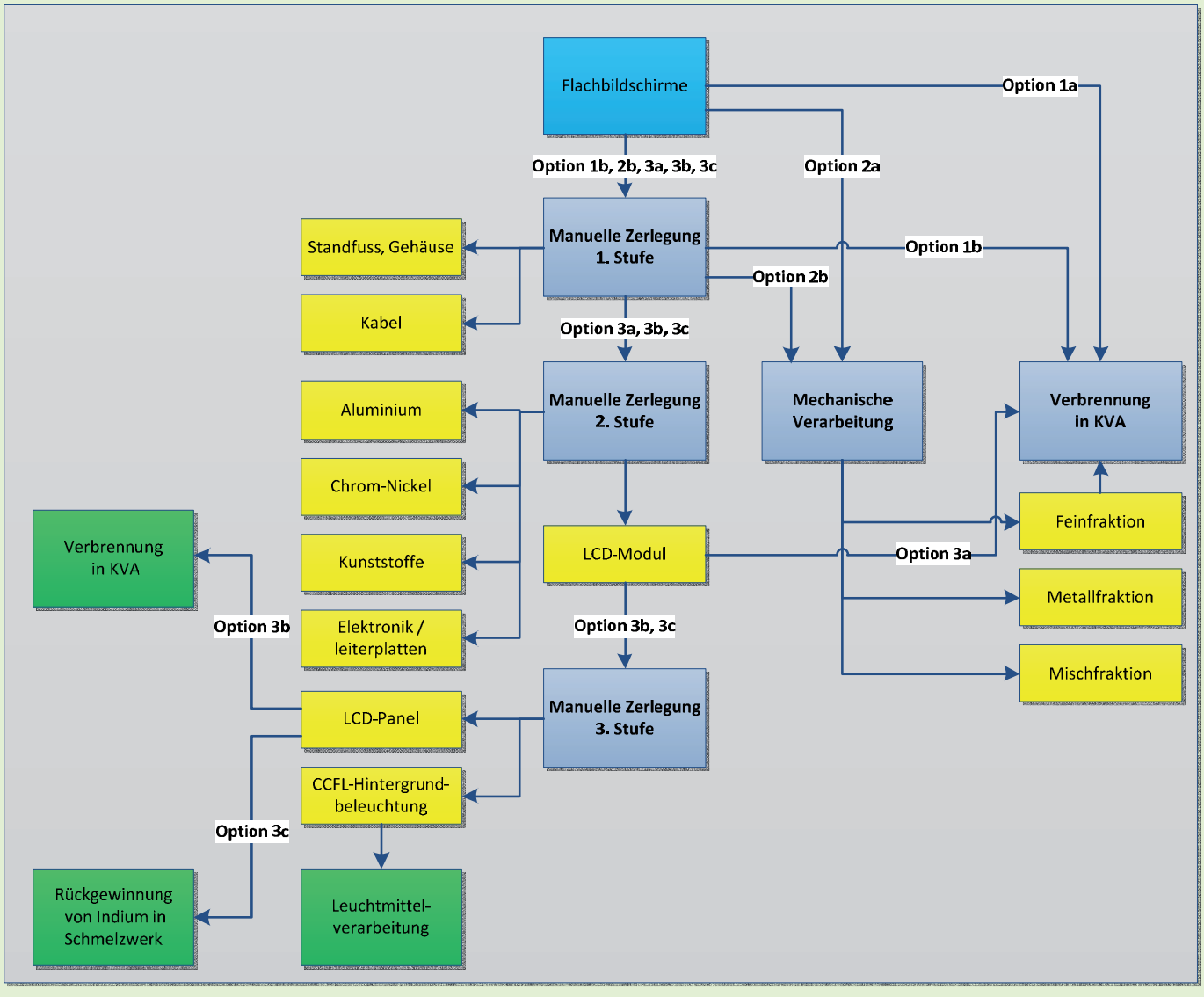
Bei der Entsorgung von Flachbildschirmen können im Wesentlichen drei Optionen unterschieden werden (vgl. Abbildung 16):

- **Option 1: Verbrennung in der KVA,**
  entweder unzerlegt (Option 1a), zerlegt nach einer 1. Zerlegestufe (Option 1b) oder nach einer 2. Zerlegestufe (Option 3a).

- **Option 2: Mechanische Verarbeitung,**
  entweder der unzerlegten Flachbildschirme (Option 2a), resp. nach einer 1. Zerlegestufe (Option 2b).

- **Option 3: Manuelle Zerlegung der Flachbildschirme.**
  Es können 3 Zerlegetiefen unterschieden werden:
  - 1. Stufe (Optionen 1b und 2b):
    Entfernung von Standfuss, Kabel und Gehäuse
  - 2. Stufe (Optionen 3a, 3b und 3c):
    Zur 1. Stufe zusätzliche Zerlegung in Metall- und Kunststoff-fraktionen, Leiterplatten sowie LCD-Modul
  - 3. Stufe (Optionen 3b und 3c):
    Zur 2. Stufe zusätzliche Zerlegung des LCD-Moduls in LCD-Panel und CCFL-Hintergrundbeleuchtung. Das LCD Panel kann zur Rückgewinnung des Indiums in eine Edelmetall-schmelze gelangen (Option 3c), resp. in einer KVA verbrannt werden (Option 3b).

Abbildung 16: Mögliche Entsorgungsoptionen für Flachbildschirme



6.2 Verbrennung in KVA

Einige der Elektroschrottrecyclingbetriebe verbrachten in den letzten Jahren unzerlegte oder teilzerlegte Flachbildschirme in eine KVA. Grund dafür war das Fehlen von Recyclingmöglichkeiten.

Die Geräte, welche zu 35-45% aus Metallen, zu 6.5-11% aus Leiterplatten und zu lediglich ca. 15-40% aus Kunststoffen bestehen, sind schlecht geeignet für eine thermische Entsorgung. Einerseits gehen dabei wertvolle Metalle verloren, andererseits liegt der Brennwert der Geräte deutlich unter dem durchschnittlichen Brennwert von Siedlungsabfällen. Nebst dem schlechten Brennwert der Flachbildschirmgeräte ist aber auch der Verlust des seltenen Metalles Indiums sowie die zusätzliche Quecksilberfracht, welche dadurch den KVA zugeführt wird, problematisch.

Tabelle 13 zeigt eine Abschätzung dieser möglichen zusätzlichen Quecksilberfrachten unter der Annahme, dass im Jahre 2012 alle Flachbildschirme in KVA verbrannt würden. Im Jahre 2008 gelangten ca. 1'379 kg Quecksilber über den Mengenstrom der in allen schweizerischen KVA verbrannten Abfälle (Morf 2006). Geht man davon aus, dass im Jahre 2012 ca. 600'000 Flachbildschirme (FPD) entsorgt werden und dass sich diese Menge zu je 30% auf Laptop und TV-Geräte und zu 40% auf PC-Monitore aufteilt, ergibt sich eine Fracht von insgesamt rund 11 kg Quecksilber, was bezogen auf 1'379 kg rund 0.8% entspricht. In einer Gesamtbetrachtung ist diese zusätzliche Quecksilberbelastung relativ unbedeutend, sie kann jedoch bei einer Konzentration der Verbrennung von Flachbildschirmen auf wenige KVA lokal auch höhere Anteile erreichen.

Tabelle 13: Abschätzung der Quecksilber-Fracht bei einer vollständigen Verbrennung der Flachbildschirme in KVA

		Abfallmenge				**Hg-Fracht**	
		angeliefert	Wasser-	trocken	Gehalt	Fracht	Anteil
		[t angeliefert]	gehalt	[t FS]	[mg/kg FS]	[kg]	
Hauskehrichtmenge	2008	1'997'887	22%	1'558'352	0.64	997.35	72%
Direktanlieferungen	2008	1'052'336	21%	831'345	0.46	382.42	28%
TOTAL		**3'050'223**		**2'389'697**		**1'379.76**	100%
		Anzahl entsorgte FPD 2012				**Hg-Fracht**	
					Gehalt	Fracht	Anteil
			[Stück]		[mg/Stück]	[kg]	
Anteile TV	30%		180'000		40	7.20	66%
Anteil PC-Monitore	40%		240'000		12	2.88	26%
Anteile Laptop	30%		180'000		5	0.9	8%
TOTAL	**100%**		**600'000**			**10.98**	100%
Anteil der Hg-Fracht von Flachbildschirmen bei der Verbrennung in KVA im Vergleich zu Abfall						**0.80%**	

Unter der Annahme, dass die aufgrund der Prognose errechnete Maximalmenge an Quecksilber von 36 kg/a in Verbrennungsanlagen gelangen würde, erhöhte sich der Quecksilberanteil bezogen auf die gesamte Quecksilberfracht auf ca. 2.6%.

6.3 Mechanische Verarbeitung

6.3.1 Verarbeitungsversuch

Am 6. Februar und am 17. August 2010 wurden bei der RUAG in Altdorf im bestehenden Granulator jeweils rund 1.5 Tonnen bis zur 2. Zerlegestufe vorzerlegte Flachbildschirmmodule verarbeitet.

Ziel des Versuches war es, die während der Verarbeitung gasförmig entweichenden Quecksilberimmissionen zu messen, sowie die Quecksilbergehalte in den resultierenden Fraktionen zu bestimmen. Die Messungen der gasförmigen Quecksilberimmissionen im Bereich der Anlage wurden durch die SUVA an gemeinsam festgelegten Messpunkten durchgeführt. Die Bestimmung des Quecksilbergehaltes in den Rückständen erfolgte durch das Labor für Chemische Analytik der EMPA. Um dem erwarteten Einfluss der Umgebungstemperatur auf die gasförmigen Quecksilberemissionen Rechnung zu tragen, wurde der Versuch sowohl in der kalten, als auch in der warmen Jahreszeit durchgeführt. Tabelle 14 zeigt die Parameter der beiden Versuche.

Tabelle 14:
Versuchsparameter Quecksilberdampfmessungen mechanische Verarbeitung von LCD Modulen mit CCFL Hintergrundbeleuchtung

Parameter	Versuch 6. Februar 2010	Versuch 17. August 2010
Menge LCD-Module	1’450 kg	1’518 kg
Anzahl LCD-Module	1’270 Stück	844 Stück
Durchschnittsgewicht	1.14 kg	1.80 kg
Verarbeitungszeit	90 Minuten	70 Minuten
Vearbeitungsleistung	966 kg/Std.	1’301 kg/Std.
Hallentemperatur	8° C	20.3° C
Luftfeuchtigkeit	44% r.F.	57.6% r.F.
Luftdruck	948 hPa	Nicht gemessen

Die beiden Versuche unterschieden sich hinsichtlich der Hallentemperatur (8, resp. 20° C), des Durchschnittsgewichtes der verarbeiteten Module (1.14 gegenüber 1.8 kg; + 60%) sowie der Verarbeitungsleistung (966 zu 1’301 kg/Std.; + 35%). Es kann davon ausgegangen werden, dass beim zweiten Versuch diese drei Parameter die deutlich höheren Hg Immissionen weitgehend begründen (siehe Tabelle 15).

Tabelle 15:
Resultate Quecksilberdampfmessungen mechanische Verarbeitung von LCD Modulen mit CCFL Hintergrundbeleuchtung (RUAG, Altdorf/CH)

Messort		Versuch 6. Februar 2010	Versuch 17. August 2010
		Bereich µg/m³	Bereich µg/m³
Aussen		0	0
Halle		3-7	3-21
Aufgabestelle		0-6	14-28
Ausgang Rotorschere		0-15	5-27
Brikett Ausstoss		4-87	6-725
Granulator Ausgang	Boden	keine Messung	4-15
	Hüft-höhe	keine Messung	6-26
	Kopfhöhe	24-172	3-32
Fe-Fraktion Cont.		4-44	12-168
Non-Fe Fraktion Cont.		5-10	7-93
Reststoffe Cont.		5-39	22-114
Keller fein Box		13-34	19-25
Keller Zyklon Cont.		13-50	19-54

Die höchsten Werte wurden beim zweiten Versuch beim Brikett-Ausstoss, direkt am Container der FE-Fraktion und am Container für Reststoffe gemessen. Bei diesen drei Standorten befinden sich keine fixen Arbeitsplätze, d.h. die MAK-Werte können nicht direkt als Referenz herangezogen werden. Die Messwerte zeigen dennoch, dass lokal deutlich erhöhte Quecksilberkonzentrationen auftreten und dass ein Teil des Quecksilbers gasförmig entweicht.

Abbildung 17: Fotos Verarbeitungsversuch mechanische Verarbeitung

Bild 1: Messung Zellradschleuse Briketts

Bild 2: Messung Rotorschere

Tabelle 16 zeigt eine Zusammenstellung der Resultate der Quecksilberbestimmungen der resultierenden Feststoff-Fraktionen des ersten Versuches. An den Wertstoffen sind ca. 4% des gemessenen Quecksilbers angehaftet, während sich ca. 96% in der Feinfraktion anreichern.

Geht man davon aus, dass ein LCD-Modul ca. 12 mg Quecksilber enthält[5], resultieren bei 1'270 Modulen aus Versuch 1 ca. 15'250 mg Quecksilber, welche schätzungsweise über die Anlage gelangten. Die Differenz zwischen dieser Menge und der in der Fraktionen gemessenen Mengen beträgt 11'663 mg oder 76% der gesamten Quecksilbermenge im Input. Diese „Fehlmenge" ist entweder dampfförmig entwichen und/oder hat sich in der Anlage abgelagert. Es ist auch denkbar, dass die Inputmenge mit 12 mg Quecksilber pro Gerät überschätzt wurde. Dennoch, selbst bei nur 8 mg Quecksilber pro Gerät, beträgt der gasförmige Austritt ca. 65% der gesamten Quecksilbermenge.

[5] Annahme: Ein Modul enthält im Schnitt 4 Röhrchen a 3 mg Hg

Tabelle 16: Resultate Feststoffanalysen mechanische Verarbeitung von LCD Modulen mit CCFL Hintergrundbeleuchtung (RUAG, Altdorf/CH)

Kategorie	Fraktion	Gewicht		Hg-Gehalt		
		[kg]	[Anteil]	[µg/g]	[mg]	[Anteil]
Wertstoffe	Stahlschrott Granulator	135	9.3%	0.90 ± 0.42	122	3.4%
	Aluminiumshredderschrott	121	8.4%	0.14 ± 0.04	17	0.5%
	Trennmaterial Neodym	34	2.4%	0.08 ± 0.04	3	0.1%
Rückstände/	Kehricht Briketts	425	29.4%	6.90 ± 0.08	2'933	81.8%
Feinfraktionen	Stäube Keller	8	0.6%	47.00 ± 4	376	10.5%
	Reststoffe Kunststoff/Metalle	722	50.0%	0.19 ± 0.08	137	3.8%
TOTAL		**1'445**	**100%**		**3'587**	**100%**

6.3.2 Kompaktanlagen

Verschiedene Hersteller bieten Kompaktanlagen zur vollständigen Verarbeitung von Flachbildschirmen an. Gemäß Herstellerangaben soll es auf diesen Anlagen möglich sein, das Quecksilber, welches beim Prozess freigesetzt wird, zurückzuhalten und gleichzeitig verwertbare Metall- und Metall-/Kunststoff-fraktionen zu erzeugen. Die Prozesstechnologie, der erreichte Hg-Abscheidegrad und die Frage, wo im Prozess das Quecksilber akkumuliert wird, ist bei keiner der Anlagen im Detail bekannt (Tabelle 17).

Tabelle 17: Übersicht Anbieter und Anlagen zur Verarbeitung von Flachbildschirmen (Stand Oktober 2010)

Anbieter	Stand
Air Mercury AG, CH-Birrwil	Versuchsanlage bei Lyon; Anlage in Rubigen/CH (Inbetriebnahme 2011)
Galloo N.V., B-Menen	Anlage in Belgien
Récupyl, F-Domène	Anlage in Frankreich
Stena Metall AB, S-Göteborg	Anlage bei der GRIAG Glasrecycling AG in Werder

6.4 Manuelle Zerlegung

Am 17. März 2010 wurden bei einem Zerlegebetrieb der Immark AG Regensdorf Versuche zur manuellen Demontage von Flachbildschirmen durchgeführt.

Der Zerlegebetrieb verfügt seit 2009 über vier Arbeitsplätze, welche für die manuelle Zerlegung der Flachbildschirme hergerichtet sind und welche über eine aktive Absaugung der Arbeitsoberfläche verfügen (Abbildung 19). Während des Versuches wurden kontinuierlich-stationäre (Messgerät EPM), personenbezogene (mit Personen-Dosimeter) und orientierende Messungen (Messgerät Jerome) durchgeführt (Tabelle 18). Um im Bereich der Arbeitsplätze signifikante Quecksilberwerte messen zu können, mussten während des Versuches absichtlich Röhrchen zerbrochen werden.

Die stationäre Messung zeigte über 5.5 Stunden einen mittleren Hg-Wert von 2 µg/m³ (MAK-Wert: 50 µg/m³). Derselbe Wert wurde in einem Fall auch bei der personenbezogenen Messung erreicht, in den übrigen Fällen war der Wert deutlich darunter.

Mit dem orientierenden Messgerät wurden ca. auf Werkplatzhöhe, im unmittelbaren Arbeitsbereich des Zerlegepersonals, 2-7 µg/m³ Hg gemessen. Der höchste Wert wurde beim Fass mit zerbrochenen Leuchtstoffröhrchen gemessen (> 1'000 µg/m³; siehe Bild 8 (Abbildung 19). Bei direktem Ansaugen der austretenden Gases bei einem frisch gebrochenen Röhrchen ergab sich mit dem stationären Messgerät EPM ein Messwert > 1'999 µg/m³, mit dem Messgerät Jerome wurden 86 µg/m³ gemessen.

Generell kann aus den Versuchen gefolgert werden, dass die Quecksilber-Immissionen selbst bei bewusster Zerstörung der Leuchtstoffröhrchen um Größenordnungen unterhalb der MAK-Werte liegen. Das Quecksilber entweicht bei Normalbedingungen offenbar nur langsam aus den Röhrchen; es lagert sich aufgrund des gegenüber Luft höheren spezifischen Gewichtes an tieferen Stellen ab. Über den Alterungsprozess der Geräte erfolgt eine zunehmende Einbindung des Quecksilbers an der Innenseite der Röhrchen, was den Anteil des dampfförmig entweichenden Quecksilbers reduzieren dürfte.

Tabelle 18: Resultate Quecksilberdampfmessungen manuelle Verarbeitung von LCD Flachbildschirmen mit CCFL Hintergrundbeleuchtung

Parameter		Resultat
Hallentemperatur		19° C
Luftfeuchtigkeit		29% r.F.
Luftdruck		966 hPa
Messwert personenbezogen (Personen Dosimeter)	4-h Schicht (bei 3 Personen)	0.06/1/2 µg/m^3
Messwert stationär am Zerlegearbeitsplatz (Messgerät EPM)	Mittelwert 5.5 Stunden	2 µg/m^3
Messwerte orientierend (Messgerät Jerome)	Arbeitsplatz, nach Bruch Leuchtstoffröhrchen	4 µg/m^3
	Arbeitsplatz, unmittelbar nach dem Röhrchenbruch, einige cm entfernt	4-7 µg/m^3
	Arbeitsplatz, ca. 2 min nach dem Röhrchenbruch, einige cm entfernt	2-5 µg/m^3
	Schachtel mit unzerbrochenen Leuchtstoffröhrchen (siehe Bild 7)	2 µg/m^3
	Im Fass mit zerbrochenen Leuchtstoffröhrchen (siehe Bild 8)	> 1'000 µg/m^3
	Oberhalb des Fasses kurz nach dem Entfernen des Deckel	180 µg/m^3
	direkt am frisch gebrochenen Röhrchen (dabei wurde Luft aus dem Röhrchen gesaugt)	> 1'999 µg/m^3 (EPM) 86 µg/m^3 (Jerome)

Zusätzlich zu den Quecksilberdampfmessungen wurden Proben der Staubdepositionen an verschiedenen Stellen entnommen und durch die Abteilung Analytische Chemie der Empa untersucht. Das Sanierungsziel beträgt 0.002 µg/cm^2, die Messwerte lagen ca. um den Faktor 10-20 unterhalb dieser Werte (Tabelle 19) mit Ausnahme des Messortes 5, wo der Messwert leicht über dem Sanierungsziel lag.

Tabelle 19: Resultate Quecksilberbestimmung in Wischproben

Parameter		Resultat
Hallentemperatur		19° C
Luftfeuchtigkeit		29% r.F.
Messort 1	Restaurant/Ding Shop, Boden	0.0001 µg/cm^2
Messort 2	Pausenraum, Boden	0.0001 µg/cm^2
Messort 3	Büro, Arbeitsfläche	< 0.00003 µg/cm^2
Messort 4	Arbeitsplatz Boden	0.0009 µg/cm^2
Messort 5	Arbeitsplatz obere Lüftungsabdeckung	0.0026 µg/cm^2
Messort 6	Quecksilber-Abfallfass, Boden	0.0001 µg/cm^2
Messort 7	Arbeitsplatz mit Lüftung, Arbeitsfläche	0.0006 µg/cm^2

Abbildung 18: Fotos Verarbeitungsversuch manuelle Demontage

Bild 1: Demontage Arbeitsplatz

Bild 2: Absaugvorrichtung

Bild 3: Messgerät „Jerome“

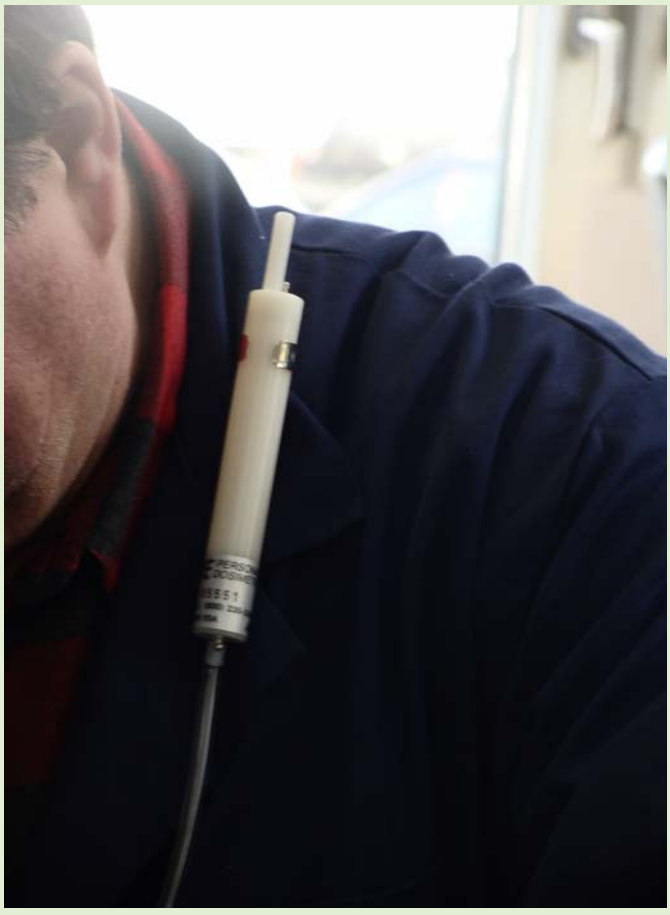


Bild 4: Messung mit Personendosimeter

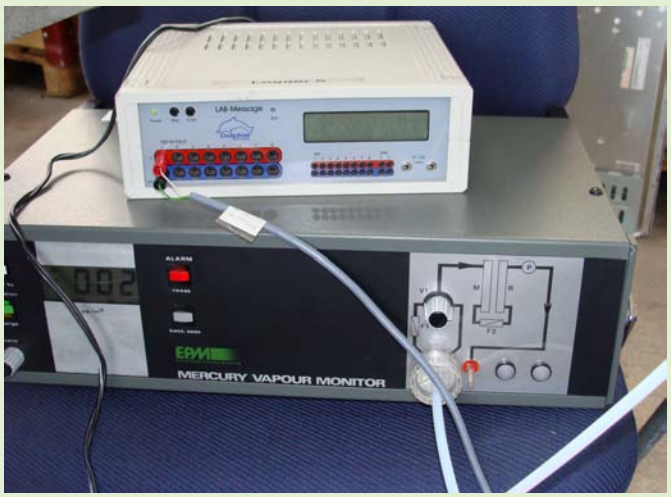


Bild 5: Messgerät „EPM“ zur stationären Hg-Dampfmessung

Bild 6: Hintergrundbeleuchtung TV-Flachbildschirm

Bild 7: Lagerung von intakten Hintergrund-beleuchtungen

Bild 8: Lagerung von zerbrochenen Hintergrundbeleuchtungen

Die aktuelle Verarbeitungsleistung beträgt 25-35 Flachbildschirme pro Arbeitstag6 (8 Std.), resp. 6’250 bis 8’750 Flachbildschirme pro Jahr und Arbeitsplatz (250 Arbeitstage). Geht man davon aus, dass jährlich ca. 600’000 Flachbildschirmgeräte in die Entsorgung gelangen, so ist bei einer vollständigen manuellen Demontage aller Flachbildschirme von einem gesamtschweizerischen Bedarf von 70-100 Zerlegearbeitsplätzen auszugehen. Gegenwärtig bestehen im SWICO und SENS System 85 Zerlegebetriebe mit schätzungsweise ca. 800-1’200 Zerlegearbeitsplätzen, bei welchen eine manuelle Teilzerlegung von Elektro- und Elektronikschrott durchgeführt wird. Der Anteil der alleine für die Flachbildschirmzerlegung benötigten Zerlegearbeitsplätze würde sich somit auf 5-10% der bestehenden Zerlegearbeitsplätze belaufen.

Die bisherigen Betriebserfahrungen zeigen, dass bei TV-Geräten die Bruchgefahr am Höchsten ist, weil bis zu 20 Hintergrundbeleuchtungen entfernt werden müssen. Bei guter Ausbildung der Zerleger und geeignetem Werkzeug erreichen bei TV-Geräten die Bruchraten ca. 20%, während sie PC Monitoren unter 5% liegen, da die Röhrchen meist in Aluschienen eingefasst sind.

[6] Annahme: Im Mittel 15 Minuten pro Flachbildschirm (Mischwert aus PC-Monitor, TV Geräten und Laptop)

6.5. Rückgewinnung von Indium

Bis heute ist in Europa kein technisches Verfahren verfügbar, welches die Rückgewinnung des Indiums aus Flachbildschirmen ermöglicht. Der ökonomische Wert des gemäss den Modellrechnungen maximal in der Schweiz in die Entsorgung gelangenden Indiums beträgt rund 66'000 USD[7], bei einem Maximum von 115 kg In im Jahre 2017. Es stellt sich die Frage, ob dieser Erlös genügend Anreize für die Rückgewinnung des Indiums schafft oder ob die Rückgewinnung des Indiums auf Zuzahlungen angewiesen sein wird.

[7] Preis Indium gemäss www.mineralprices.com; 26. Oktober 2010: USD 576

6.6 Zwischenlagerung

Eine mögliche Lösung, um das Indium für eine spätere Rückgewinnung zur Verfügung zu halten, wäre eine Zwischenlagerung der LCD-Panels. Gemäß Modellrechnungen ist für die Jahre 2012, 2016, resp. 2020 mit folgenden Stückzahlen, resp. benötigen Zwischenlagervolumina zu rechnen:

Tabelle 20: Prognose Volumenbedarf LCD Modul von PC-Monitoren, TV-Flachbildschirmen und Laptops 2012, 2016 und 202

	LCD-Panels	2012		2016		2020	
	[m³/Stück]	[Stück]	[m³]	[Stück]	[m³]	[Stück]	[m³]
PC LCD Monitore*	0.00036	479'000	172	597'000	215	711'000	256
TV Flachbildschirme**	0.00352	158'000	556	474'000	1'668	706'000	2'485
Laptops***	0.00018	465'000	84	876'000	158	1'293'000	233
TOTAL			**812**		**2'041**		**2'974**

Annahmen:
* Breite 30cm, Länge 40cm, Höhe 3mm
** Im Mittel 36" Bildschirmdiagonale: Breite 44cm, Länge 80cm, Höhe 1cm
*** Breite 20cm, Länge 30cm, Höhe 3mm

Würden die LCD-Panels von 2012 bis 2020 gelagert, wäre mit einem Bedarf von ca. 15'000 m³ zu rechnen, was bei einer Lagerhöhe von 10 m eine Hallenfläche von 1'800 m² ergeben würde (inkl. 20% Verkehrsfläche). Bei Fr. 80.-/m²*Jahr ergäben sich jährliche Mietkosten von ca. Fr. 150'000.- oder Fr. 1.35 Mio. über 9 Jahre. Demgegenüber stünden eingesparte Verbrennungskosten über den gesamten Zeitraum von ca. Fr. 0.9 Mio[8], sowie mögliche Erlöse aus dem späteren Verkauf der Panels.

[8] Annahme: spezifisches Gewicht LCD-Panel 300 kg/m³, Verbrennungspreis Fr. 200.-

7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

7.1 Schlussfolgerungen

Mengen an Flachbildschirmen, Quecksilber- und Indiumfrachten

- Die zur Entsorgung anfallenden Mengen an **LCD-Flachbildschirmen** werden in den nächsten Jahren stark anwachsen[9]: Von den aktuell 313'000 PC LCD Monitoren werden die Mengen im Jahre 2014 auf ca. 550'000 pro Jahr ansteigen. Bei den TV Geräten wird die Anzahl von gegenwärtig ca. 80-100'000 auf ca. 300'000 im Jahre 2014 ansteigen. Bei den Laptops, wo aktuell ca. 240'000 pro Jahr entsorgt werden, wird die Menge auf rund 650'000 pro Jahr ansteigen. Damit wird die umweltgerechte und sichere Entsorgung von Flachbildschirmen zu einer der zentralsten Herausforderungen für das Elektronikschrottrecycling der nahen Zukunft.

- Mit der zunehmenden Anzahl von verkauften **Geräten mit LED-Hintergrundbeleuchtung,** resp. mit OLED-Technologie wird die Menge der zurückgenommenen Flachbildschirme mit CCFL-Hintergrundbeleuchtung in schätzungsweise ca. 4-6 Jahre kontinuierlich und relativ rasch abnehmen. Es wird davon ausgegangen, dass im Jahre 2020 die in der Schweiz gelagerten Mengen an TV-Flachbildschirmen mit LCD-Hintergrundbeleuchtung weniger als 10%, bezogen auf die Gesamtmenge der Bildschirmgeräte, betragen werden.

- Die Menge des in die Entsorgung gelangenden **Quecksilbers** aus Flachbildschirmen beträgt im Maximum ca. 36 kg im Jahre 2014. Diese Menge entspricht knapp der Hälfte des Quecksilbers, welches heute aus Leuchtstoffröhren jährlich in das Recycling gelangt. Bezogen auf den Quecksilberfluss von ca. 1'380 kg, welcher jährlich in schweizerische KVA gelangt, entspricht diese Menge ca. 2.6%.

- Der maximale **Indiumfluss** der in die Entsorgung gelangenden Flachbildschirme beträgt ca. 115 kg im Jahre 2017.

Sammlung und Transport

- Bei der **Sammlung und dem Transport** von Flachbildschirmen werden ca. 5% der Hintergrundbeleuchtungen beschädigt. Die daraus resultierenden Quecksilberimmissionen stellen zu keiner Zeit ein gesundheitliches Risiko für die am Handling beteiligten Personen dar, sodass sich keine besonderen Maßnahmen bezüglich Sammlung und Transport aufdrängen.

Entsorgungsvarianten

- Bei der Entsorgung von Flachbildschirmen bestehen grundsätzlich 3 verschiedene Möglichkeiten: (a) Verbrennung in KVA; (b) Mechanische Verarbeitung und (c) Manuelle Zerlegung, wobei die Varianten untereinander kombiniert werden können.

- Die **Verbrennung von Flachbildschirmen in KVA** würde gesamtschweizerisch zu einem geringen Anstieg der gesamten Quecksilberfracht führen. Flachbildschirme sind jedoch angesichts des geringen Heizwertes wenig geeignet für eine thermische Verwertung. Zudem gehen je nach Tiefe der vorangehenden manuellen Zerlegung mehr oder weniger Wertstoffe verloren. Eine Verbrennung entspricht zudem nicht dem Stand der Technik.

- Bei einer **mechanischen Verarbeitung** wird das in der CCFL-Hintergrundbeleuchtung vorhandene Quecksilber zu einem größeren Anteil an verschiedenen Stellen der Anlage gasförmig emittiert. Das an das Material anhaftende Quecksilber reichert sich in den Feinfraktionen an. Ein unbestimmter Anteil würde sich über die Anlage verteilen. Die Anhaftungen an den metallenen Wertstoffen wären vermutlich gering. Das Emissionsverhalten des Quecksilbers bei einer mechanischen Verarbeitung ist abhängig vom Material, dem Durchsatz und der Umgebungstemperatur.

- Auf dem Markt werden **Kompaktanlagen** angeboten, welche gemäß Herstellerangaben weitgehend quecksilberfreie und damit verwertbare Fraktionen erzeugen und welche die gasförmigen Emissionen kontrollieren können. Bis heute liegen jedoch keine unabhängigen Messungen an solchen Anlagen vor, welche die Versprechen der Hersteller belegen.

- Bei der **manuellen Zerlegung** von Flachbildschirmen bestehen sowohl bei PC Monitoren, als auch bei TV-Geräten nur geringe Bruchraten. Selbst bei erhöhten Bruchraten erreichen im Arbeitsbereich der Zerleger die Quecksilberimmissionen die MAK-Werte nicht. Kritisch sind jedoch diejenigen Orte, wo zerbrochene Lampen in konzentrierter Form gelagert werden. Dort werden die MAK-Werte regelmäßig überschritten. Bei TV-Geräten ist die Bruchgefahr am Höchsten, während sie bei PC Monitoren relativ unbedeutend ist.

[9] Es handelt sich um die durch die Modellrechnungen bestimmten Maximalmengen, ohne Berücksichtigung der nicht ins Recyclingsystem gelangenden Mengen. Diese betragen (je nach Gerätekategorie) 25-60% der theoretischen Menge aus den Modellberechnungen.

Rückgewinnung von Indium und Zwischenlagerung

- Bis heute ist in Europa kein technisches Verfahren verfügbar, welches die **Rückgewinnung des Indiums** aus Flachbildschirmen ermöglicht. Der ökonomische Wert des gemäß den Modellrechnungen maximal in der Schweiz in die Entsorgung gelangenden Indiums beträgt jährlich maximal ca. 66'000 USD. Aus rein ökonomischer Sicht besteht aufgrund des geringen Gesamtwertes des in die Entsorgung gelangenden Indiums kein Anreiz für dessen Rückgewinnung. Eine solche kann jedoch aufgrund der Knappheit des Indiums trotzdem sinnvoll werden.

- Eine **Zwischenlagerung** der indiumhaltigen LCD-Panels verursacht mutmaßliche jährliche Lagerkosten von ca. Fr. 150'000. Unter Berücksichtigung der dabei eingesparten Verbrennungskosten ergeben sich Nettokosten von ca. Fr. 50'000/a, ohne Berücksichtigung eines möglichen späteren Verkaufserlöses.

7.2 Ziele einer künftigen Verarbeitung von Flachbildschirmen

7.2.1 Umweltrechtliche Prinzipien und Grundsätze

Die Untersuchungen haben gezeigt, welche Dimension die künftige Entsorgung von Flachbildschirmen in der gesamten Entsorgung von Elektronikschrott einnehmen wird. Es wurde dargelegt, welche spezifischen Herausforderungen sich bei den 3 möglichen Entsorgungsvarianten (a) KVA, (b) mechanische Verarbeitung und (c) manuelle Zerlegung stellen und welche Risiken und Umweltauswirkungen mit diesen Verfahren verbunden sind.

Aus Schadstoffsicht ist das **Quecksilber** die Hauptherausforderung bei der Entsorgung von Flachbildschirmen. Bei der Festlegung der Anforderungen an eine Entsorgung stellt sich dabei primär die Frage nach den anzuwendenden Zielsetzungen. Diese leiten sich einerseits aus den umweltrechtlichen Grundprinzipien, andererseits aus bestehenden oder absehbaren internationalen Tendenzen ab.

Aus Wertstoffsicht ist das **Indium** als wichtigstes Element bezüglich dessen Rückgewinnbarkeit im Fokus zu halten.

Im Zusammenhang mit der Entfrachtung der Flachbildschirme vom Quecksilber sind folgende umweltrechtlichen *Prinzipien und Grundsätze* hervorzuheben:

Vorsorgeprinzip
Art. 1 USG

Im Zweckartikel des schweizerischen Umweltschutzgesetzes heißt es „Im Sinne der Vorsorge sind Einwirkungen, die schädlich oder lästig werden könnten, frühzeitig zu begrenzen".

Vermischungsverbot
Art. 10 TVA

Art. 10 der Technischen Verordnung über Abfälle besagt, dass Inhaber von Abfällen diese nicht mit andern Abfällen oder mit Zuschlagstoffen vermischen dürfen, wenn dies in erster Linie dazu dient, den Schadstoffgehalt der Abfälle durch Verdünnen herabzusetzen, um Vorschriften über die Abgabe, die Verwertung oder die Ablagerung einzuhalten.

Immissionsschutz
Art. 11 USG

Das Umweltschutzgesetzt fordert, dass Luftverunreinigungen, Lärm, Erschütterungen und Strahlen durch Massnahmen bei der Quelle begrenzt werden müssen (Emissionsbegrenzungen). Unabhängig von der bestehenden Umweltbelastung sind Emissionen im Rahmen der Vorsorge so weit zu begrenzen, als dies technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar ist.

Die SWICO-SENS Verarbeitungsvorschriften stipulieren in den Verarbeitungsgrundsätzen das Vermischungsverbot (C.3.1). Quecksilberhaltige Komponenten sind grundsätzlich zu entfernen und Quecksilberemissionen sind auf geeignete Weise zu verhindern (D.6). Für LCD-Hintergrundbeleuchtungen gelten folgende gesonderte Vorschriften (Richtlinie 2 „IKT und UE-Geräte"):

Selektive Behandlung von CCFL
TV SWICO/SENS Richtlinie 2

In Anlehnung an Anhang II der RICHTLINIE 2002/96/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 27. Januar 2003 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEEE-Direktive) müssen Kaltkathodenfluoreszenzlampen in Flüssigkristallanzeigen grösser als 100 cm^2 entfernt und einer fachgerechten Verwertung oder Entsorgung zugeführt werden.

Anforderungen an eine mechanische Verarbeitung
TV SWICO/SENS Richtlinie 2

Anhang II der WEEE-Direktive fordert eine selektive Behandlung bestimmter Werkstoffe und Bauteile von Elektro- und Elektronikaltgeräten. Dies ist jedoch nicht gleichbedeutend mit einer manuellen Demontage (Anhang II macht z.B. auch Vorschriften zur selektiven Behandlung von Kunststoffen mit bromierten Flammschutzmitteln oder von Leiterplatten, welche beide auch mechanisch verarbeitet werden). Gemäss den technischen Vorschriften von Swico und SENS ist eine Verarbeitung von Flüssigkristallanzeigen ohne vorherige Entfernung der Kaltkathodenfluoreszenzlampen nach Rücksprache mit den Kontrollorganen möglich, sofern sichergestellt ist, dass keine in den Kaltkathodenfluoreszenzlampen enthaltenen Schadstoffe, insbesondere Quecksilber, auf die im Verfahren erzeugten Fraktionen verteilt werden und die Schadstoffe einer fachgerechten Verwertung oder Entsorgung zugeführt werden.

Immissionsschutz
TV SWICO/SENS Richtlinie 2

Bei der Entfrachtung und Verarbeitung von Flüssigkristallanzeigen muss dafür gesorgt werden, dass die Schadstoffemissionen - insbesondere die Quecksilberemissionen - so niedrig gehalten werden, dass sich daraus weder eine Beeinträchtigung der Umwelt noch der Gesundheit der Mitarbeiter ergibt.

7.2.2 Tendenzen auf globaler und europäischer Ebene

Quecksilber ist vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP) als Chemikalie von globaler Bedeutung erkannt worden. Im Februar 2009 wurde vereinbart, eine internationale Quecksilberkonvention als rechtlich verbindliches Instrument zu schaffen, welches die Verwendung und den Umgang mit Quecksilber weltweit regeln soll. Die Schweiz hat in der Vorbereitung der Quecksilberkonvention eine wichtige Vorreiterrolle übernommen. Am 10. Februar 2010 gelang an der UNEP-Konferenz in Nairobi der entscheidende Durchbruch zur Aufnahme von gemeinsamen internationalen Verhandlungen zur Schaffung einer solchen Konvention, welche bis ca. 2013 ausgearbeitet sein soll.

Die europäische Kommission hat im Januar 2005 eine Quecksilberstrategie[11] erlassen. Diese beinhaltet u.a. eine Strategie zur Emissionsminderung, eine Reduktion des Eintrittes von Quecksilber in die Umwelt und den Schutz vor Belastung mit Quecksilber.

Auf europäischer Ebene wird Indium als kritisch erachtet[12].

7.2.3 Tendenz in der Schweiz

In der Schweiz besteht allgemein der Grundsatz, das Verwenden von Quecksilber und seinen Zubereitungen und das Inverkehrbringen quecksilberhaltiger Zubereitungen und Gegenstände durch eine Herstellerin zu verbieten. Dabei hat sich die Schweiz weitgehend der europäischen Gesetzgebung angeschlossen. Die dort aufgeführten Ausnahmeregelungen werden jeweils auch von der Schweiz übernommen.

Gegenwärtig bestehen keine Vorschriften zur Rückgewinnung des Indiums aus Flachbildschirmen. Im Rahmen der laufenden Revision der Verordnung vom 14. Januar 1998 über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (VREG) werden Möglichkeiten geprüft, ob es möglich und sinnvoll wäre, Vorschriften einzuführen, welche die Rückgewinnung kritischer Elemente verlangen.

[10] Siehe: http://www.bafu.admin.ch/dokumentation/fokus/07629/07631/index.html?lang=de
[11] Siehe: http://www.toxcenter.de/artikel/EU-Quecksilberstrategie.php
[12] European Commission. 2010. Critical Raw Materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials.

7.3 Anpassung der SWICO-SENS Verarbeitungsvorschriften

Die geltenden technischen Vorschriften von Swico Recycling und SENS regeln in weiten Teilen die Anforderungen an eine Entsorgung von Flachbildschirmen. So wird in Anlehnung an die WEEE-Direktive eine selektive Behandlung von Hintergrundbeleuchtungen ab 100 cm² gefordert (was jedoch nicht zwingend manuell erfolgen muss). Eine mechanische Verarbeitung ist in Absprache mit den Kontrollorganen möglich, falls keine Verteilung des Quecksilbers auf die resultierenden Fraktionen erfolgt und die Schadstoffe umweltgerecht entsorgt werden können. In jedem Fall wird eine Kontrolle der Emissionen verlangt, sodass daraus weder eine Beeinträchtigung der Umwelt noch der Gesundheit der Mitarbeiter resultiert.

Aufgrund der Resultate der vorliegenden Studie und den in Kapitel 7.2 dargelegten Zielen einer künftigen Entsorgung von Flachbildschirmen schlagen wir folgende Grundsätze bei der Anpassung der technischen Vorschriften von Swico Recycling und SENS vor:

Festlegung klarer Rahmenbedingungen für eine mechanische Verarbeitung

Eine mechanische Verarbeitung von Flachbildschirmen soll möglich sein, es sollen jedoch klare Anforderungen an die Qualität der zur Verwertung vorgesehenen Fraktionen festgelegt werden. Für die zu erreichenden Rückstandsqualitäten werden die geltenden Vorschriften für das Leuchtmittelrecycling in der Schweiz übernommen.

Einschränkung der thermischen Verwertung

Eine thermische Verwertung von Flachbildschirmen soll bei manueller Zerlegung erst ab Zerlegestufe 2 erlaubt sein. D.h. eine thermische Entsorgung der brennbaren Fraktionen (Kunststoffe) sowie entweder des LCD-Panels oder des LCD-Modul soll erlaubt sein, nicht jedoch eine Verbrennung ganzer Bildschirmgeräte.
Konkret schlagen wir folgenden Anpassungen an den bestehen technischen Vorschriften von SENS und Swico Recycling vor:

Richtlinie 2: IKT und UE-Geräte

Flachbildschirme

1.1 Das zur Anwendung gelangende Verfahren zur Verarbeitung von Flachbildschirmen muss einen wirksamen Rückhalt von Schadstoffen und eine möglichst hohe Verwertung von Wertstoffen gewährleisten.

1.2 Flüssigkristallanzeigen von einer Oberfläche grösser als 100 cm² und Kaltkathodenfluoreszenzlampen aus Hintergrundbeleuchtungen von Flachbildschirmen müssen entfernt und einer fachgerechten Verwertung oder Entsorgung zugeführt werden.

1.3 Bei der manuellen Zerlegung von Flachbildschirmen sind geeignete Vorkehrungen zu treffen, damit die Bestimmungen zum Umweltschutz sowie zum Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz jederzeit eingehalten werden können.

1.4 Zerbrochene Kaltkathodenfluoreszenzlampen aus Hintergrundbeleuchtungen sind separat und in geschlossenen Behältern aufzubewahren und zu transportieren. Bei der Befüllung der Behälter sind geeignete Schutzvorkehrungen zu treffen und die Behälter sind an dafür geeigneten Orten aufzubewahren.

1.5 Bei der mechanischen Verarbeitung von Flachbildschirmen ohne vorherige Entfernung der Kaltkathodenfluoreszenzlampen muss sichergestellt werden, dass:
- (a) Das in den Kaltkathodenfluoreszenzlampen enthaltene Quecksilber im Prozess wirksam zurückgehalten wird und die gasförmigen Immissionen beim Betrieb der Anlage die gesetzlichen Bestimmungen zum Umweltschutz sowie zum Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz jederzeit einhalten,
- (c) die Glasfraktionen für eine stoffliche Verwertung nicht mehr als 5 mg Quecksilber pro kg Trockensubstanz (TS) enthalten; die Metallfraktionen für die stoffliche Verwertung nicht mehr als 10 mg Quecksilber pro kg Trockensubstanz (TS) enthalten und alle weiteren Fraktionen, die nicht in eine Sonderabfalldeponie eingelagert werden, nicht mehr als 10 mg Quecksilber pro kg Trockensubstanz (TS) enthalten.

1.6 Eine thermische Verwertung von Kunststoffen aus der Zerlegung von Flachbildschirmen, resp. von LCD-Panel in KVA ist zulässig, jedoch nicht von ganzen Flachbildschirmgeräten, resp. -modulen.

Literaturverzeichnis

Angerer, G., L. Erdmann, et al. (2009). Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Karlsruhe, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.

Baudin, I. (2006). Analyse du cycle de vie d'un écran plasma.

Becker, W. (2009). Environmental Responsibility at Merck: Sustainability and Green Product Policy. Green Display Expo 2009 of Insight Media, Oct. 27, 2009. Washington DC.

Becker, W. and B. Simon-Hettich (2007). Toxicological and Ecotoxicological Investigations of Liquid Crystals. Status: July 16, 2007.

Becker, W., B. Simon-Hettich, et al. (2003). Toxicological and Ecotoxicological Investigations of Crystals and Disposal of LCDs.

Behrendt, S., K. Fichter, et al. (2008). Nachhaltigkeitsinnovationen in der Display-Industrie. Berlin, IZT, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung.

Benedetti, K. and T. Zumbühl (2010). Verkauf und Entsorgung von Flachbildschirmen in der Schweiz - Eine dynamische Modellierung. Institut für ökologisches Systemdesign Zürich, ETH.

Bogdanski, G. (2009). Entwicklung und Analyse von Handlungsoptionen zur Umsetzung von Recyclingkonzepten für Flüssigkristallbildschirme (LCD) für ein Unternehmen der Elektro(nik)altgeräterecyclingbranche.

Camaroto, C. (2009). LED Backlight Shipments Skyrocket as CCFLs and EEFLs Lose Ground.

Gesundheit, B. f. (2010). "Quecksilber." from http://www.bag.admin.ch/themen/chemikalien/00228/03912/index.html.

Getters, S. (2010). "SAES Getters - Solutions for Liquid Crystal Displays." from http://www.saesgetters.com/default.aspx?idPage=282.

Hügi M, G. P. et al. (2008). Abfallwirtschaftsbericht 2008, Bundesamt für Umwelt (BAFU).

Huisman, J., F. Magalini, et al. (2008). "2008 Review of Directive 2002/96 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), Final Report." from http://www.ewasteguide.info/biblio/2008-review-d.

Jorgenson, J. D. and M. W. George (2005). USGS Mineral Commodity Profile Indium.

King County Solid Waste, D. (2008). Literature Review Flat Panel Displays: End of Life Management Report, Final Report. Seattle, King County Solid Waste Divison.

LNE (2010). Rapport d'essai Eco-Systèmes; Dossier L031102. F-Trapes-Cedex.

Martin, R. (2009). Verwendung von Flüssigkristall- Displays sowie Verfahren zu deren Verwertung.

McDonnel, T. J. (2010). Liquid crystal displays: knowledge exchange and its role in the treatment of mercury-containing backlights in liquid crystal display equipment, The Environmentalist.

Mikolajczak, C. (2009). AVAILABILITY OF INDIUM AND GALLIUM.

Morf, L. (2006). Chemische Zusammensetzung verbrannter Siedlungsabfälle; Untersuchungen im Einzugsgebiet der KVA Thurgau. Berne, Switzerland, Bundesamt für Umwelt.

Osborne, M. (2009). "NanoMarkets report: CIGS growth not limited by indium supply." from http://www.pv-tech.org/news/_a/nanomarkets_report_cigs_growth_not_limited_by_indium_supply/.

Pirrone, N. and et al. (2010). Global mercury emissions to the atmosphere from anthropogenic and natural sources.

Rietmann, M. "Quecksilber-Ausstoss St. Galler Tagblatt." from http://www.schweiz-lebenshilfe.ch/www.schweiz-lebenshilfe.ch/Quecksilber-Ausstoss.htm.

SCOEL (May 2007). "Recommendation from the Scientific Committee on Occupational Exposure Limits for elemental mercury and inorganic divalent mercury compounds." from http://ec.europa.eu/social/main.jsp?catId=153&langId=en&intPageId=684.

Sigma-Aldrich, C. (2010). "Indium tin oxide ITO." from http://www.sigmaaldrich.com/catalog/ProductDetail.do?N4=494682|ALDRICH&N5=SEARCH_CONCAT_PNO|BRAND_KEY&F=SPEC.

Socolof, M. L., J. G. Overly, et al. (2005). "Environmental life-cycle impacts of CRT and LCD desktop computer displays." Journal of Cleaner Production 13: 1281-1294.

SUVA (2009). Grenzwerte am Arbeitsplatz.

SWICO (2008). Consumer Electronics Markt Schweiz, Verkaufszahlen 2007-2008. IG Consumer Electronics.

Theis, D. (2000). Displays - Schlüsselkomponenten der Informationsgesellschaft. Physikalische Blätter. 56: 59-63.

Tolcin, A. C. (2008). U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2007: Indium.

Tolcin, A. C. (2010). U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2010.

Tromp, P. (2009). The release of mercury vapour during recycling of LCD displays. NL-Utrecht, TNO Environment, Health and Safety.

Widmer, S. D. u. R. The End of the Cathode Ray Tube: A dynamic stock model to assess the flow of CRT glass through Swiss society.

SWICO Recycling

Hardturmstrasse 103
8005 Zürich
Tel. +41 (0)44 446 90 94
Fax +41 (0)44 446 90 91
info@swicorecycling.ch
www.swicorecycling.ch