

InAccess – Rückgewinnung von Indium durch effizientes Recycling von LCD-Bildschirmen

Guido Sellin, Hannes Fröhlich und Kai Rasenack

1.	Aufbau und Funktion von LCD-Bildschirmgeräten	164
2.	Mengenaufkommen, Sammlung und Erfassung von LCD-Bildschirmgeräten	165
3.	Zerlegung von LCD-Bildschirmgeräten	168
4.	Quecksilber in LCD-Bildschirmgeräten	172
5.	Aufbereitung der Zerlegefraktionen	173
6.	Gewinnung des Indiums	173
7.	Ausblick	176
8.	Quellen	176

Die Anzahl der in Verkehr gebrachten LCD-Bildschirmgeräte im IT- und TV-Sektor ist in den letzten Jahren deutlich gestiegen. [4] Dies führt wiederum zu einem Anstieg der zu entsorgenden Geräteart in den kommenden Jahren. Trotz des zu erwartenden Altgeräterücklaufs existierte bisher kein industriell eingesetztes Recyclingverfahren, das speziell auf die Anforderungen dieser Geräteart angepasst ist. [3]

In LCD-Bildschirmgeräten sind eine Vielzahl von wichtigen Standardrohstoffen, wie Eisen, Kupfer, Aluminium und Kunststoff, sowie ein geringer Anteil an strategisch relevanten Sondermetallen eingesetzt. Hier ist insbesondere das in der bildgebenden Einheit verwendete Indium von Bedeutung.

Im Rahmen des Forschungsprojektes *In Access*, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), wurde ein *ressourceneffizienter und wirtschaftlicher Recyclingprozess für LCD-Bildschirmgeräte unter besonderer Berücksichtigung der Rückgewinnung des Indium-Inhalts* entwickelt. Die Verbundpartner waren Electrocycling GmbH, Umicore AG & Co. KG (Umicore), ENE EcologyNet Europe GmbH (ENE) und TU Clausthal, Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik (IFAD).

In diesem Beitrag wird das Gesamtvorhaben erläutert, wobei die Projektschwerpunkte von Electrocycling detaillierter dargestellt werden. Diese beinhalten Sammel-, Transport- und Betriebslogistik sowie die manuelle und mechanische Behandlung der LCD-Bildschirmgeräte.

1. Aufbau und Funktion von LCD-Bildschirmgeräten

Der funktionale Aufbau von LCD-Bildschirmgeräten ist bei allen Gerätetypen gleich. Die Hauptkomponente eines LCD-Bildschirmgerätes ist das LCD-Panel (Liquid Cristal Display). Dieses ist die bildgebende Einheit und besteht aus schichtweise angeordneten Komponenten. Diese sind zwei dünne, auf der Innenseite mit ITO-Leiterbahnen – Indium-Zinn-Oxid – bedampfte Glasscheiben, zwischen denen sich die Flüssigkristalle befinden. An den Außenseiten befinden sich Polarisationsfolien. Als Hintergrundbeleuchtung dienen LED (light-emitting-diode) oder quecksilberhaltige Leuchtstofflampen, zusätzliche optische Elemente wie z.B. Streuscheiben sind im Panel verbaut. Die einzelnen Bestandteile des LCD-Panels werden durch einen Kunststoff- und Stahlblechrahmen zusammen gehalten.

Zusätzlich zum LCD-Panel enthalten LCD-Bildschirmgeräte mehrere elektronische Baugruppen, die mit Hilfe eines weiteren Stahlblechrahmens mit dem Panel verbunden sind. Alle Bauteile eines LCD-Bildschirmgerätes sind in einem Kunststoffgehäuse untergebracht, welches meist mit einem Gerüststandfuß versehen ist.

Der grundsätzliche technische Aufbau von LCD-Bildschirmgeräten variiert zwischen zwei Bauarten. Hierbei kann zwischen Geräten mit seitlicher und mit flächiger Hintergrundbeleuchtung unterschieden werden. Die seitliche Hintergrundbeleuchtung findet man in der Regel bei kleinen LCD-Bildschirmgeräten bis zu einer Bildschirmdiagonale von 19 Zoll, teilweise bis 21 Zoll. Ältere Geräte mit Hg-haltiger Hintergrundbeleuchtung mit einer Bilddiagonale von mehr als 19 Zoll weisen in der Regel eine flächige Hintergrundbeleuchtung auf. Bei neueren großen Geräten mit LED-Hintergrundbeleuchtung (light-emitting diode) ist diese in den meisten Fällen ebenfalls seitlich angeordnet. In diesem Beitrag wird ein Zerlegeverfahren für die derzeit und in den nächsten Jahren vorrangig zu verwertenden Geräte mit Hg-haltiger Hintergrundbeleuchtung beschrieben. Die neueren LED-beleuchteten Geräte lassen sich ebenfalls mit der vorgestellten Technik verarbeiten. Vorteilhaft für das Recycling ist, dass für diese Geräte eine Hg-Erfassung nicht mehr erforderlich ist. In Bild 1 sind die beiden Bauarten mit Hg-haltiger Hintergrundbeleuchtung dargestellt.



Bild 1: Bauarten von LCD-Bildschirmgeräten mit Hg-haltiger Hintergrundbeleuchtung

Materialzusammensetzung von LCD-Bildschirmgeräten

LCD-Bildschirmgeräte setzen sich aus einer Vielzahl von Rohstoffen zusammen. Die wesentlichen sind Fe-Metalle, NE-Metalle, diverse Kunststoffe, Glas sowie in geringen Mengen das seltene Sondermetall Indium.

In Tabelle 1 ist die Zusammensetzung von LCD-Bildschirmgeräten in Massenprozent für LCD-Bildschirmgeräte mit seitlicher und mit flächiger Hintergrundbeleuchtung dargestellt.

Tabelle 1: Massenverteilung von LCD-Bildschirmgeräten

LCD-Geräte (seitliche Beleuchtung)		LCD-Geräte (flächige Beleuchtung)	
Anzahl Proben: 3	Anteil %	Anzahl Proben: 3	Anteil %
Fe-Metalle	29,35	Fe-Metalle	46,50
Kunststoffe	17,81	Kunststoffe	23,00
Leiterplatte-Netzteil	4,61	Leiterplatte-Netzteil	4,35
Leiterplatte-Anschluss	2,61	Leiterplatte-Anschluss	3,04
Leiterplatte-Bildeinheit	0,49	Leiterplatte-Bildeinheit	1,35
Hintergrundbeleuchtung	0,31	Hintergrundbeleuchtung	0,93
LCD-Anzeige (Folien)	13,26	LCD-Anzeige (Folien)	5,82
LCD-Anzeige (bildgebende Einheit)	6,42	LCD-Anzeige (bildgebende Einheit)	6,15
Fuß	24,19	Fuß	6,97
Kabel	0,95	Kabel	1,88
Summe	100,00	Summe	100,00

Schadstoffhaltige Bauteile

In den älteren LCD-Bildschirmgeräten sind CCFL (cold cathode fluorescent lamp) als Hintergrundbeleuchtungen verbaut, die Quecksilber enthalten. Bei der Behandlung dieser Geräte muss sichergestellt werden, dass diese Hintergrundbeleuchtung so entfernt wird, dass eine Freisetzung von Quecksilber ausgeschlossen ist.

In LCD-Bildschirmgeräten neuerer Generation werden quecksilberfreie LED-Hintergrundbeleuchtungen verbaut. Somit enthalten diese Geräte keine gesondert zu entfernenden Schadstoffe.

2. Mengenaufkommen, Sammlung und Erfassung von LCD-Bildschirmgeräten

Für die Entwicklung eines ressourceneffizienten und wirtschaftlichen Recyclingprozesses für LCD-Bildschirmgeräte ist es zunächst wichtig eine belastbare Aussage über das zukünftige Mengenaufkommen an Elektroaltgeräten dieser Gruppe zu erlangen. Hierzu wurde im Rahmen des Forschungsprojektes *In Access* eine Studie *Daten und Prognosen zum Lebenszyklus von LCD-Bildschirmgeräten* [2] in Auftrag gegeben.

Dieser Studie zur Folge sind die Mengen an in Verkehr gebrachten LCD-Bildschirmgeräte im IT- und TV-Sektor in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Die derzeit zum

Recycling zurücklaufende Generation an LCD-Bildschirmgeräten – Geräte mit Hg-Hintergrundbeleuchtung – befindet sich bereits seit einigen Jahren nahezu nicht mehr im Handel. Das Verkaufshoch dieser Gerätegeneration lag um das Jahr 2008 bis 2010.

Für das Altgeräterecycling ist im Bereich der LCD-Monitorgeräte mit einer maximalen Rücklaufmenge von 3,05 Millionen für das Jahr 2016 zu rechnen. Nach Erreichen dieses Maximalwertes verringert sich das Recyclingaufkommen bis zum Jahr 2020 auf 2,9 Millionen Geräte pro Jahr. Die Recyclingmengen wurden ab dem Jahr 2000 dargestellt und entwickeln sich analog zu den Verkaufszahlen. Bild 2 stellt die prognostizierten Rücklaufmengen für Monitorgeräte dar. Die Prognose basiert auf einem ermittelten Durchschnittsalter für Monitorgeräte von acht Jahren.

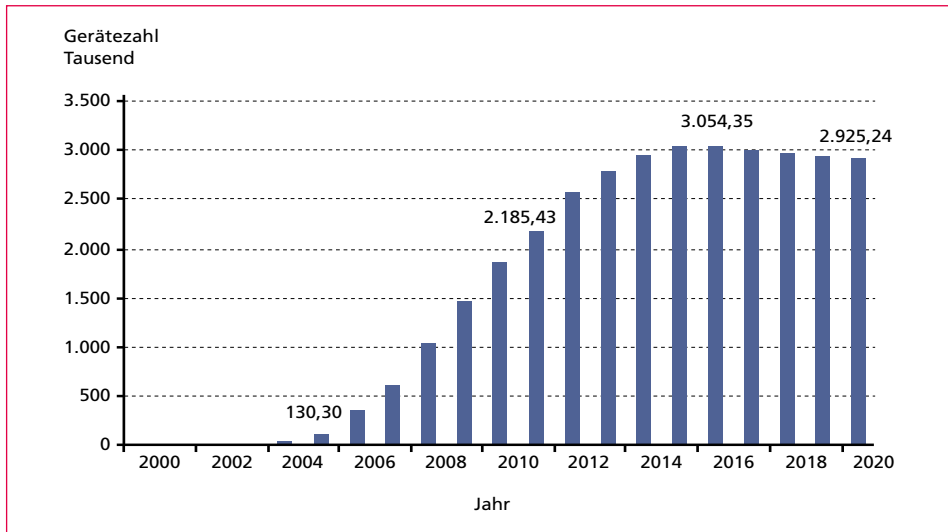


Bild 2: Entwicklung des Recyclingaufkommens an LCD-Monitor Geräten

Quelle: Michels, A.: Daten und Prognosen zum Lebenszyklus von LCD- Bildschirmgeräten; Ecowin; Auftragsstudie für Verbundprojekt InAccess i.A von Ecowin GmbH

Im Bereich der LCD-Fernsehgeräte ist bei einer Nutzungsdauer von zehn Jahren mit einer Rücklaufmenge von 8,2 Millionen Geräten für das Jahr 2020 zu rechnen (Bild 3). Das Durchschnittsalter der entsorgten TV-Geräte von zehn Jahren wurde im Rahmen eines Pilottests als derzeit realistisch ermittelt.

Um ein effektives und umweltgerechtes Recycling von LCD-Bildschirmgeräten zu ermöglichen, ist ein flächendeckendes Sammel- und Erfassungssystem notwendig. Durch dieses Sammel- und Erfassungssystem muss ein zerstörungsfreier Transport bis zur Erstbehandlungsanlage gewährleistet werden, um eine diffuse, unkontrollierbare Freisetzung von Quecksilber zu vermeiden. Bisher wurden LCD-Bildschirmgeräte an kommunalen Sammelstellen in mindestens 30 m³ Containern als Sammelgruppe 3 zusammen mit anderen Gerätearten der Kategorie 3 und 4 erfasst. Hierbei wurden die Bildschirmgeräte häufig beschädigt was einerseits die Freisetzung von Quecksilber zur Folge hat und andererseits die Möglichkeit einer fachgerechten Aufbereitung der Geräte erheblich erschwert.

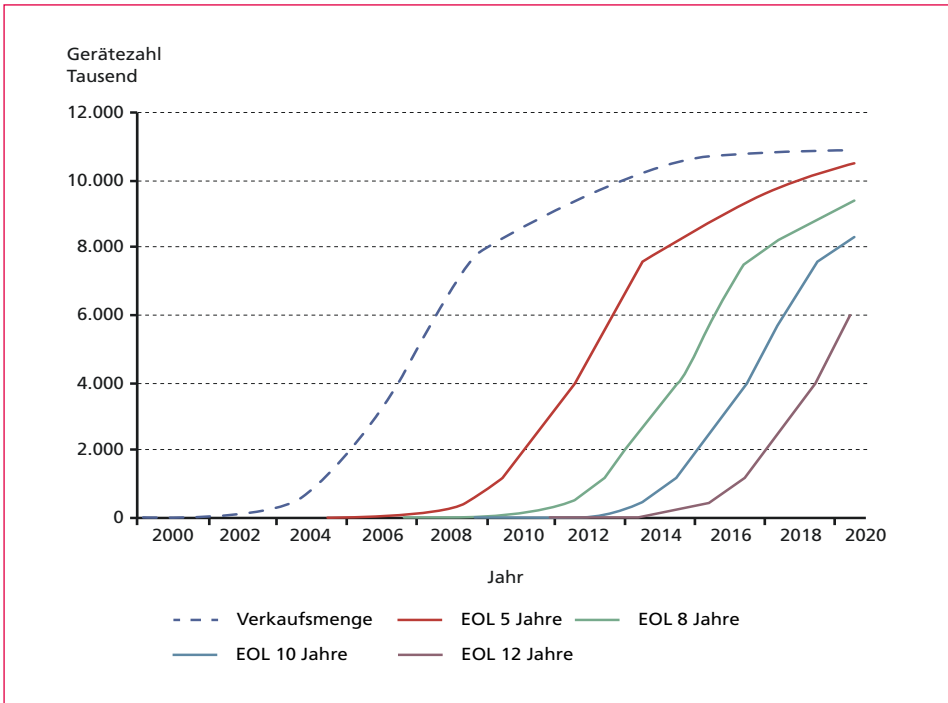


Bild 3: Entwicklung des Recyclingaufkommens an LCD-TV Geräten

Quelle: Michels, A.: Daten und Prognosen zum Lebenszyklus von LCD- Bildschirmgeräten; Ecowin; Auftragsstudie für Verbundprojekt InAccess i.A von Ecowin GmbH

Mit Inkrafttreten des neuen ElektroG im Herbst 2015 sollen Bildschirmgeräte in der *neuen* Sammelgruppe 3 getrennt von anderen Geräten gesammelt werden. Es bleibt abzuwarten, in wie weit dies in der Praxis zu einer bruchfreien Sammlung der Bildschirmgeräte beiträgt.

In Zusammenarbeit mit einem öffentlich rechtlichen Entsorgungsträger (örE) wird im Rahmen von *In Access* und darüber hinaus ein neues Sammel- und Erfassungssystem für LCD-Flachbildschirme entwickelt und an über 20 kommunalen Sammelstellen erprobt. Bei diesem System werden spezielle Sammelbehälter eingesetzt, in denen die Bildschirmgeräte aufrecht gelagert werden, wodurch eine Zerstörung der Geräte weitgehend ausgeschlossen wird. Zudem wird durch die aufrechte Lagerung der Bildschirmgeräte eine bestmögliche Behälterausnutzung erreicht (Bild 4).



Bild 4: Befüllter Sammelbehälter für LCD-Bildschirmgeräte

Weiterführend wird bei der Sammlung in *kleine* Monitor-Geräte mit seitlicher Hintergrundbeleuchtung und *große* TV-Geräte mit flächiger Hintergrundbeleuchtung unterschieden. Dadurch soll eine Sortierung vor der späteren Aufbereitung der LCD-Bildschirmgeräte entfallen. Es wurde untersucht, ob die Sortierung vor Ort auf den Sammelstellen durch die Bürger direkt bei der Abgabe der Altgeräte erfolgreich durchgeführt werden kann. Hierzu wurden Infoplakate (Bild 5) entworfen, welche dem Bürger auf einfache Art und Weise erläutern, wie die LCD-Geräte dem richtigen Sammelbehälter zuzuordnen und bruchfrei einzuladen sind.



Bild 5:

Infoplate zur kommunalen Sammlung von LCD-Bildschirmgeräten

Die im Projekt entwickelten Sammelbehälter werden über den Projektzeitraum hinaus auch in Zukunft für eine bruchfreie Sammlung dieser Gerätearten erfolgreich eingesetzt.

3. Zerlegung von LCD-Bildschirmgeräten

Ein Hauptaugenmerk bei der Behandlung von LCD-Bildschirmgeräten ist die sichere und vollständige Entfernung der quecksilberhaltigen Hintergrundbeleuchtungen. Hierbei ist eine Unterscheidung in Geräte mit einer seitlichen – bis 19 Zoll – und einer flächigen – größer 19 Zoll – Hintergrundbeleuchtung vorzunehmen, da die Beleuchtung auf unterschiedliche Art demontiert werden muss.

Manuelle Zerlegung

Bei der manuellen Zerlegung müssen die LCD-Bildschirmgeräte bis auf Panelebene zerlegt werden, um eine Entnahme der Hintergrundbeleuchtung zu ermöglichen. Bei der Entnahme der Hintergrundbeleuchtung ist behutsam vorzugehen, um ein Zerstoren der Lampen und damit eine Freisetzung von Quecksilber zu vermeiden.

Die manuelle Zerlegung von LCD-Bildschirmgeräten mit seitlicher Beleuchtung kann mit geschultem Personal in etwa acht bis zehn min pro Gerät erfolgen. Um das Gerät zu öffnen, muss das Gehäuse, mit vier bis acht Schrauben, entfernt werden. Danach sind die Baugruppen sowie der Stahlrahmen vom Panel zu entfernen. Um dem Panel die Hintergrundbeleuchtung entnehmen zu können, ist dieses ebenfalls mit einigen Schrauben zu öffnen. Nach der Entnahme der beiden Beleuchtungseinheiten kann das Panel noch weiter in seine einzelnen Bestandteile zerlegt werden (Bild 6).

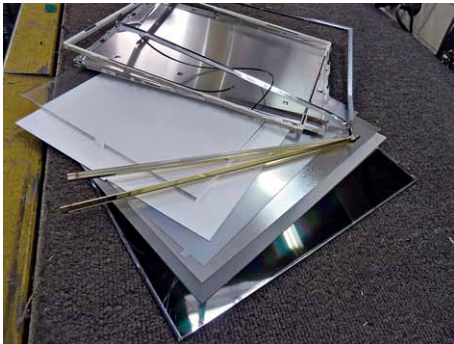


Bild 6: Bestandteile eines LCD-Panels mit seitlicher Hintergrundbeleuchtung



Bild 7: Bestandteile eines LCD-Panels mit flächiger Hintergrundbeleuchtung

Die manuelle Zerlegung von LCD-Bildschirmgeräten mit flächiger Hintergrundbeleuchtung ist wesentlich arbeitsintensiver, da diese Geräte in ihrem Aufbau komplexer sind und die zu demontierenden Komponenten schlechter zugänglich. Die Zerlegung dieser Geräte dauert mit geschultem Fachpersonal 15 bis 20 min. Um das Gehäuse zu öffnen, müssen je nach Geräte bis zu 30 Schrauben gelöst werden. Danach werden die Baugruppen vom Trägerrahmen entnommen. Um dem freigelegten Panel die Hintergrundbeleuchtung entnehmen zu können, müssen ebenfalls etliche Schraubverbindungen entfernt werden. Die Beleuchtungseinheiten, je nach Bildschirmgröße bis zu 26 CCFL-Röhren, sind vorsichtig aus den Befestigungen zu entnehmen. Diese Befestigungen können einfach gesteckt, verschraubt, oder gar verlötet sein. In Bild 7 sind die einzelnen Bestandteile eines LCD-Panels mit flächiger Hintergrundbeleuchtung dargestellt.

Teilautomatisierte Zerlegung von LCD-Bildschirmgeräten

Im Rahmen des Forschungsprojektes *In Access* wurden zwei Zerlegeverfahren entwickelt, die für eine schnellere und wirtschaftlichere Verarbeitung von LCD-Bildschirmgeräten geeignet sind. Als Ergebnis wurden eine Pilotanlage zur teilautomatisierten Zerlegung von LCD-Bildschirmgeräten mit seitlicher Hintergrundbeleuchtung

und eine Anlage zur Zerlegung von Geräten mit flächiger Hintergrundbeleuchtung entwickelt und errichtet. Beide Anlagen arbeiten mittlerweile im industriellen Maßstab.

Zerlegeverfahren für LCD-Bildschirmgeräte mit seitlicher Hintergrundbeleuchtung

Bei der Zerlegung von LCD-Bildschirmgeräten mit seitlicher Hintergrundbeleuchtung kommt ein Schneidwerkzeug zum Einsatz. Dieses Schneidwerkzeug wird ober- und unterhalb der LCD-Anzeige genau senkrecht über den CCFL Beleuchtungseinheiten positioniert.

Anschließend taucht das Schneidwerkzeug so tief in den LCD-Bildschirm ein, dass die CCFL-Röhren der Hintergrundbeleuchtung erfasst und zerstört werden (Bild 8, Schnittlinie 1).

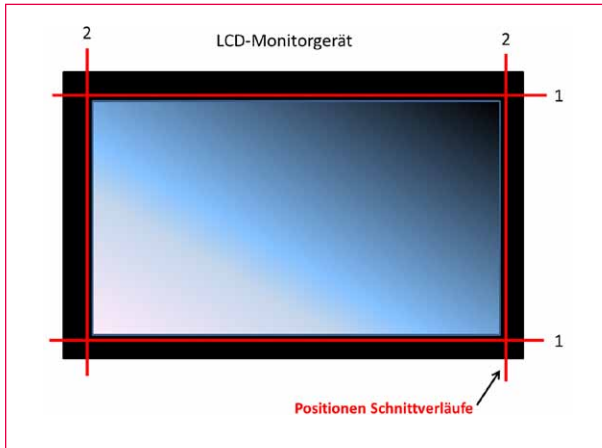


Bild 8:

Schnittverlauf bei Geräten mit seitlicher Hintergrundbeleuchtung

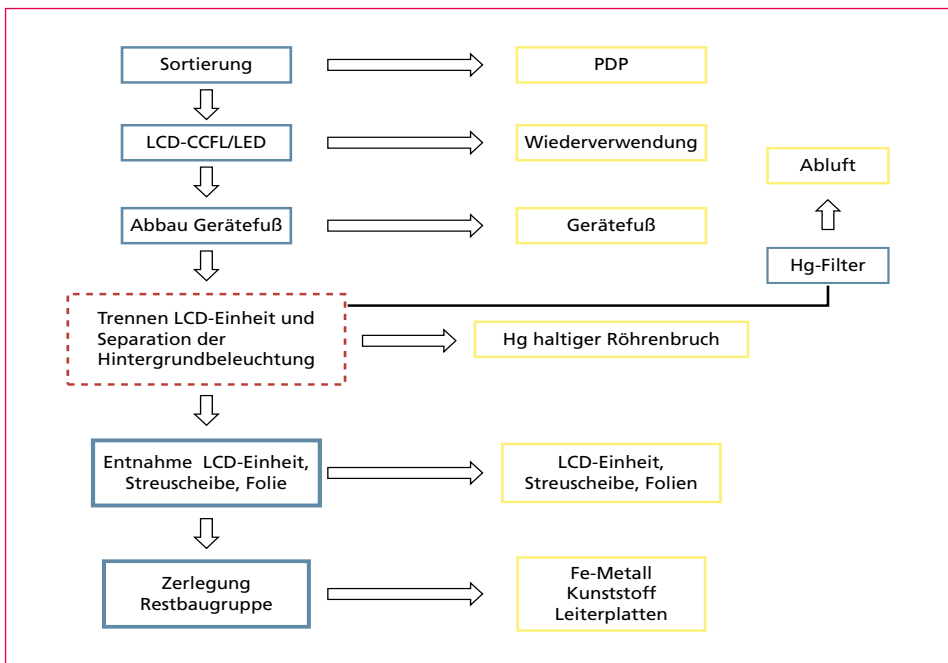


Bild 9: Verfahrensablauf zur Zerlegung von LCD-Geräten mit seitlicher Hintergrundbeleuchtung

Das Schneidwerkzeug verfährt über die gesamte Bildschirmbreite. Der dabei entstehende Schneidspan enthält unter anderem die gesamte quecksilberhaltige Hintergrundbeleuchtung. Danach wird der Bildschirm um 90° gedreht. Das Werkzeug durchfährt mit gleicher Schnitttiefe durch den Bildschirm (Bild 8, Schnittlinie 2). Nach diesem Trennvorgang können die einzelnen Fraktionen das LCD-Panel aus dem Gerät entnommen werden. Die bei dem Verfahren anfallenden Schneidspäne werden jeweils im gleichen Arbeitsgang komplett abgesaugt, über einen Filter abgeschieden und in ein luftdichtes Gebinde abgegeben. Die abgesaugte Luft wird über eine geeignete Abluftreinigung geführt und das enthaltene gasförmige Quecksilber entnommen. Bild 9 zeigt den schematischen Ablauf des Zerlegeverfahrens.

Zerlegeverfahren für LCD-Bildschirmgeräte mit flächiger Hintergrundbeleuchtung

Bei der Zerlegung von LCD-Bildschirmgeräten mit flächiger Hintergrundbeleuchtung kommt ebenfalls ein Trennverfahren zum Einsatz. Bei der flächigen Hintergrundbeleuchtung wird das Schneidwerkzeug so positioniert, dass der Schnitt innerhalb der LCD-Anzeige, parallel entlang des Bildrahmens verläuft (Bild 10).



Bild 10: Schnittverlauf bei Geräten mit flächiger Hintergrundbeleuchtung

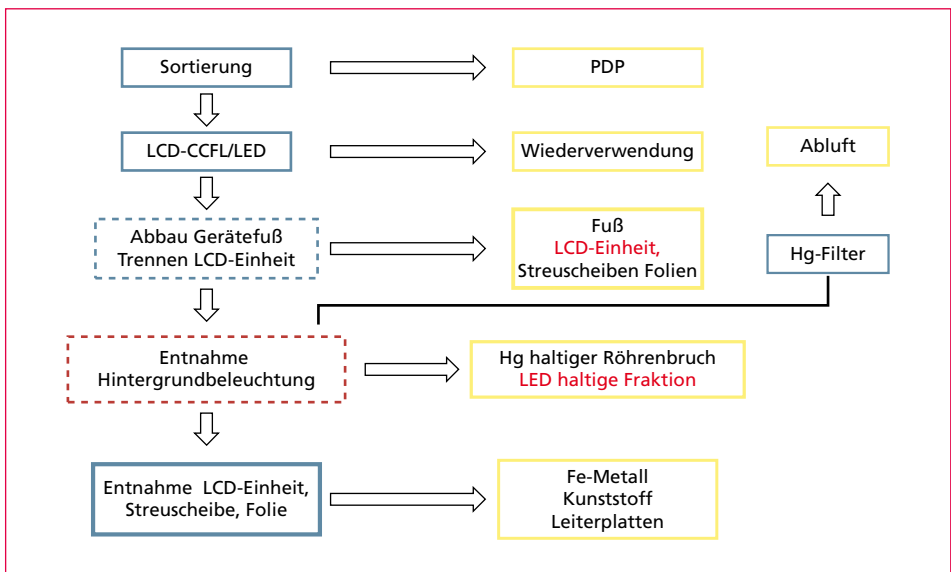


Bild 11: Verfahrensablauf zur Zerlegung von LCD-Geräten mit flächiger Hintergrundbeleuchtung

Die Schnitttiefe wird so eingestellt, dass die LCD-Anzeige, die Streuscheibe und die Polarisationsfolien durchtrennt werden, die Beleuchtungseinheiten jedoch nicht beschädigt werden. Nach dem Schneidprozess werden die LCD-Anzeige, die Streuscheibe und die Polarisationsfolien entnommen, wodurch der Zugang zu der Hintergrundbeleuchtung freigegeben ist. Der nächste Arbeitsschritt ist die Separierung der CCFL-Röhren der Hintergrundbeleuchtung. Die Röhren werden bei der Entnahme gebrochen und in ein luftdichtes Gebinde überführt. Die gesamte Abluft des Prozesses wird von Staubpartikeln und gasförmigen Quecksilber gereinigt. Bild 11 zeigt den schematischen Ablauf des Zerlegeverfahrens.

4. Quecksilber in LCD-Bildschirmgeräten

Das in den LCD-Bildschirmgeräten enthaltene Quecksilber ist ausschließlich in der Hintergrundbeleuchtung zu finden. Bei der Aufbereitung dieser Geräte muss sichergestellt werden, dass das enthaltene Quecksilber separiert wird. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden Analysen durchgeführt, die den Quecksilberinhalt eines LCD-Bildschirmgerätes darstellen. Bei dieser Analyse wurden Beleuchtungseinheiten von Geräten mit seitlicher, sowie von Geräten mit flächiger Beleuchtungsanordnung untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass in einer Leuchtstoffröhre der kleinen Geräte bis 19 Zoll etwa 2,7 mg Quecksilber enthalten ist. In diesen Geräten sind maximal vier Leuchtstoffröhren verbaut, was einen Quecksilberinhalt von 10,8 mg pro Gerät ergibt. Bei einem durchschnittlichen Gerätegewicht von etwa 4,5 kg ergibt sich somit ein Quecksilbergehalt von 2,40 mg/kg Gerät.

In einer Leuchtstoffröhre der großen Geräte über 19 Zoll sind laut Analyse durchschnittlich 2,5 mg Quecksilber enthalten. Die Anzahl der verbauten Beleuchtungseinheiten schwankt bei diesen Geräten, im Durchschnitt sind etwa 16 Röhren verbaut. Daraus ergibt sich ein Quecksilberinhalt von etwa 40 mg pro Gerät. Bei einem durchschnittlichen Gerätegewicht von etwa 14,5 kg liegt der Quecksilbergehalt bei 2,76 mg/kg Gerät.

Der gasförmige und damit emissionsrelevante Anteil an Quecksilber liegt nach anderen Studien deutlich darunter.

Weiterführend wurden im Forschungsprojekt Restfraktionen der Hintergrundbeleuchtung auf ihren Quecksilberinhalt untersucht, welche in seltenen Fällen im LCD-Bildschirmgerät nach dem Durchlaufen der teilautomatisierten Zerlegung zurück bleiben können. Diese Untersuchung ergab einen maximalen Quecksilberinhalt von 1,3 mg, was wiederum einen Quecksilbergehalt von 0,12 mg/kg Gerät ergibt. Das Quecksilberausbringen lag bei allen untersuchten Proben über 95 Prozent.

Arbeitsschutz

Beide Zerlege-Anlagen arbeiten unter einer kontrolliert abgesaugten Atmosphäre, wobei die dabei entstehende Abluft über einen Aktivkohlefilter gereinigt wird. So kann ausgeschlossen werden, dass Mitarbeiter, die an diesen Anlagen tätig sind, einer Belastung durch Quecksilber ausgesetzt werden. Zusätzlich zu der eingesetzten Absaugung

werden alle Arbeitsplätze in kontinuierlichen Abständen mit einem Quecksilbermonitor überwacht und kontrolliert. Der Arbeitsplatzgrenzwert für Quecksilber liegt derzeit bei $0,02 \text{ mg/m}^3$. Es konnten keine Quecksilberbelastungen an den Arbeitsplätzen festgestellt werden.

5. Aufbereitung der Zerlegefraktionen

Nach dem Verarbeiten der LCD-Bildschirmgeräte in den Zerlege-Anlagen liegen mehrere Zwischenprodukte vor. Diese sind die, Polarisationsfolien, Kunststoff-Streuscheiben, quecksilberhaltige Hintergrundbeleuchtung, schadstoffentfrachtete Restgerät und die LCD-Anzeige.

Polarisationsfolien und Streuscheiben

Die separierten Polarisationsfolien und Streuscheiben bestehen jeweils aus hochwertigen, reinen Kunststoffen und können einer werkstofflichen Verwertung zugeführt werden.

Quecksilberhaltige Hintergrundbeleuchtung

Die Bruchstücke der quecksilberhaltigen Hintergrundbeleuchtung werden in geeigneten, luftdicht verschlossenen Gebinden gesammelt und an das Lampenrecycling abgegeben.

Schadstoffentfrachtete Restgeräte

Die schadstoffentfrachteten Restgeräte werden weiter aufbereitet. Hierbei werden manuelle, mechanische und metallurgische Verfahren aus der Elektroaltgeräteaufbereitung auf Ihre Wirtschaftlichkeit und Effektivität in Hinblick auf die Rohstoffgewinnung verglichen.

6. Gewinnung des Indiums

Die LCD-Anzeige besteht jeweils aus zwei dünnen Glasscheiben, auf denen innen Indium-Leiterbahnen aufgebracht sind. Zwischen den Glasscheiben befinden sich die Flüssigkristalle. Außen befindet sich jeweils eine aus Kunststoff bestehende Polarisations-scheibe. Durch die Separierung der LCD-Anzeigen während des Zerlegeverfahrens wird eine Voranreicherung des Indiums erreicht. Von ausgangs etwa 12 g/t im Gesamtgerät liegt jetzt bereits eine Konzentration von etwa 190 g/t vor. Zur weiteren Indiumrückgewinnung muss die Fraktion LCD-Anzeige in einen geeigneten Aufbereitungsprozess überführt werden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde gemeinsam mit den Projektpartnern IFAD und Umicore ein Verfahren zur Indiumrückgewinnung entwickelt.

Auf Grund des volatilen Preises [1] und dem geringen Gehalt des Indiums in der Aufgabefraktion entstehen gewisse Anforderungen an die Indiumrückgewinnung aus LCDs. Zum einen sollten in Abhängigkeit von der Marktsituation – Preis, Nachfrage – unterschiedliche Aufbereitungstiefen zur Verfügung stehen, zum anderen sind lange Transportwege der Panels zu einer Indiumrückgewinnung unwirtschaftlich und somit zu vermeiden.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde ein modulares System entwickelt, so dass in Abhängigkeit von Markt und Produktionsstandort der Aufbereitungsprozess angepasst werden kann.

Das modulare System besteht aus einer mechanischen Aufbereitung (grau), sowie einer hydrometallurgischen Aufbereitung (Bild 12).

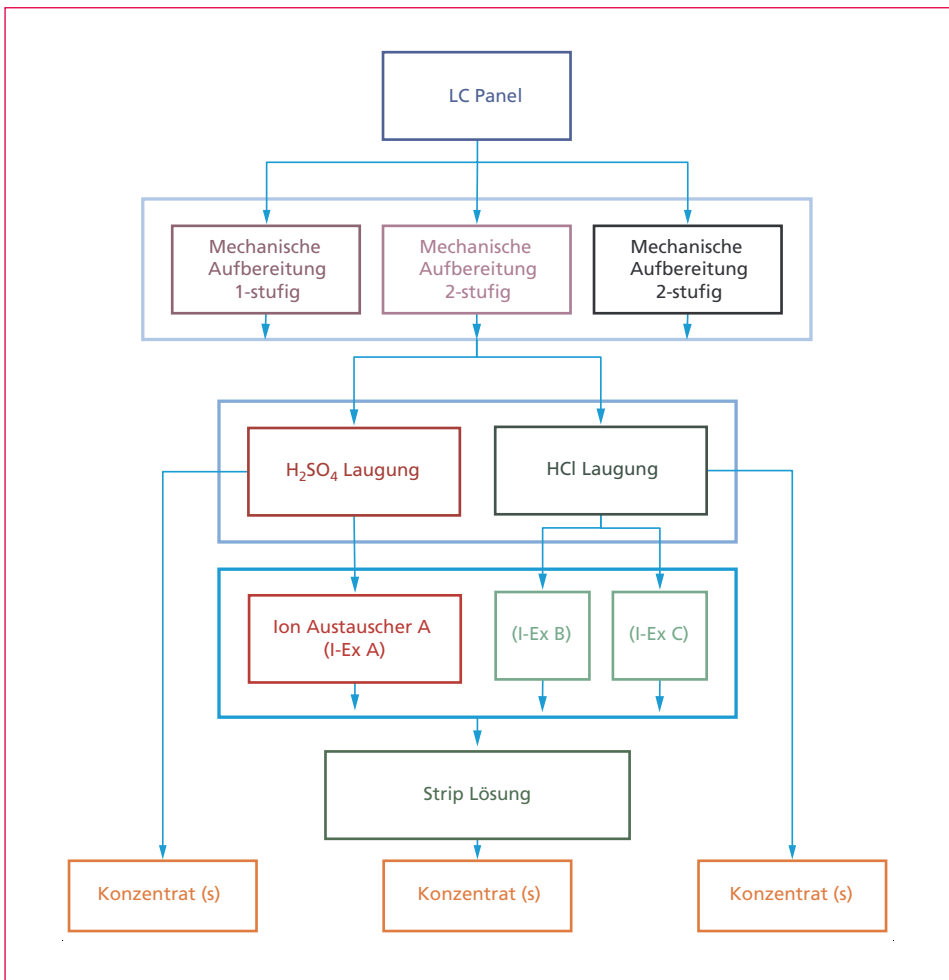


Bild 12: Modularer Prozess zur Indium-Rückgewinnung

Mechanische Aufbereitung

Die LCD-Anzeigen enthalten noch etwa 25 Prozent Kunststoffanteil, der in Form von Folienbeschichtung auf den Außenseiten der Glasscheiben aufgebracht ist. Mit einem speziellen Zerkleinerungsverfahren werden die LCD-Anzeigen so aufgeschlossen, dass der Glas/Kunststoffverbund gelöst wird und voneinander separiert werden kann. Zudem entsteht ein nötiger Aufschluss der es ermöglicht das Indium effektiver im nachfolgenden Schritt zu Laugen. Die weitgehend kunststofffreie Glasfraktion, welche das Indium enthält, wird dem Laugeverfahren zugeführt. Die abgetrennte Kunststofffraktion ist für eine energetische Verwertung bedingt geeignet. Die hier entwickelten Verfahren unterscheiden sich jeweils im benötigten Aufwand und den daraus resultierenden Ausbringen des Indiums, sowie der Qualität – Indiumgehalt, bzw. Glühverlust.

Hydrometallurgische Aufbereitung

Die hydrometallurgische Aufbereitung kann in zwei Verfahrensschritte geteilt werden: der Laugung und dem Ionentauscherprozess. Um eine möglichst hohe Flexibilität zu erreichen, wurde im Projekt sowohl eine schwefelsaure (H_2SO_4), als auch eine salzsaure (HCl) Route betrachtet. Nach der Laugung kann jeweils direkt ein Feststoff mittels Fällung gewonnen werden. Um eine weiterreichende Qualität zu ermöglichen wurden für beide Routen Ionenselektive Prozesse betrachtet. Hierdurch kann mit einem Mehraufwand die Qualität des Konzentrates deutlich verbessert werden.

Für eine genauere Betrachtung wurde folgender Basisprozess entwickelt:

Basisprozess (HCl-Laugung)

Das indiumhaltige Glas aus der mechanischen Aufbereitung der LCD-Anzeige wird in einen Reaktor gegeben, in welchem sich eine Säure mit definiertem pH-Wert befindet. Durch Rühren erfolgt eine vollständige Vermischung der Glasfraktion und des Lösungsmittels.

Nach einer bestimmten Laugezeit im Reaktor die eine vollständige Lösung des Indiums vom Panel gewährleistet, wird die Suspension über einen Vorlagebehälter in eine Fest-Flüssig-Trennung gepumpt. Hier wird die mit Indium aufkonzentrierte Lösung aus dem Feststoff abfiltriert. Nach der Entnahme der indiumangereicherten Lösung aus der Glasfraktion erfolgt ein Spülen des Porenvolumens mit Wasser. Durch das Spülen mit Wasser erfolgt ein *Austreiben* der Rest-Lösung. Diese Restlösung wird zusammen mit dem Filtrat in eine Säure-Vorlage überführt und anschließend für einen weiteren Laugeschritt aufgefrischt. Somit steht eine mit Indium angereicherte Säure für einen nächsten Lösungsprozess zur Verfügung.

Zur Gewinnung des Indiums aus diesem Kreislauf wird jeweils ein definiertes Volumen des Filtrats einer Fällung zugeführt. Hierbei wird das abgenommene Lösungsvolumen mit Natriumhydroxid auf einen bestimmten pH-Wert gebracht, so dass das Indium vollständig ausfällt.

Durch diese Art der Prozessführung ist es möglich, nahezu 95 Prozent des in der LCD-Anzeige enthaltene Indium auszubringen.

7. Ausblick

Um einen ressourceneffizienten und wirtschaftlichen Recyclingprozess für LCD-Bildschirmgeräte zu verwirklichen, muss bereits bei der Sammlung der Geräte angesetzt werden. Es ist ein Sammelsystem zu schaffen, das es ermöglicht, diese Geräteart separat zu erfassen, bruchfrei zu sammeln und zu transportieren. Um LCD-Bildschirmgeräte wirtschaftlich aufzubereiten zu können, muss ein gewisser Gerätedurchsatz erreicht werden, welcher durch den Einsatz von teilautomatisierter Zerlegeverfahren gewährleistet wird. Für den Einsatz teilautomatisierter Zerlegeverfahren ist eine Unterscheidung der LCD-Geräte in Geräte mit seitlicher Hintergrundbeleuchtung und in Geräte mit flächiger Hintergrundbeleuchtung vorzunehmen. Diese Unterscheidung sollte möglichst schon bei der Sammlung der Geräte erfolgen.

Ein Hauptaugenmerk bei der Aufbereitung von LCD-Bildschirmgeräten ist die Entfernung der quecksilberhaltigen Hintergrundbeleuchtung aus den Geräten. Mit geeigneten Zerlegeverfahren ist es möglich, diese schadstoffhaltigen Bauteile mit wenigen Arbeitsschritten aus den Geräten zu separieren. Gleichzeitig kann in diesem Arbeitsschritt die indiumhaltige LCD-Anzeige gewonnen werden. Durch die Separation der LCD-Anzeige vom Restgerät erfolgt bereits eine erste Anreicherung des enthaltenen Indiums.

Die indiumhaltigen LCD-Anzeigen werden in einem chemischen Laugeverfahren weiter aufbereitet, so dass am Ende ein vermarktungsfähiges Indiumkonzentrat vorliegt.

Die schadstofffreien Restgeräte können mit vorhandenen Verfahrenstechniken der Elektroaltgeräteaufbereitung zu hochwertigen Sekundärrohstoffen weiter verarbeitet werden.

8. Quellen

- [1] metalprices.com: Indium Prices 5 Years; https://www.metalprices.com/pubcharts/Public/Indium_Price_Charts.asp; aufgerufen am 26.01.2016
- [2] Michels, A.: Daten und Prognosen zum Lebenszyklus von LCD- Bildschirmgeräten; Ecowin; Auftragsstudie für Verbundprojekt InAccess i.A von Ecowin GmbH
- [3] Salhofer, S. et al: Recycling of LCD Screens in Europe - State of the Art and Challenges; Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, pp 454-458; Springer Berlin Heidelberg, 2011
- [4] sttista.com: Absatz von Fernsehgeräten auf dem Konsumentenmarkt in Deutschland von 2005 bis zum 1. Halbjahr 2015 nach Gerätetyp (in 1.000 Stück); Primärquellen: GfK; gfu; BVT; <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/20172/umfrage/absatzzahlen-fuer-fernseher-nach-je-weiligem-geraetetyp-seit-2005/>; aufgerufen am 26.01.2016