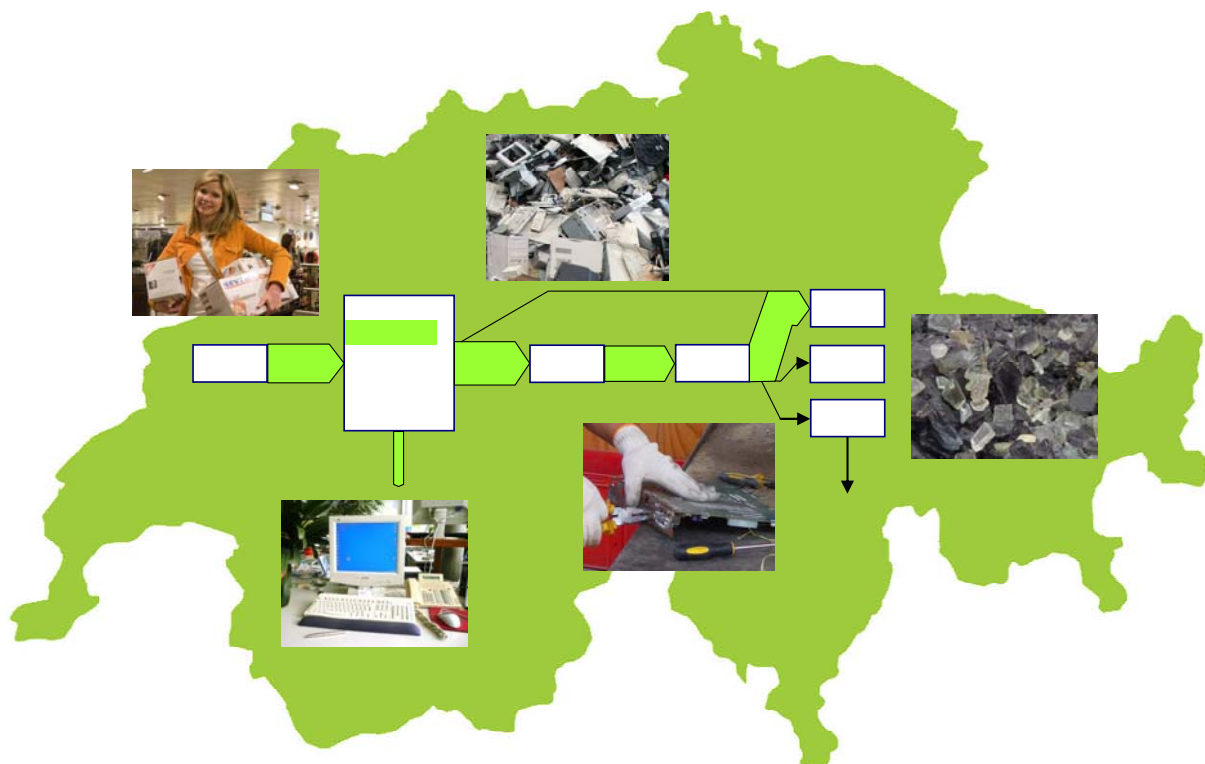


# Materialflüsse der elektrischen und elektronischen Geräte in der Schweiz



## *Autoren*

Esther Müller, Rolf Widmer, Empa

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Su mandato dell'Ufficio federale dell'ambiente (UFAM)

Commissioned by the Federal Office for the Environment (FOEN)

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

**Auftragnehmer:** Empa, Abteilung für Technologie und Gesellschaft

**Autor/Autorin:** Esther Müller, Rolf Widmer

**Begleitung BAFU:** Marco Buletti, Susan Glättli

**Titelfotos:** Empa, [www.e-waste.ch](http://www.e-waste.ch)

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

**Freigegeben:** September 2010

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	1
Zusammenfassung .....	2
Résumé .....	3
Summary .....	4
1 Einleitung und Zielsetzung .....	5
2 Methodik .....	5
2.1 Zusammensetzung .....	6
2.2 Massen-, Material- und Stoffflussanalyse.....	6
2.3 Umweltbelastung .....	7
3 Resultate und Diskussion.....	8
3.1 Zusammensetzung .....	8
3.2 Massenflussanalyse .....	9
3.3 Material- und Stoffflussanalyse .....	10
3.3.1 "Häufigste Stoffe".....	10
3.3.2 "Wertvolle Stoffe".....	11
3.3.3 "Toxische Stoffe".....	12
3.3.4 Wert der in EEE gebundenen Stoffen .....	14
3.4 Umweltbelastung .....	15
3.5 Datenunsicherheit.....	17
3.5.1 Zusammensetzung .....	17
3.5.2 Massenflussanalyse .....	17
3.5.3 Material- und Stoffflussanalyse .....	17
3.5.4 Umweltbelastung .....	17
4 Eignung der Methodik .....	18
4.1 Wahl der Software .....	18
4.2 Vorgehensweise .....	18
5 Ausblick und Vorschläge für weiteres Vorgehen .....	19
6 Literaturverzeichnis .....	20
7 Anhang .....	21
7.1 Zusammensetzung .....	21
7.2 Material- und Stoffflussanalyse .....	22
7.3 Umweltbelastung .....	23

## Zusammenfassung

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) will sich eine Übersicht über die Umweltbelastung ausgewählter Materialien, Produkte und Dienstleistungen verschaffen, um möglichen Handlungsbedarf zu erkennen und eine nachhaltige Materialbewirtschaftung zu ermöglichen. Es benötigt dazu Daten und Informationen über direkte und indirekte Materialflüsse und ihre ökologische Bewertung über den ganzen Lebenszyklus verschiedener Materialien, Produkte und Dienstleistungen.

In dieser Arbeit werden die Materialflüsse von elektrischen und elektronischen Geräten (EEE = electrical and electronic equipment) in der Schweiz untersucht. Gleichzeitig wird eine Methode entwickelt, die für die Untersuchung weiterer Materialien, Produkte und Dienstleistungen verwendbar ist und ein Vergleich zwischen den verschiedenen Studien erlaubt.

Zunächst werden relevante Materialien bzw. Stoffe definiert, welche der Übersicht halber in die drei Gruppen „häufigste Stoffe“, „wertvolle Stoffe“ und „toxische Stoffe“ eingeteilt werden. Aus diesen drei Gruppen wird die Zusammensetzung von verschiedenen Kategorien elektrischer und elektronischer Geräte ermittelt. Danach wird ein generisches System für den Lebenszyklus von EEE innerhalb der Systemgrenze Schweiz entwickelt und die Massenflüsse und Lager sowie Transferkoeffizienten abgeschätzt. Sind die Massenflüsse bekannt, können zusammen mit Zusammensetzung und Transferkoeffizienten die jeweiligen Material- bzw. Stoffflüsse in MS Excel quantifiziert und mit e!sankey grafisch dargestellt werden. Weiter wird auch die Umweltbelastung durch elektrische und elektronische Geräte während des gesamten Lebenszyklus unter Verwendung der ecoinvent Datenbank und Simapro quantifiziert.

Mit den vorhandenen Daten kann die Zusammensetzung der Kategorien Haushaltsgrossgeräte (HHGG), Haushaltskleingeräte (HHKG), Informations- und Kommunikationstechnologien (ICT) und Unterhaltungselektronik (UE) sowie Leuchtmitteln (LM) abgeschätzt werden. Die Zusammensetzung wird wie erwartet hauptsächlich von der Gruppe „häufigste Stoffe“ wie Eisen, Kunststoff und Glas dominiert. Wertvolle und toxische Stoffe wie z.B. Gold bzw. Quecksilber kommen nur in sehr geringen Mengen vor. Eine Ausnahme bildet die Kategorie ICT/UE, wo Bleiglas und Kunststoffe mit bromierten Flammschutzmitteln aus der Gruppe „toxische Stoffe“ über 40% ausmachen.

Die Massenflussanalyse für das Jahr 2006 ergibt einen totalen Input bzw. Verkauf an EEE von rund 140'000 t in der Schweiz im Jahr 2006. Der Fluss vom Konsum in die Sammelstellen oder den Haushaltskehrtricht beträgt rund 120'000 t, das Lager an EEE in der Schweiz ist demnach in 2006 um ca. 20'000 t angewachsen. In die Aufbereitung gelangen rund 100'000 t, wovon mehr als 70% stofflich verwertet, rund 25% thermische entsorgt, und weniger als 2% deponiert werden.

Mit der Materialflussanalyse kann gezeigt werden, dass die meisten häufigen Metalle, Edelmetalle, Schwermetalle sowie Glas mit einer Verwertungsquote von über 90% stofflich verwertet werden. Kunststoffe hingegen wurden in 2006 noch zu über 80% verbrannt. Indium als einer der rarsten Stoffe der Erdkruste wird in der Schweiz bisher nicht stofflich verwertet, sondern gelangt ebenfalls in die thermische Entsorgung. Quecksilber, welches man immer noch in Leuchtmitteln einsetzt, wird heute meistens deponiert.

Der Materialwert des Lagers an EEE kann über die Preise an den Rohstoffbörsen abgeschätzt werden. Der gesamte Wert beträgt rund 2 Mia. CHF. Dieser Gesamtwert ist jedoch über die Rohstoffpreise grossen Schwankungen ausgesetzt, was starke Auswirkungen auf das Recycling-Geschäft hat.

Da in ecoinvent nur Daten für einige ICT-Geräte vorhanden sind, wird ein Desktop-Computer mit CRT- oder LCD-Monitor und ein Laptop verglichen. Die Produktion führt bei allen drei Geräten zu den grössten Umweltbelastungen. Die Umweltbelastung während des Gebrauchs hängt praktisch nur vom Strombedarf eines Gerätes ab. Mit dem Schweizer Strommix ist die durch den Gebrauch verursachte Umweltbelastung deutlich kleiner als diejenige durch die Produktion. Durch das Recycling werden Umweltbelastungen vermieden, wenn die entstehenden sekundären Rohstoffe Primärressourcen ersetzen. Im Vergleich der drei Geräte schneidet der Laptop klar am besten ab.

Ein Ausblick zeigt, dass die Entwicklung der EEE ein sehr schneller und dynamischer Prozess ist, der schwierig vorauszu sehen ist. Da die hier vorgestellte Arbeit eine Momentaufnahme ist, sollen Methoden gefunden werden, welche es erlauben, das System auch dynamisch zu erfassen.

## Résumé

L'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV) désire fournir une vision globale des impacts liés à une sélection de matériaux, produits et services, dans le but de soutenir une gestion durable des matériaux. Il est donc nécessaire d'obtenir des informations sur les flux de matières et leurs impacts tout au long de leur cycle de vie.

La présente étude traite des flux de matières liés aux équipements électriques et électroniques (EEE) en Suisse. En parallèle, une méthode pour l'évaluation d'autre matériaux, produits et services a été développée, permettant de comparer les différentes études.

Cette méthode définit les fractions pertinentes, qui ont été regroupées, pour une meilleure vision d'ensemble, dans les trois catégories génériques, « matériaux principaux », « matériaux de valeur » et « matériaux toxiques ». Ensuite la composition de différentes catégories d'EEE est déterminée. Un system type des flux de matières liés au cycle de vie des EEE est développé, et les coefficients de transfert sont estimés. La composition des équipements, combinée aux flux de matières et aux coefficients de transfert, permet de calculer les flux de matières dans MS Excel et de les illustrer avec e!sankey. De plus, les impacts environnementaux de tout le cycle de vie des EEE est calculé au moyen de Simapro et d'ecoinvent.

Les données disponibles permettent de déterminer la composition des gros électroménagers (GE), petit électroménagers (PE), technologies de l'information et communication (TIC), l'électronique de loisirs (EL) ainsi que les luminaires (L). Leur composition est dominée par les « matériaux en vrac » tels que le fer, les plastics et le verre, à l'exception des catégories TIC /EL où les fractions de verre plombé et de plastics contenant des retardateurs de flammes bromés, faisant partie du groupe « matériaux toxiques » comptent pour 30 % de la masse.

Les résultats de l'analyse de flux de matières pour l'année 2006 montrent qu'approximativement 140'000 t d'EEE sont entrés en Suisse cette année. Les consommateurs ont généré un flux de 120'000 t vers la collection de déchets d'EEE ou les déchets ménagers, de sorte que le stock d'EEE en Suisse a crû de 20'000 t en 2006. Environ 100'000 t des déchets collectés sont traités, où 70 % des matériaux sont récupérés, 25 % incinérés (avec valorisation énergétique) et moins de 2 % mis en décharge.

L'analyse de flux de matières montre un taux de récupération des matériaux supérieur à 90 % pour les « matériaux principaux » ainsi que pour la plupart des métaux précieux, des métaux lourds et du verre. D'un autre côté, plus de 80 % des plastics étaient incinérés en 2006. L'Indium, l'une des éléments les plus rares dans la lithosphère, n'est pas recyclé à ce jour en Suisse, mais principalement incinéré et donc perdu. Le mercure, encore utilisé dans les équipements luminaires, est principalement stocké dans des unités spécialisées souterraines.

La valeur des matériaux contenus dans les EEE stockés en Suisse peut être estimée à partir des prix des matières premières. La totalité des matériaux contenus dans le stock des EEE en Suisse vaut environ 1.9 milliards de CHF. Néanmoins, cette valeur varie considérablement avec les fluctuations des prix des matières premières, ce qui affecte fortement l'industrie du recyclage.

Le calcul des impacts environnementaux des EEE avec Simapro a été limité aux quelques équipements TIC dont les données sont disponibles dans ecoinvent. Ainsi, un ordinateur fixe avec écran à tube cathodique, avec un écran plat et un ordinateur portable ont été comparés pour l'exemple. La phase de production a l'impact environnemental le plus élevé pour les trois appareils. Les impacts de la phase d'utilisation dépendent principalement de la consommation électrique des appareils ainsi que du mix électrique du pays. Calculés avec le mix électrique Suisse, cet impact est clairement inférieur pour les trois appareils en comparaison avec la phase de production. Le recyclage a un impact positif pour tous les appareils grâce à la récupération de matières qui permet d'éviter leur production primaire. En comparaison, l'ordinateur portable présente la meilleure performance des trois appareils sur l'ensemble du cycle de vie.

Le développement des EEE est un processus très rapide et dynamique difficile à anticiper. Cette étude ne présente qu'une photographie instantanée de ce processus, de sorte qu'il est nécessaire de trouver d'autres méthodes permettant de suivre le système de manière dynamique.

## Summary

The Federal Office for the Environment (FOEN) wants to provide an overview of impacts of selected materials, products or services, to support a sustainable material management. Therefore information of material flows and impacts throughout their whole life cycle is needed.

In this study, material flows linked to electrical and electronic equipment (EEE) in Switzerland are investigated. At the same time, a method was developed, which can be applied for the assessment of further materials, products or services and thus allows a comparison of the different studies.

The method defines the relevant fractions, which for a better overview are divided into the three groups “bulk materials”, “valuable materials” and “toxic materials”. Then it determines the composition of different categories of EEE. A generic mass flow system of the life cycle of EEE within the Swiss boundaries is developed and mass flows as well as transfer coefficients are estimated. The composition, combined with mass flows and transfer coefficients allow to calculate material flows in MS Excel and to illustrate them with e!sankey. Furthermore, environmental impacts of the whole life cycle of EEE are calculated using Simapro and ecoinvent.

The available data allow determining the composition of the categories large household appliances (LHA), small household appliances (SHA), information and communication technologies (ICT) and consumer electronics (CE) as well as lighting equipment (LE). The composition is dominated by the group “bulk materials”, such as iron, plastics and glass. Valuable and toxic materials such as gold or mercury, respectively, are only found in very small quantities. An exception is the category ICT/CE, where leaded glass and plastics containing brominated flame retardants of the group “toxic materials” account for over 30% of the mass.

The result of the mass flow analysis for the year 2006 shows, that approx. 140'000 t of EEE enters Switzerland. The flow from the consumption into the waste collection or the municipal waste accounts for ca. 120'000 t, hence, the stock of EEE in Switzerland in 2006 has grown ca. 20'000 t. Approx. 100'000 t reach the waste processing, whereby over 70% of the material is recovered, 25% is thermally disposed of (with energy recovery) and less than 2% is landfilled.

From the material flow analysis results that the material recovery rate is higher than 90% for the bulk metals as well as for most of precious- and heavy metals and glass. On the other hand, over 80% of plastics were thermally disposed of in 2006. Indium, as one of the scarcest metals in the lithosphere, is so far not recycled in Switzerland but also mostly incinerated and therefore lost. Mercury, which is still used in lighting equipment, is mostly disposed of in specialised underground depots.

The material value of EEE stocked in Switzerland can be estimated via the commodity prices. The total value of the stock of EEE in Switzerland adds up to ca. 2 billion CHF. But with the commodity prices, this value fluctuates considerably, which strongly influences on the recycling business.

The calculation of environmental impacts of EEE with Simapro was limited to the few ICT equipment, which are so far available in ecoinvent. Thus, as an example, a desktop PC with a CRT- monitor or a LCD-monitor and a laptop were compared. The production phase has the highest environmental impact for all three devices. The impacts of the use phase mostly depend on the energy consumption of a device and the electricity mix. Calculated with the Swiss electricity mix, these impacts are considerably lower for all three devices compared with the production. The recycling has a positive impact for all devices since recovered material can replace primary production. Overall, comparing the life cycle of all three devices, the laptop clearly performs best.

An outlook shows that the development of EEE is a very fast and dynamic process which is difficult to anticipate. Since the presented study contains only a snapshot of this process, methods should be found which also allow capturing the system in a dynamic way.

## 1 Einleitung und Zielsetzung

Das BAFU will sich eine Übersicht über die Auswirkungen ausgewählter Materialien verschaffen, um möglichen Handlungsbedarf zu erkennen, mit dem Ziel einer nachhaltigen Materialbewirtschaftung. Es benötigt dazu Daten und Informationen über Materialflüsse und ihre ökologische Bewertung über den ganzen Lebenszyklus hin.

Ziel ist, basierend auf aussagekräftigen Daten, Handlungsfelder zu identifizieren, wo in Zukunft allfällige material- und produktpolitische neue oder zusätzliche Vorkehrungen zu treffen sind, wie z.B. erhöhte Anforderungen an die zu rezyklierenden Mengen oder Vorgaben zur Verwertung bestimmter seltener Metalle. Das BAFU will so eine Übersicht gewinnen, welche Materialien in Zukunft wichtig werden oder schon sind, sowie die Bevölkerung informieren, wo eine nachhaltige Materialbewirtschaftung einsetzen kann oder muss. Der Politik, der Wirtschaft und den KonsumentInnen müssen hierzu verständlich aufgearbeitete Informationen zur Verfügung gestellt werden.

In dieser Arbeit werden elektrische und elektronische Geräte (EEE = electrical and electronic equipment) in der Schweiz untersucht. Ziel der Untersuchung ist zum einen das Erstellen einer Übersicht über die Mengen von elektrischen und elektronischen Geräten und den darin verbauten Materialien, welche in die Schweiz gelangen, die Schweiz verlassen oder hier entsorgt und verwertet werden. Es interessiert also, wie viel an Lager vorhanden ist, welches die Lagerbewegungen sind und wie viel verloren geht. Weiter werden auch Umweltbelastungen während des Lebenszyklus einzelner Geräte quantifiziert. Auch soll anhand vom Beispiel EEE eine Methodik entwickelt werden, die auch für weitere zu untersuchende Materialien, Produkte oder Dienstleistungen anwendbar ist und erlaubt, die verschiedenen Studien miteinander zu vergleichen.

## 2 Methodik

Zu Beginn der Arbeit müssen die zu untersuchenden Materialien, Produkte oder Dienstleistungen genau definiert und falls nötig in Gruppen bzw. Kategorien zusammengefasst werden. Die Erfassung und Verarbeitung aller Daten erfolgt in MS Excel.

Gemäss WEEE-Directive (EC 2002) werden EEE in 10 Kategorien eingeteilt. In der Schweiz gilt die Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (VREG) welche nur 7 dieser 10 Kategorien berücksichtigt. In dieser Arbeit werden deshalb die folgenden sieben Kategorien untersucht:

- I: Haushaltsgrossgeräte (HHGG)
- II: Haushaltskleingeräte (HHKG)
- III/IV: Informations- und Kommunikationstechnologien und Unterhaltungselektronik (ICT/UE)
- V: Leuchten und Leuchtmittel (LE und LM)
- VI: Bau-, Garten- und Hobbygeräte (BGH)
- VII: Spielwaren (SPW)

Dabei wurden folgende Anpassungen vorgenommen: In Kategorie I werden Haushaltsgrossgeräte ohne Kühlgeräte berücksichtigt. Kühlgeräte enthalten jedoch umweltrelevante Stoffe und sollten in Zukunft ebenfalls miteinbezogen werden. In Kategorie V werden die Leuchten und die Leuchtmittel aufgrund ihrer verschiedenen Zusammensetzung und Umweltrelevanz getrennt behandelt.

## 2.1 Zusammensetzung

Um Material- und Stoffflüsse quantifizieren zu können, muss die Zusammensetzung bekannt sein.

Der Übersicht halber werden die Materialien in EEE in die drei Gruppen „häufigste Stoffe“, „wertvolle Stoffe“ und „toxische Stoffe“ eingeteilt und für jede Gruppe drei bis fünf wichtige Stoffe, welche in dieser Arbeit untersucht werden, bestimmt.

In der Gruppe „häufigste Stoffe“ werden die Metalle Eisen, Aluminium und Kupfer sowie Kunststoffe ohne bromierte Flammschutzmittel und Glas betrachtet. Diese Stoffe machen den grössten Anteil an EEE aus und beinhalten keine schädlichen Substanzen.

Die „wertvollen Stoffe“ umfassen die Edelmetalle Gold, Silber und Palladium, welche an der Rohstoffbörse einen deutlich höheren Wert als die häufigsten Metalle aufweisen. Weiter wird auch Indium untersucht, welches gemäss dem U.S. Geological Survey zu den knappsten Metallen in der Erdkruste gehört und zur Herstellung von elektronischen Geräten zunehmend an Bedeutung gewinnt.

Die Gruppe „toxische Stoffe“ beinhaltet die Metalle Blei, Cadmium und Quecksilber, die für den Menschen gesundheitsschädigend sind. Weiter werden auch Kunststoffe mit bromierten Flammschutzmitteln, welche ebenfalls gesundheitlich und/oder ökologisch bedenklich sind und Bleiglas in diese Gruppe eingeteilt. Reines Bleiglas gilt nicht als meldepflichtiger Abfall gemäss der Verordnung über den Verkehr mit Abfällen (VeVA). Es wird dennoch in dieser Gruppe behandelt, um einen Vergleich der metallischen Bleiflüsse und den in Glas gebundenen Bleiflüssen zu ermöglichen.

Nachfolgend sind die drei Gruppen und die jeweiligen untersuchten Stoffe noch einmal zusammengefasst:

- „häufigste Stoffe“: Eisen (Fe), Aluminium (Al), Kupfer (Cu), Kunststoff (KS), Glas
- „wertvolle Stoffe“: Gold (Au), Silber (Ag), Palladium (Pd), Indium (In)
- „toxische Stoffe“: Blei (Pb), Cadmium (Cd), Quecksilber (Hg), Kunststoff mit bromierten Flammschutzmitteln (KS bromiert), Beiglas

Zur Berechnung der Zusammensetzung werden folgende Daten verwendet:

- Projekt Batchversuche SWICO und SENS (Technische Kontrollstelle SENS und SWICO 2008)
- Metallische und nichtmetallische Stoffe im Elektronikschrott (BUWAL 2004)
- Zwischenbericht zur Verwertung von Kunststoffen aus Elektro- und Elektronikgeräten (Wäger 2008)
- Materialzusammensetzung der European Lamp Companies Federation (ELCF 2008)
- Materialzusammensetzung von Leuchstoffröhren (Wertstoff-Börse GmbH 2002)

## 2.2 Massen-, Material- und Stoffflussanalyse

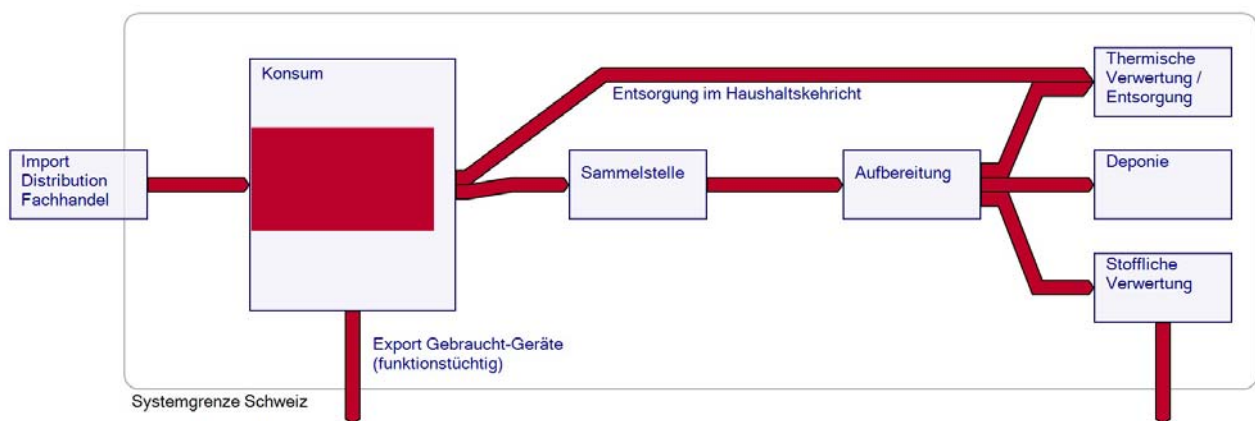
Zur Quantifizierung der Massen-, Material- und Stoffflussströme durch die Schweiz wird unter Berücksichtigung der vorhandenen Daten ein generisches System entwickelt, welches für alle Kategorien und Material- und Stoffgruppen angewendet werden kann. Das generische System umfasst den Lebenszyklus innerhalb der Systemgrenze Schweiz. Die Produktion, die hauptsächlich im Ausland stattfindet, wird für die Massen-, Material- und Stoffflussanalyse nicht berücksichtigt. Es werden möglichst aktuelle Daten verwendet, um den aktuellen Zustand des Systems abzubilden. Falls möglich, können auch Zeitreihen miteinbezogen werden.

Sind die Massenflüsse bekannt, können darauf zusammen mit Zusammensetzung und Transferkoeffizienten die jeweiligen Material- bzw. Stoffflüsse quantifiziert und grafisch dargestellt werden. Die grafische Darstellung hilft, die Übersicht in der grossen Datenmenge zu bewahren sowie Ungenauigkeiten, Fehler, falsche Annahmen etc. zu erkennen und zu korrigieren. Verwendet wird dazu das Programm e!sankey, welches ein Verlinken der Flüsse im Diagramm mit Excel-Daten erlaubt.



Das System für EEE in der Schweiz wird einheitlich gemäss Abbildung 1 mit sieben Prozessen und neun Flüssen beschrieben. Einzig im Prozess Konsum kann sich ein Lager bilden. Lager, welche durch die Deponierung von Materialien und Stoffen oder von Schlacken nach der thermischen Verwertung entstehen, werden nicht berücksichtigt. Die Deponie steht dafür, dass die meisten Stoffe nur mit einem Verlust rezykliert werden können. Dieser Verlust ist stark vereinfacht mit einem Fluss aus der Aufbereitung in die Deponie dargestellt. Nur sehr wenige Stoffe werden direkt deponiert. Die Deponierung von Stoffen welche in Schlacken aus der thermischen Verwertung/Entsorgung enthalten sind, wird vernachlässigt.

Die Deponierung bzw. der Verlust sowie auch die stoffliche Verwertung finden teilweise auch im Ausland statt. Da dies für die Aussagen im vorliegenden Bericht mengenmässig nicht relevant ist, werden diese Prozesse der Einfachheit halber innerhalb der Schweizer Systemgrenze dargestellt.



**Abbildung 1: Generisches System der durch elektrische und elektronische Geräte verursachten Flüsse und Lager in der Schweiz.**

Aufgrund dieses Systems werden mit den vorhandenen Daten zunächst die Massenflüsse der einzelnen Kategorien abgeschätzt. Transferkoeffizienten werden zum Teil abgeschätzt, zum Teil aus der Literatur übernommen.

Folgende Daten werden für die Berechnung der Massenflüsse verwendet:

- Verkaufszahlen des Fachverbands Elektroapparate für Haushalt und Gewerbe Schweiz (FEA 2008)
- Verkaufs- und Recyclingzahlen SENS (SENS 2007a; SENS 2007b)
- Verkaufs- und Recyclingzahlen SWICO (SWICO 2007)
- Elektronikgeräte in der Schweiz 2001 (Künzler Bossert & Partner GmbH 2001)
- Erhebung der Kehrrechtzusammensetzung 2001/02 (BUWAL 1995; BUWAL 2003)
- Weissbuch (Robert Weiss Consulting 2007)
- Allgemeine statistische Daten des BFS (BFS 2008)
- Zollstatistik (1988-2008)

## 2.3 Umweltbelastung

Die Berechnung der Umweltbelastung erfolgt mit dem LCA-Programm SimaPro unter Verwendung der ecoinvent-Datenbank. Die Berechnung der Umweltbelastung kann mit diversen Indikatoren erfolgen, z.B. Umweltbelastungspunkte, kumulierter Energiebedarf etc. Als Lebenszyklus werden die Produktion (meistens im Ausland), der Gebrauch und die Entsorgung angeschaut. Da aus bestehenden Untersuchungen bekannt ist, dass der Transport nicht relevant ist, wird dieser vernachlässigt.

In ecoinvent sind Daten für Desktop-Computer, Notebook, CRT- und LCD-Monitor, Drucker, Maus und Tastatur (alle Kat. III) vorhanden. In dieser Arbeit wird ein Desktop-Computer mit CRT- oder LCD-Monitor und ein Notebook verglichen.

### 3 Resultate und Diskussion

#### 3.1 Zusammensetzung

Die vorhandenen Daten erlauben die Abschätzung der Zusammensetzung der Kategorien HHGG, HHKG, ICT/UE und LM. Für die Kategorien LE, BGH und SPW liegen noch keine Daten über die Zusammensetzung vor. In der folgenden Tabelle sind die in den jeweiligen Kategorien vorkommenden Stoffe und Materialien in Gewichts-% zusammengefasst.

**Tabelle 1: Zusammensetzung der Kategorien I – V in % des Gesamtgewichts (n.a.: Ein Vorkommen dieser Stoffe in sehr kleinen Mengen kann nicht ausgeschlossen werden, es sind jedoch keine Daten vorhanden).**

Material	Haushaltsgross- geräte (HHGG)	Haushaltsklein- geräte (HHKG)	ICT und Unterhaltungs- elektronik (ICT/UE)	Leuchtmittel (LM)
Eisen	43	29	36	n.a.
Aluminium	14	9.3	5.0	14
Kupfer	12	17	4.0	0.22
Kunststoff	19	37	12	n.a.
Glas	0.017	0.16	0.30	77
Gold	6.7E-07	6.1E-07	2.4E-04	n.a.
Silber	7.7E-06	7.0E-06	1.2E-03	n.a.
Palladium	3.0E-07	2.4E-07	6.0E-05	n.a.
Indium	0	0	5.0E-04	5.0E-04
Blei	1.6	0.57	0.29	n.a.
Cadmium	0.014	8.3E-03	0.018	n.a.
Quecksilber	3.8E-05	1.9E-05	7.0E-05	0.020
Kunststoff „bromiert“	0.29	0.75	18	3.7
Bleiglas	0	0	19	0
Übriges	10	6.9	5.7	5.0

Die „häufigsten Stoffe“ machen je nach Kategorie rund 60 – 90% des Gesamtgewichts aus. Die Mengen an „wertvollen Stoffen“ sind sehr klein. Über den höchsten Anteil verfügt die Kategorie ICT/UE mit 0.003%. Die „toxischen Stoffe“ machen nur wenige Prozent aus, mit Ausnahme der Kategorie ICT/UE, wo durch die grosse Menge an Kunststoffen mit bromierten Flammenschutzmitteln und Bleiglas der Anteil beinahe 40% beträgt. Wird die Zusammensetzung grafisch dargestellt (siehe Abbildung 2) sind die kleinen Fraktionen (v.a. wertvolle und toxische Metalle) kaum noch zu erkennen. Die Abbildungen der übrigen Kategorien sind im Anhang zu finden.

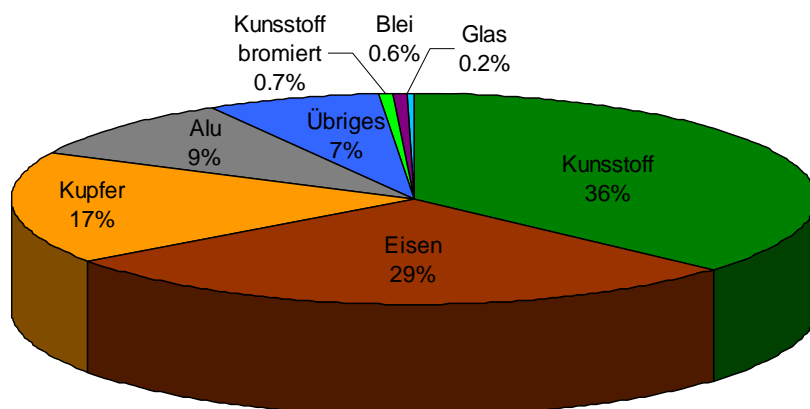


Abbildung 2: Zusammensetzung in Gewichts-% der Kategorie HHKG.

### 3.2 Massenflussanalyse

Mit Hilfe von Verkaufszahlen, Angaben über rezyklierte Mengen und eigenen Abschätzungen zu Lager, Export und Mengen im Haushaltskehrrecht werden die Massenflüsse der verschiedenen Kategorien in der Schweiz berechnet bzw. abgeschätzt.

Je nach vorhandenen Daten werden Zeitreihen von 1990 bis 2006 (Kat. I, II, III und IV) oder von 2005 bis 2007 (Kat. V, VI und VII) berücksichtigt. Abbildung 3 zeigt die kumulierten Massenflüsse aller Kategorien für das Jahr 2006.

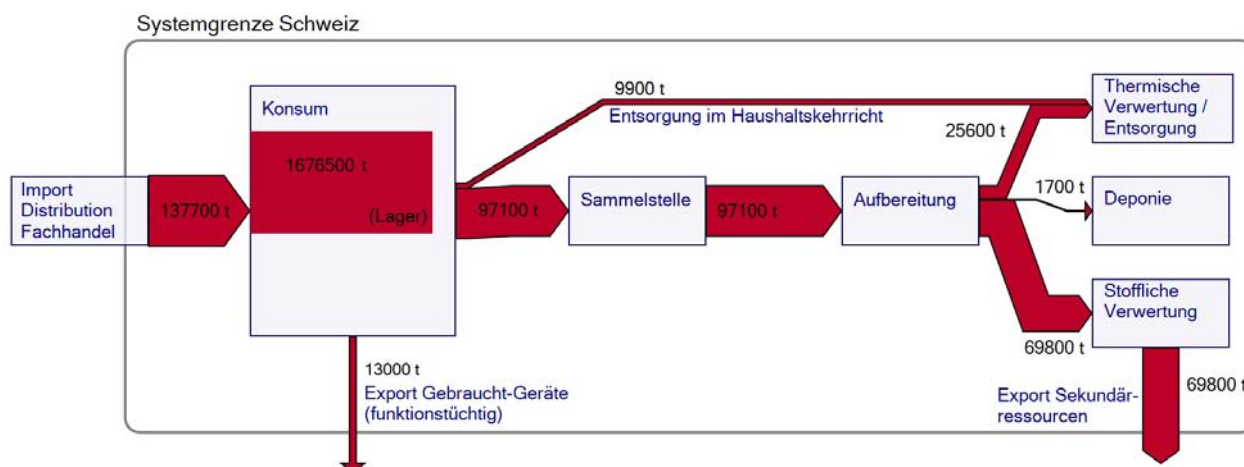


Abbildung 3: Gesamtflüsse aller elektrischen und elektronischen Geräte im Jahr 2006.

Im Jahr 2006 wurden als Input in das System rund 140'000 t Geräte verkauft, 120'000 t verliessen im gleichen Jahr den Prozess Konsum. Somit wuchs das Lager um knapp 20'000 t an. Von den rund 100'000 Tonnen, welche in die Aufbereitung gelangten, wurden ca. 72% stofflich verwertet, 26% wurden thermisch verwertet und weniger als 2% deponiert.

Obwohl dies aus der gesamten Massenbilanz nicht ersichtlich ist, besteht vor allem in der Kategorie ICT die Tendenz, dass Geräte immer kleiner und leichter werden. Dies führt zu einer gewichtsmässigen Abnahme des Verkaufs, obwohl die Anzahl der verkauften Geräte immer noch zunimmt.

Die Kategorien HHKG und ICT/UE haben einen Gewichtsanteil von über 75% an Flüssen und am Lager. HHKG kommen auf einen Anteil von rund 10%, die Kategorien SPW, BGH, LE und LM kommen zusammen nur auf 2 bis 10%. Einzig im Haushaltskehrrecht werden vorwiegend kleinere Geräte dieser Kategorien entsorgt.

### 3.3 Material- und Stoffflussanalyse

Die Kombination der Massenflüsse mit der Zusammensetzung ergibt die Flüsse und das Lager einzelner relevanter Materialien und Stoffe. Die Material- und Stoffflussanalysen werden vorerst nur für ein Jahr (2006) und für die Kategorien HHGG, HHKG, ICT/UE und LM ausgeführt. Im Folgenden wird auf jede Gruppe von Materialien und Stoffen eingegangen.

#### 3.3.1 "Häufigste Stoffe"

Die Materialien und Stoffe der Gruppe „häufigste Stoffe“ kommen hauptsächlich in der Kategorie HHGG vor. Eine Ausnahme bildet Glas, welches sich vorwiegend in der Kategorie LM befindet. Abbildung 4 zeigt, wie sich Fe, Al, Cu, KS und Glas, welche sich im Lager an EEE im Jahr 2006 in der Schweiz befinden, auf die verschiedenen Kategorien aufteilen.

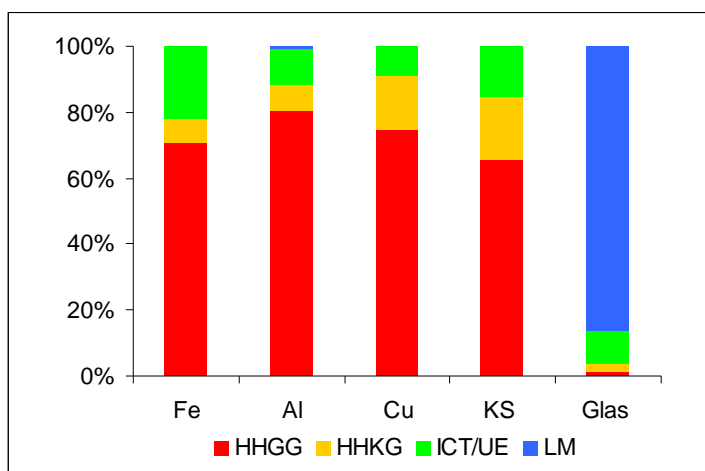


Abbildung 4: Aufteilung der „häufigsten Stoffe“ im Lager in die einzelnen Kategorien in Gewichts-% (2006).

Wird das ganze System betrachtet, kann man die Flüsse und das Lager der einzelnen Materialien und Stoffe aufgeteilt nach Kategorien auf ihrem Lebensweg verfolgen. Als Beispiel werden hier die Kupferflüsse und die Kunststoffflüsse in EEE in der Schweiz dargestellt (Abbildung 5 und 6). Kupfer kommt in allen betrachteten Kategorien vor, in LM jedoch nur in sehr geringen Mengen. Kunststoff ohne bromierte Flammschutzmittel kommt gemäss den getroffenen Annahmen nur in den Kategorien HHGG, HHKG und ICT/UE vor.

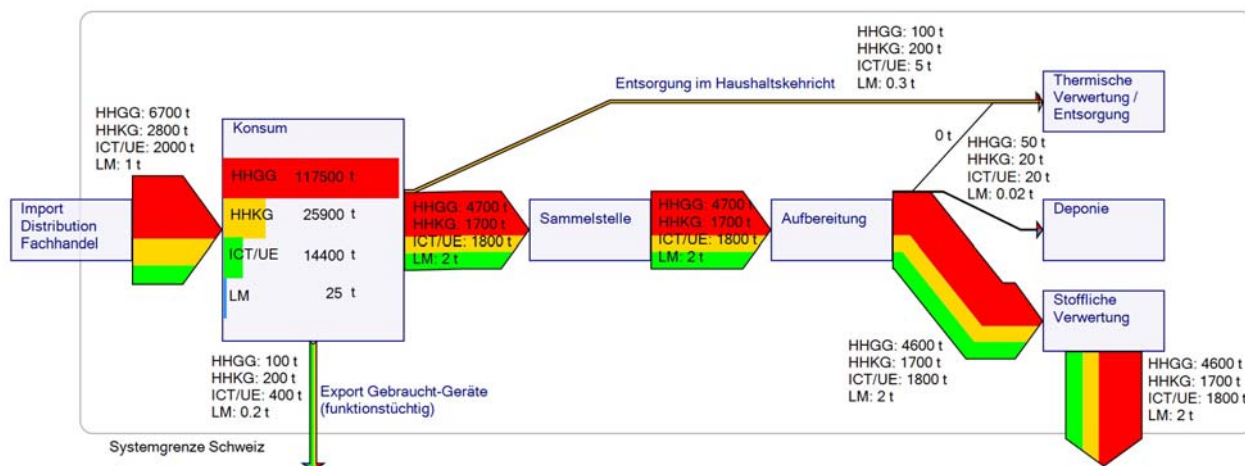


Abbildung 5: Kupferflüsse in EEE in der Schweiz aufgeteilt nach Geräte Kategorien (2006).

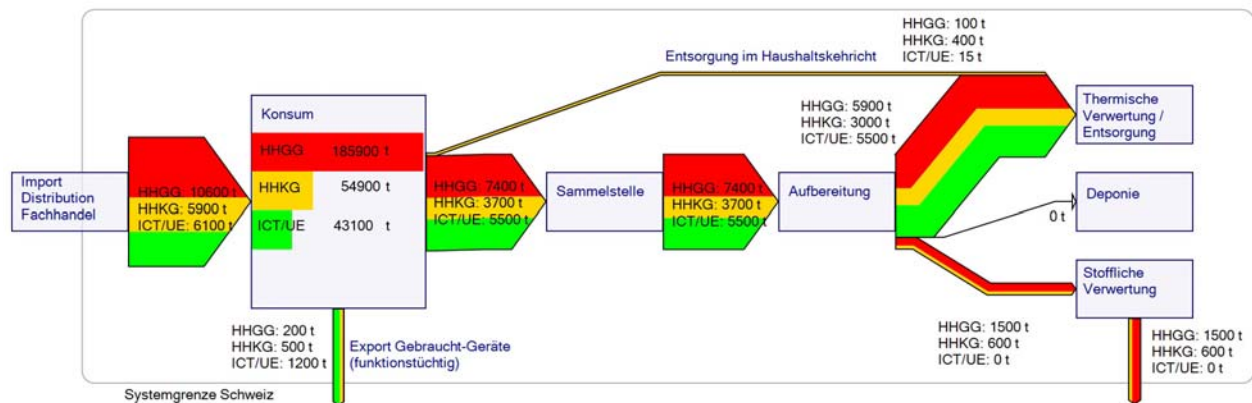


Abbildung 6: Kunststoffflüsse in EEE in der Schweiz aufgeteilt nach Geräte Kategorien (2006).

Für beide Stoffe ist der Input in den Prozess Konsum grösser als der Output, das Lager wächst also weiterhin an. Vom Kupfer das in die Aufbereitung gelangt werden bis zu 99% wieder verwendet. Nur ein sehr kleiner Anteil geht im Recyclingprozess verloren. Auch Eisen, Aluminium und Glas werden rezykliert und gelangen fast zu 100% als Sekundärrohstoffe wieder in den Stoffkreislauf. Kunststoff dagegen wird weiterhin zu einem grossen Teil thermisch verwertet bzw. entsorgt.

### 3.3.2 „Wertvolle Stoffe“

„Wertvolle Stoffe“ sind fast ausschliesslich in der Kategorie ICT/UE zu finden. Gold, Silber und Palladium sind in kleinsten Mengen auch in HHGG und HHKG, Indium auch in LM vorhanden. Abbildung 7 zeigt das Lager an „wertvollen Stoffen“ in EEE in der Schweiz im Jahr 2006 aufgeteilt nach Kategorien.

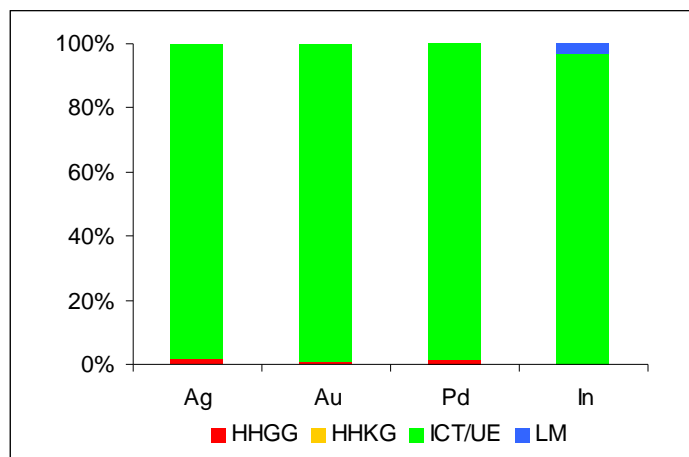


Abbildung 7: Aufteilung der „wertvollen Stoffe“ im Lager in die einzelnen Kategorien in Gewichts-% (2006).

In Abbildung 8 und 9 sind die Gold und Indiumflüsse in EEE in der Schweiz im Jahr 2006 dargestellt. Im dargestellten Jahr war der Verkauf an Geräten im Vergleich zum Rücklauf und Haushaltkehrrecht um rund 10 Gewichts-% kleiner. Das Lager an ICT/UE und somit auch an „wertvollen Stoffen“ hat demnach leicht abgenommen. Das Lager ist mit rund 900 kg Gold, 1900 kg Indium, 4400 kg Silber und 220 kg Palladium im Vergleich zu den „häufigsten Stoffen“ sehr klein. Trotzdem hat dieses Lager einen beträchtlichen Wert (siehe 3.3.4).

Gold, Silber und Palladium befinden sich hauptsächlich in den Komponenten auf den Leiterplatten der Geräte. Kommt ein Gerät mit hochwertigen Leiterplatten in die Aufbereitung, werden diese ausgebaut und durch spezielle Schmelzverfahren werden daraus die Edelmetalle zu über 95% zurück gewonnen und als Sekundärrohstoffe wieder verwendet.

Indium gehört zu den rarsten Stoffen der Erdkruste und seine Reserven reichen gemäss den Angaben des U.S. Geological Survey nur noch für knapp 15 Jahre (Behrendt 2007; USGS 2008). In der ICT/UE-Industrie wird Indium hauptsächlich zur Herstellung von Flachbildschirmen verwendet. In der Schweiz ist dadurch ein Lager von knapp 1800 kg entstanden. Sehr kleine Indiummengen sind auch in der Leuchtschicht von einigen Leuchtmitteln zu finden. Die zweite wichtige Anwendung von Indium ist die Produktion von Dünnschichtsolarellen, eine Technologie, die in der Schweiz noch nicht sehr verbreitet ist. Würde man jedoch annehmen, dass die gesamte Fläche an Solarpanels in der Schweiz Indium enthielte, gäbe dies ein Lager von nur rund 600 bis 900 kg (Morgan 2006; Dargel 2007; Swissolar 2007; Wäger 2008). Dies zeigt, dass das in ICT/UE gespeicherte Indium den Hauptanteil des Indium-Lagers in der Schweiz ausmacht. Die Flachbildschirme werden heute jedoch nicht rezykliert, sondern thermisch verwertet bzw. entsorgt. Somit geht das gesamte Indium in der Schlacke verloren.

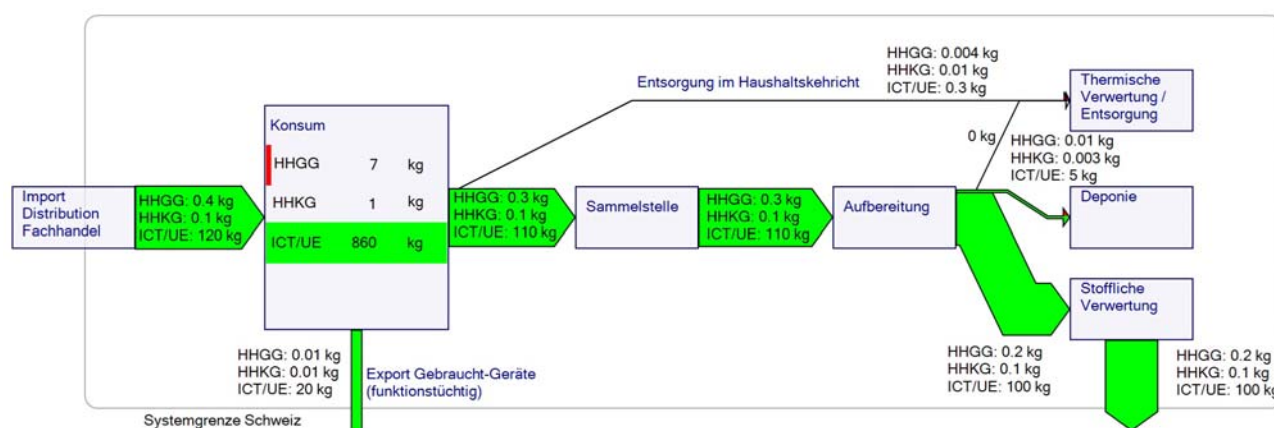


Abbildung 8: Goldflüsse in EEE in der Schweiz aufgeteilt nach Geräte Kategorien (2006).

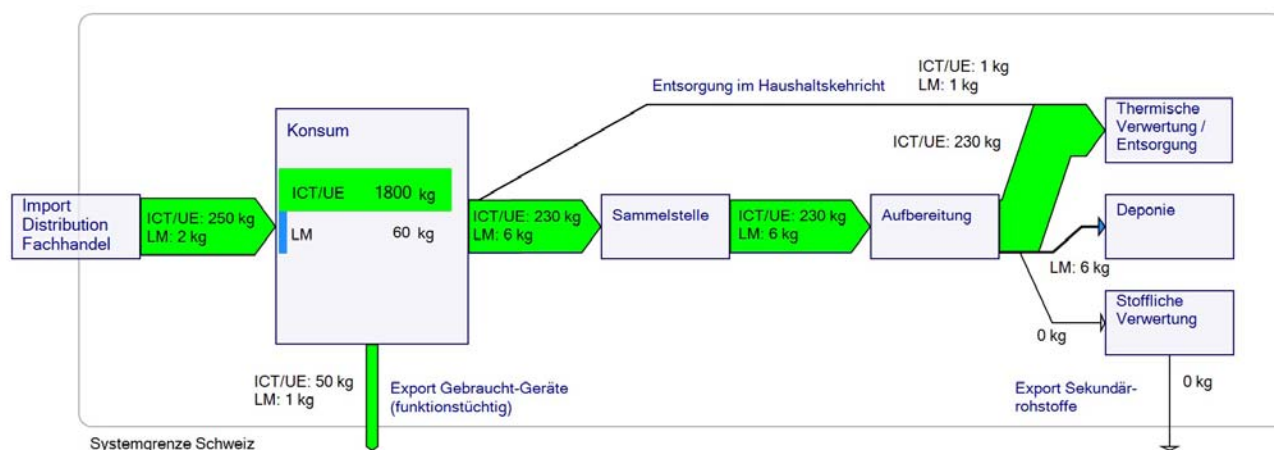


Abbildung 9: Indiumflüsse in EEE in der Schweiz aufgeteilt nach Geräte Kategorien (2006).

### 3.3.3 "Toxische Stoffe"

Die „toxischen Stoffe“ Blei und Cadmium sind zu einem grossen Teil in den HHGG vorhanden. Das Quecksilber befindet sich hauptsächlich in den LM, Kunststoffe mit bromierten Flammschutzmitteln und Bleiglas dagegen kommen fast nur in ICT/UE vor. Abbildung 10 zeigt wiederum das Lager der „toxischen Stoffe“ in EEE im Jahr 2006, aufgeteilt nach Kategorien in Gewichts-%.

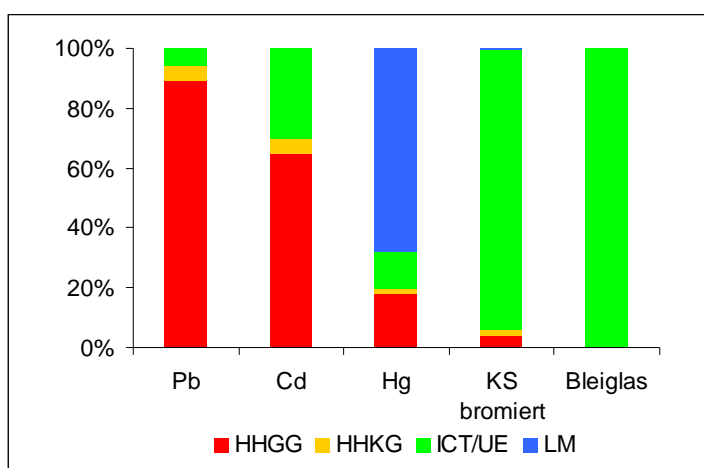


Abbildung 10: Aufteilung der „toxischen Stoffe“ im Lager in die einzelnen Kategorien in Gewichts-% (2006).

Die Lebenswege der „toxischen Stoffe“ in EEE in der Schweiz unterscheiden sich stark. Blei befindet sich grösstenteils immer noch in der Metallfraktion der Geräte und gelangt nach deren Lebensende fast vollständig in die Aufbereitung, wo es rezykliert wird. Nur ein geringer Anteil von ca. 5% geht verloren. Die metallischen Bleiflüsse der HHGG sind mit rund 900 t Input, 16'000 t Lager und 650 t Output aus dem Prozess Konsum eher gross und könnten auch auf einen Fehler in der Datenbasis hinweisen (Abbildung 11).

Bleiglas kommt nur in ICT/UE in CRT-Monitoren vor. Diese Geräte werden heute kaum mehr verkauft. Das Lager an Bleiglas in der Schweiz ist jedoch noch beträchtlich und beträgt über 65'000 t, wovon ca. ein Drittel oder 22'000 t aus Blei besteht. Das Bleilager gebunden in Glas ist also rund 1.3-mal grösser als das Lager an metallischem Blei. Da bleiglashaltige Geräte im Schnitt eine kürzere Lebenszeit haben als HHGG ist auch der Rücklauf mit ca. 3'500 t Blei in 10'500 t Bleiglas rund vier mal grösser als für metallisches Blei. Das Bleiglas, welches 2006 in die Aufbereitung gelangte, wurde zu 100% rezykliert.

Zum Vergleich wurde die Menge an Blei in Autobatterien abgeschätzt. In der Schweiz sind rund 4 Mio. Autobatterien mit gesamthaft ca. 50'000 t Blei im Umlauf. Pro Jahr werden davon rund 10'000 t Blei ersetzt. Die Bleiflüsse verursacht durch Autobatterien sind demnach rund 3 mal so gross wie die Bleiflüsse verursacht durch Bleiglas und rund 10 mal grösser als die Flüsse von metallischem Blei.

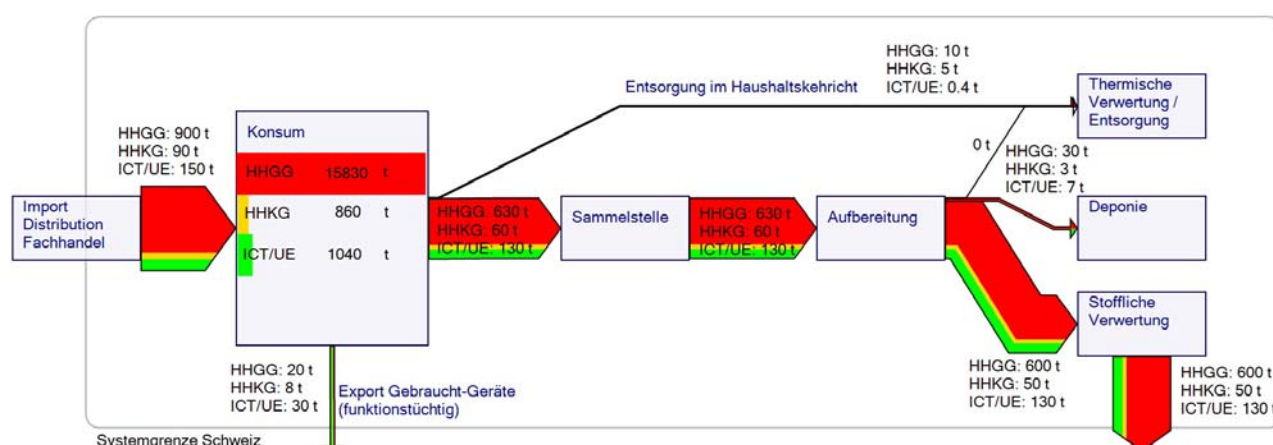


Abbildung 11: Bleiflüsse in EEE in der Schweiz aufgeteilt nach Geräte Kategorien (2006).

Cadmium (Abbildung siehe Anhang) stammt hauptsächlich aus Batterien, welche sich in den recycelten Geräten befinden. Die Batterien werden aussortiert und gelangen in ein spezielles Recyclingwerk, wo das Cadmium abdestilliert wird. Pro Jahr fallen rund 14 t Cadmium an. Batterien, welche unabhängig von Geräten in das Batterierecycling gelangen, sind in der Stoffflussanalyse nicht berücksichtigt. In der Schweiz wer-

den pro Jahr rund 150 t NiCd-Batterien gesammelt, was einer zusätzlichen Cadmiummenge von ca. 20 t entspricht

Quecksilber kommt im Leuchtgas und in der Leuchtschicht von Leuchtmitteln vor (Raumbeleuchtung und Hintergrundbeleuchtung von Flachbildschirmen), untergeordnet auch in Haushaltsgeräten (Schalter und Batterien). Gemäss den vorhandenen Daten wurden im Jahr 2006 deutlich weniger Leuchtmittel verkauft als in das Recycling gelangen. Somit hat das Lager an Quecksilber abgenommen. Da Quecksilber auch zur Herstellung von Stromsparlampen verwendet wird, welche noch oft im Haushaltskehricht landen, gelangen einige Kilogramm auf diesem Weg in die thermische Entsorgung. Quecksilber aus Batterien wird wiederverwertet, die Leuchtschicht wird oft deponiert (siehe Abbildung 12).

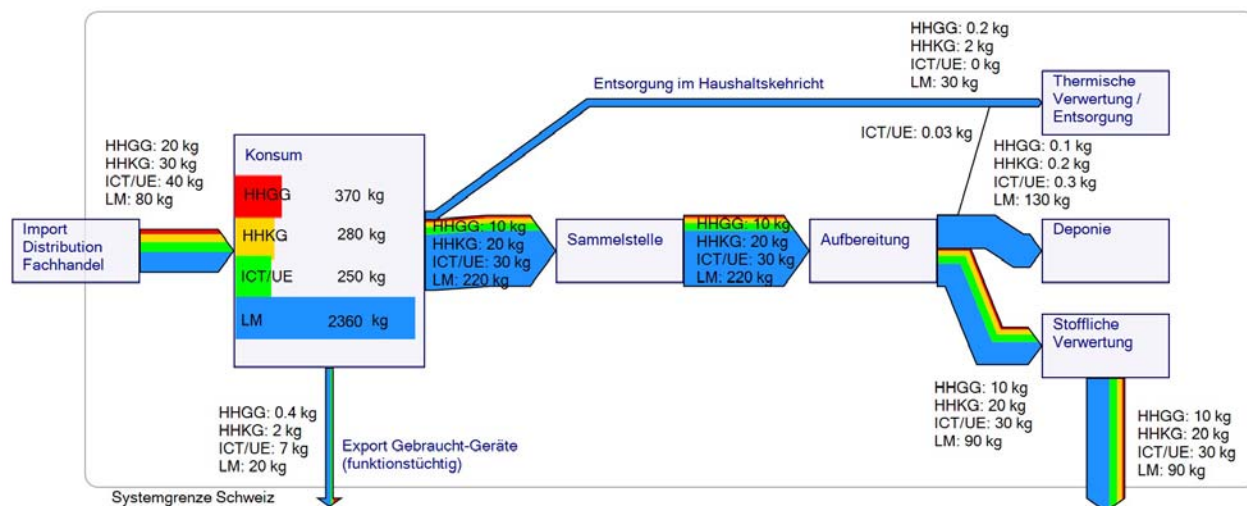


Abbildung 12: Quecksilberflüsse in EEE in der Schweiz aufgeteilt nach Geräte Kategorien (2006).

Über 90% der Kunststoffe mit bromierten Flammschutzmitteln (Abbildung siehe Anhang) finden sich in der Kategorie ICT/UE. Dieser Kunststoff muss, sobald er mit Kunststoffen ohne Flammschutzmittel gemischt ist, thermisch verwertet bzw. entsorgt werden.

Seit 2005 ist die Anwendung sowie die Einführung von Blei, Cadmium, Quecksilber oder Chrom(VI) sowie polybromierte Biphenyle (PBB) oder polybromierte Diphenylether (PBDE) verboten. Da das Verbot aber kaum zu einer sofortigen Abnahme des Inputs dieser Stoffe geführt hat, wurden die lineare Berechnung der Material- und Stoffflüsse aus der Zusammensetzung und den Massenflüssen für die Daten von 2006 nicht angepasst. In Zukunft sollten die Input-Flüsse toxischer Stoffe jedoch signifikant abnehmen. Der Fluss in die Aufbereitung wird jedoch noch während längerer Zeit Schadstoffe enthalten. Je nach Lebensdauer bleiben Geräte rund 5 (ICT/UE) bis 30 Jahre (HHGG) in Gebrauch. Es wird also mindestens noch 30 Jahre dauern, bis die letzten Schadstoffe entsorgt oder recycelt sind.

### 3.3.4 Wert der in EEE gebundenen Stoffen

Der Materialwert des EEE Lagers kann über die Preise an den Rohstoffbörsen abgeschätzt werden (siehe Tabelle 2). Der gesamte Wert beträgt rund 2 Mia. CHF. Den grössten Anteil macht mit 1.3 Mia. das Kupfer aus. Beachtlich ist auch, dass die 0.8 Tonnen Gold über 22 Mio. CHF wert sind. Indium dagegen, welches als eines der knappsten Stoffe überhaupt betrachtet wird, kommt mit einem doppelt so grossen Lager auf nur 1.7 Mio. Da die Rohstoffpreise je nach Wirtschaftslage starken Schwankungen ausgesetzt sind, sind die hier aufgeführten Werte nur eine Momentaufnahme. Diese grosse Variation der Rohstoffpreise hat natürlich auch auf das Recycling-Geschäft einen sehr grossen Einfluss.



**Tabelle 2: Wert der in EEE im Lager gebundenen Materialien und Stoffen (Stoffflüsse von 2006, Preise von Ende 2006).**

Stoff	HHGG [t]	HHKG [t]	ICT/UE [t]	LM [t]	Total [t]	[CHF/t] <sup>1)</sup>	CHF in Lager
Ag	0.075	0.011	4.3		4.4	524'000	2'303'700
Au	0.0066	0.00092	0.86		0.87	26'200'600	22'782'800
Pd	0.0030	0.00037	0.22		0.22	12'898'800	2'822'800
In			1.8	0.058	1.8	940'000	1'743'600
Pb	15'827	863	1'042		17'732		
Cd	136	10	65		211		
Hg	0.37	0.03	0.25	1.4	2.0		
KS bromiert	2'831	1'120	64'656	438	69'046		
Bleiglas			67'170		67'170		
Fe	416'294	42'933	129'312		588'539	300	176'561'800
Al	137'264	13'914	17'960	1'611	170'749	3'500	599'329'000
Cu	117'540	25'880	14'368	25	157'814	8'000	1'264'722'500
KS	185'924	54'895	43'104		283'924	100	28'392'400
Glas	161	238	1'078	9'117	10'593		
Übriges	97'822	10'387	20'438	592	129'240		
<b>Total</b>							<b>2'098'658'600</b>

<sup>1)</sup>Quelle: [www.mineralstox.com](http://www.mineralstox.com)  
[http://www.finanzen.net/rohstoffe/rohstoffe\\_uebersicht.asp](http://www.finanzen.net/rohstoffe/rohstoffe_uebersicht.asp)  
<http://www.stahlhandel.com/talpages/scrappprice/>  
<http://www.metalprices.com/FreeSite/metals/in/in.asp>

### 3.4 Umweltbelastung

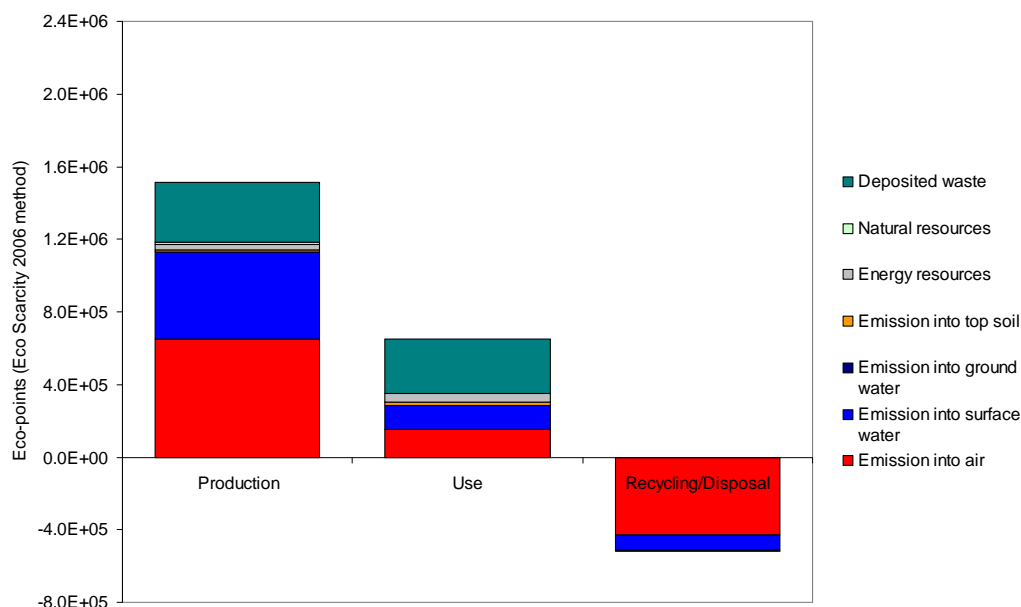
Die Umweltbelastung kann zurzeit nur für Geräte der Kategorie ICT/UE berechnet werden, da in der ecoinvent-Datenbank bisher keine anderen Geräte abgebildet worden sind.

Als Beispiel werden die Umweltbelastungen des Lebenszyklus eines Desktop Computers mit CRT oder LCD-Monitor und eines Notebooks mit Umweltbelastungspunkten berechnet und verglichen (siehe Abbildung 13, 14 und Anhang)

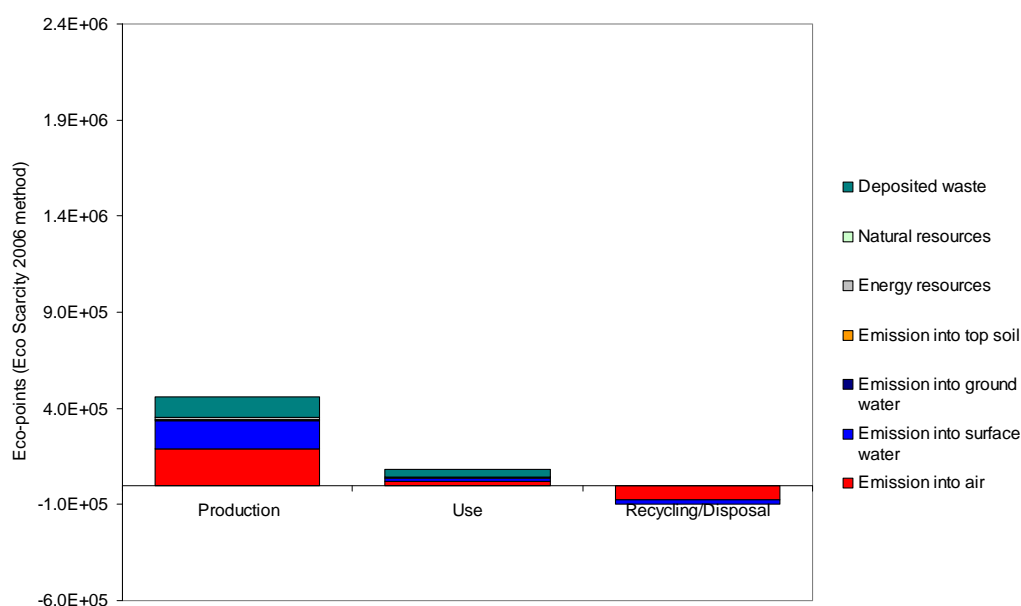
Die Produktion hat bei allen drei Varianten am meisten negative Auswirkungen auf die Umwelt. Daran massgeblich beteiligt sind die Halbleiterproduktion, die Extraktion (Primärproduktion) von Metallen sowie die zur Herstellung verbrauchte Energie. Dazu kommt die Herstellung der Kathodenstrahlröhre für den CRT-Monitor sowie des LCD-Modules für den LCD-Monitor und das Notebook.

Die Umweltbelastung während des Gebrauchs hängt praktisch nur vom Strombedarf eines Gerätes ab. Je nach verwendetem Strommix kann die Umweltbelastung stark variieren. Mit dem Schweizer Strommix ist für den Desktop-PC mit CRT-Monitor die durch den Gebrauch verursachte Umweltbelastung halb so gross wie diejenige durch die Produktion. Für das Notebook und den PC mit LCD-Monitor beträgt die Umweltbelastung des Gebrauchs nur rund 18 - 28% der Belastung durch die Produktion. Würde man jedoch z.B. mit dem europäischen Strommix rechnen, der einen grossen Anteil an Kohlekraftwerken hat, wären die Umweltbelastungen während Produktion und Gebrauch ungefähr gleich gross.

Durch die Entsorgung nach neusten technologischen Standards erfolgen kaum weitere Umweltbelastungen sondern es kann durch die stoffliche Verwertung die Primärproduktion verringert werden. Dieser für die Umwelt positive Beitrag wird durch negative Umweltbelastungspunkte ausgedrückt.



**Abbildung 13: Umweltbelastung der drei Lebenszyklen Produktion, Gebrauch und Entsorgung eines Desktop-PC's mit CRT-Monitor gemessen in Umweltbelastungspunkten.**



**Abbildung 14: Umweltbelastung der drei Lebenszyklen Produktion, Gebrauch und Entsorgung eines Notebooks gemessen in Umweltbelastungspunkten.**

Die Umweltbelastung durch das Recycling des Desktops mit CRT-Monitor beträgt ca. -43%, diejenige eines PCs mit LCD-Monitor -30% und eines Notebook rund -20% der Umweltbelastung durch die Produktion.

Im Vergleich der drei Geräte untereinander verursacht der PC mit CRT-Monitor während der Produktion am meisten Schaden an der Umwelt, vor allem durch seine Emissionen in die Luft und ins Oberflächengewässer. Diese werden hauptsächlich durch den hohen Energiebedarf bei der Herstellung sowie Emissionen bei der Metallbearbeitung verursacht. An zweiter Stelle kommt der PC mit LCD-Monitor und am Besten schneidet das Notebook ab.

Während des Gebrauchs konsumiert der PC mit CRT-Monitor am meisten Strom. Der PC mit LCD-Monitor verbraucht rund 60% und das Notebook nur ca. 13% des Energieverbrauchs des PCs mit CRT-Monitor.

Da der PC mit CRT-Monitor das materialaufwändigste Produkt ist, können durch die stoffliche Verwertung in der Entsorgung auch am meisten Umweltbelastungen vermieden werden. Der PC mit LCD-Monitor enthält weniger Materialien mit aufwändiger Primärproduktion. Die Entsorgung kann also nur einen kleinen Teil der grossen Belastung durch die Produktion kompensieren. Am besten schneidet ganz klar das Notebook ab, welches am wenigsten materialintensiv ist und sowohl durch die Produktion als auch während des Gebrauchs am wenigsten negative Auswirkungen auf die Umwelt hat. Die Abbildung der Umweltbelastung eines PCs mit LCD-Monitor ist im Anhang zu finden.

### **3.5 Datenunsicherheit**

Eine genaue Berechnung der Datenunsicherheit wurde nicht gemacht und ist wahrscheinlich gar nicht möglich. Bei der Unsicherheit der verschiedenen geschätzten Daten kann es sich von einigen Prozenten bis zu einem Faktor 10 handeln. So könnte z.B. der Export von HHKG, welcher auf rund 1300 t im Jahr 2006 geschätzt wird, auch bis zu einem Faktor 10 kleiner sein. Diese Zahlen sind in keiner Statistik genau erfasst und sind deshalb schwierig zu überprüfen. Zudem spielen sie in der Gesamtbilanz keine grosse Rolle. Die Zahlen der Zusammensetzung jedoch, welche zum Teil aus der Literatur übernommen wurden, haben gemäss Angaben von BUWAL (2004) eine Unsicherheit von nur 10 – 30%.

#### **3.5.1 Zusammensetzung**

Aus den Batchversuchen der SWICO und SENS gehen die Bestandteile der Geräte in Fraktionen (z.B. Kunststofffraktion, Metallfraktion) hervor und es werden keine Angaben über deren detaillierte Zusammensetzung gemacht. Daher muss die Aufteilung in einzelne Elemente, Kunststoffarten etc. mit Hilfe von Literaturwerten abgeschätzt werden (BUWAL 2004). Die Resultate sind deshalb mit einer Unsicherheit behaftet. Wie bereits erwähnt, sind für die Kategorien LE, BGH und SPW noch keine Daten vorhanden. Es wird angenommen, dass sich diese von den HHKG nur wenig unterscheiden. Um jedoch grössere Fehler zu vermeiden, wird auf eine Material- und Stoffflussanalyse dieser Kategorien vorerst verzichtet.

#### **3.5.2 Massenflussanalyse**

Ausser Verkaufszahlen und Angaben über recycelte Mengen liegen nur wenige Daten vor. Auf eine Abschätzung des Imports und des Exports neuer Güter wird verzichtet, da die Angaben aus der Zollstatistik schwierig zu integrieren sind. Die Tarifnummern der Zollstatistik entsprechen nicht den hier untersuchten Gerätekategorien. Zudem sind die Exporte gebrauchter Güter nicht separat aufgeführt und wohl auch nicht gesamthaft erfasst. Die Abschätzungen zu Lager, Exporte gebrauchter Güter und Mengen im Haushaltkehrrecht werden vor allem mit Hilfe von allgemeinen statistischen Daten des BFS und Angaben zur Zusammensetzung des Haushaltkehrrechts gemacht und sind mit grossen Unsicherheiten behaftet.

#### **3.5.3 Material- und Stoffflussanalyse**

Die Abschätzung der Transferkoeffizienten erfolgt hauptsächlich aufgrund der Daten aus den Batchversuchen der SWICO und SENS. Diese stammen aus den Angaben der einzelnen Recycler und sind bereits gerundete Werte. Mit Hilfe von Expertenmeinungen werden die Angaben wo möglich angepasst, dennoch sind die Transferkoeffizienten mit Unsicherheit behaftet.

#### **3.5.4 Umweltbelastung**

Durch die Verwendung der ecoinvent-Datenbank können nur die Umweltbelastung von Geräten der Kategorie ICT/UE berechnet werden. Andere Kategorien sind in der Datenbank noch nicht verfügbar und das Erstellen neuer Datenbanken ist ein sehr aufwändiger Prozess. Die Umweltbelastung der einzelnen Geräte konnten bisher auch noch nicht zur Belastung einer gesamten Kategorie akkumuliert werden, da noch zu wenige Geräte in der Datenbank verfügbar sind. Somit ist weder ein umfassender Vergleich zwischen den verschiedenen Geräten noch zwischen den Kategorien möglich.

## 4 Eignung der Methodik

### 4.1 Wahl der Software

Die Datenerfassung und –verarbeitung in MS Excel erlaubt eine einfache, kostengünstige, flexible Handhabung der Daten für verschiedene Fragestellung und eine Verlinkung der Daten untereinander. Zudem sind auch diverse grafische Darstellungen der Daten möglich. Ein Nachteil ist, dass die Arbeitsschritte z.B. zur Verlinkung der Massenströme mit der Zusammensetzung und den Transferkoeffizienten sehr aufwändig ist und viel Handarbeit verlangt. Dies könnte ev. durch entsprechende Anpassungen verbessert werden.

Mit e!sankey können die Daten auf einfache Weise grafisch in Flussdiagrammen dargestellt werden. Die einzelnen Flüsse, Beschriftungen etc. können mit Excel-Zellen verlinkt werden, was ein rascher Update bei geänderten Daten erlaubt. Es muss jedoch jede einzelne Zelle mit einem Fluss manuell verlinkt werden, was einen grossen Zeitaufwand bedeutet. Zudem bietet das Programm relativ wenige Darstellungsmöglichkeiten. Man kann z.B. keine Lagerbestände automatisch darstellen sondern muss diese ebenfalls von Hand einfügen. Somit ist e!sankey für kleinere Projekte ein gutes Werkzeug, für Problemstellungen, welche eine grosse Anzahl von Flussdiagrammen erfordern, müsste eine geeignetere Software gefunden/entwickelt werden.

Es gibt Programme zur Berechnung von Material- oder Stoffflusssystemen (z.B. Umberto). Diese sind jedoch eher zur Modellierung als zur einfachen Wiedergabe von Stoffflusssystemen konzipiert. Um nicht an eine starre Software gebunden zu sein, wurde in dieser Arbeit auf den Gebrauch von Umberto verzichtet. Die erhobenen Daten könnten jedoch durchaus von dieser Software verwendet werden.

Das LCA-Programm SimaPro ist eine sehr geeignete Software, um Daten aus der ecoinvent-Datenbank auszuwerten und zu visualisieren. Die Bedienung des Programms ist jedoch nicht einfach und bedarf einer gewissen Einarbeitungszeit.

### 4.2 Vorgehensweise

Die grundlegende Vorgehensweise ist durch die Fragestellung bereits vorgegeben. Eine Material- bzw. Stoffflussanalyse kann nur auf der Basis der Zusammensetzung, Massenflüsse und Transferkoeffizienten erfolgen. In welcher Reihenfolge diese erhoben werden, spielt keine Rolle. Die Auswertung der Resultate hängt stark von der genauen Fragestellung ab. In dieser Arbeit wurde der Fokus auf die einzelnen Materialien und Stoffe gelegt.

Die grafische Darstellung der Massen-, Material- und Stoffflüsse erlaubt eine visuelle Auswertung der Daten. So können Ungenauigkeiten, Fehler, falsche Annahmen etc. auf einfache Weise erkannt und korrigiert werden.

Ein Nachteil der Methode ist, dass schnell grosse Datenmengen akkumuliert werden, was die Übersicht schwierig macht. Da die grafische Auswertung erst am Schluss erfolgt, werden Fehler oft erst spät erkannt. Deshalb ist es wichtig, die Daten im Laufe der Arbeit immer wieder zu kontrollieren und auf ihre Plausibilität zu überprüfen.

## 5 Ausblick und Vorschläge für weiteres Vorgehen

Zukünftigen Entwicklungen von elektrischen und elektronischen Geräten hängen von verschiedenen Faktoren ab, wie zum Beispiel:

- Neue Technologien, welche unbekannte Risiken für Mensch und Umwelt mit sich bringen können, führen zu einer Veränderung des Ressourcenverbrauchs und zu veränderten Materialzusammensetzungen (z.B. Ersatz von CRT-Monitoren mit LCD-Monitoren). Ressourcenknappheit kann zur Weiterentwicklung der heutigen Technologie beitragen.
- Toxische Stoffe wie Quecksilber, Blei, Cadmium oder Chrom(VI) sowie polybromierte Biphenyle (PBB) oder polybromierte Diphenylether (PBDE) sind seit 2005 in elektrischen und elektronischen Geräten verboten. Im Recycling werden diese Stoffe jedoch noch rund 10 (Kat III und IV) bis 30 Jahre (Kat I) lang auftreten.
- Die stetige Verkleinerung von elektronischen Komponenten führt zu einer diffusen Verteilung derselben in Alltagsgegenständen (pervasive computing), was die Menge an Elektroschrott wiederum anwachsen lässt und das Recycling erschwert. Die grössere Energieeffizienz in der Gebrauchsphase führt zu einer Abnahme des Energieverbrauchs. Die Verkleinerung der elektronischen Komponenten und die grössere Energieeffizienz führen jedoch nicht zwingend zu einer geringeren Umweltbelastung, da die Produktion oft aufwändiger wird (grössere 'Rucksäcke') und die Anzahl der Geräte laufend zunimmt (rebound effect).
- Die Konsumenten haben ein erhöhtes Umweltbewusstsein, welches zum einen vor allem im Bereich Energieverbrauch zu einer Anpassung der Produktpalette im Fachhandel führt. Dieses Bewusstsein ermöglicht aber auch erst die Separatsammlung von elektrischen und elektronischen Geräten wie auch Batterien etc.

Dieser Ausblick weist darauf hin, dass die Entwicklung im Bereich elektrischer und elektronischer Geräte sehr dynamisch und teilweise auch schwierig vorherzusehen ist. Die hier vorgestellte Arbeit zeigt nur eine Momentaufnahme dieses sehr komplexen Systems. Möchte man auch in Zukunft über Daten verfügen, wäre es wichtig, Methoden zu finden bzw. entwickeln, welche erlauben, das System auch dynamisch zu erfassen.

Wie in Kapitel 3.5 beschrieben, sind die erhaltenen Resultate zum Teil mit grossen Unsicherheiten behaftet. Eine Weiterführung dieser Arbeit könnte darin bestehen, diese Unsicherheiten zu verkleinern, z.B. mit vertieften Untersuchungen der Lager, des Exports gebrauchter Geräte sowie der Transferkoeffizienten für einzelne Gerätekategorien oder Stoffe.

Die Umweltbelastung kann momentan nur für ICT-Geräte berechnet werden. Die Einführung neuer Geräte bzw. Gerätekategorien in der ecoinvent-Datenbank würde es erlauben, die Umweltbelastungen zwischen Kategorien etc. zu vergleichen.

Durch die Erstellung von Factsheets, Artikeln oder anderer Publikationen kann das Umweltbewusstsein von Bevölkerung, Wirtschaft und Politik wach gehalten oder weiter gefördert werden.

## 6 Literaturverzeichnis

- Behrendt, S., Scharp, M., Erdmann, L., Kahlenborn, W., Feil, M., Dereje, C., Bleischwitz R., Delzeit, R. (2007). Rare metals. Measures and concepts for the solution of the problem of conflict-aggravating raw material extraction - the example of coltan, Federal Environmental Agency.
- BFS. (2008). "Statistik Schweiz - Wichtigste Kennzahlen und Indikatoren." Retrieved October 2008, from <http://www.bfs.admin.ch>.
- BUWAL (1995). Zusammensetzung der Siedlungsabfälle in der Schweiz 1992/93. Schriftenreihe Umwelt Nr. 248, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- BUWAL (2003). Erhebung der Kehrrichtzusammensetzung 2001/02. Schriftenreihe Umwelt Nr. 356, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- BUWAL (2004). Metallische und nichtmetallische Stoffe im Elektronikschrott. Stoffflussanalyse. Umweltgefährdende Stoffe, Abfall. Schriftenreihe Umwelt Nr. 374, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- Dargel, R. (2007). Charakterisierung moderner Schichtsysteme und Entwicklung neuer Bestimmungsverfahren für deren Zusammensetzung. Naturwissenschaftliche Fakultät. Hannover, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität. **Doctor**.
- EC. (2002). "Directive 2002/95/EC " Retrieved November 2008, from [http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/index_en.htm).
- ELCF. (2008). "European Lamp Companies Federation." Retrieved October 2008, from <http://www.elcf.org>.
- FEA. (2008). "Marktstatistik." Retrieved Oktober 2008, from <http://www.fea.ch>.
- Künzler Bossert & Partner GmbH (2001). Elektronikschrott in der Schweiz 2001, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- Morgan, M., Coleman, W., Yudi, Y., Yin, S., Casillas, C. (2006). Future State of the PV Industry - Trends and Technologies.
- Robert Weiss Consulting (2007). Weissbuch, 18. Auflage. Männedorf, The WEISSBUCH-Company.
- SENS (2007a). Fachbericht der technischen Kontrollstelle TK-SENS SENS.
- SENS (2007b). Geschäftsbericht SENS.
- SWICO (2007). Tätigkeitsbericht, SWICO.
- Swissolar (2007). Photovoltaik, Strom aus der Sonne, Energie Schweiz.
- Technische Kontrollstelle SENS und SWICO (2008). Projekt Batchversuche , Auswertung und Schlussbericht, SENS und SWICO.
- USGS (2008). Mineral Commodity Summaries; Indium, U.S. Geological Survey.
- Wäger, P., Böni, H., Schluop, M., Streicher, M., Buser, A., Morf, L. (2008). Verwertung von Kunststoffen aus Elektro- und Elektronikaltgeräten, Zwischenbericht zum Teilprojekt 1, Entwurf.
- Wäger, P., Gauch, M., Widmer, R. (2008). Potential limitations for thin-film solar cell market diffusion, Empa.
- Wertstoff-Börse GmbH (2002). Entladungslampen - Leuchtstoffröhren.

## 7 Anhang

### 7.1 Zusammensetzung

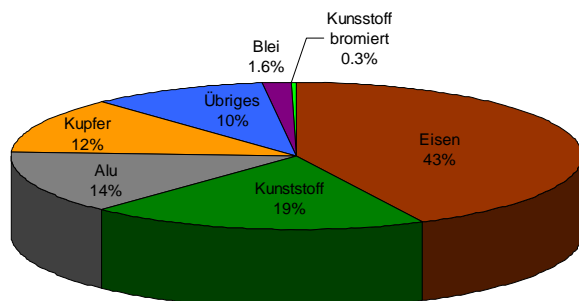


Abbildung 15: Zusammensetzung in Gewichts-% der Kategorie HHKG.

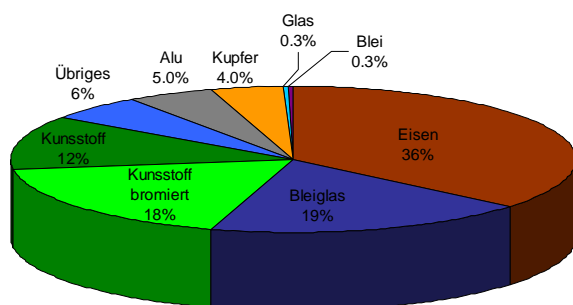


Abbildung 16: Zusammensetzung in Gewichts-% der Kategorie ICT/UE.

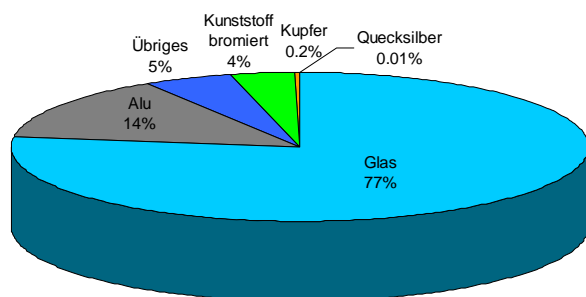


Abbildung 17: Zusammensetzung in Gewichts-% der Kategorie LM

## 7.2 Material- und Stoffflussanalyse

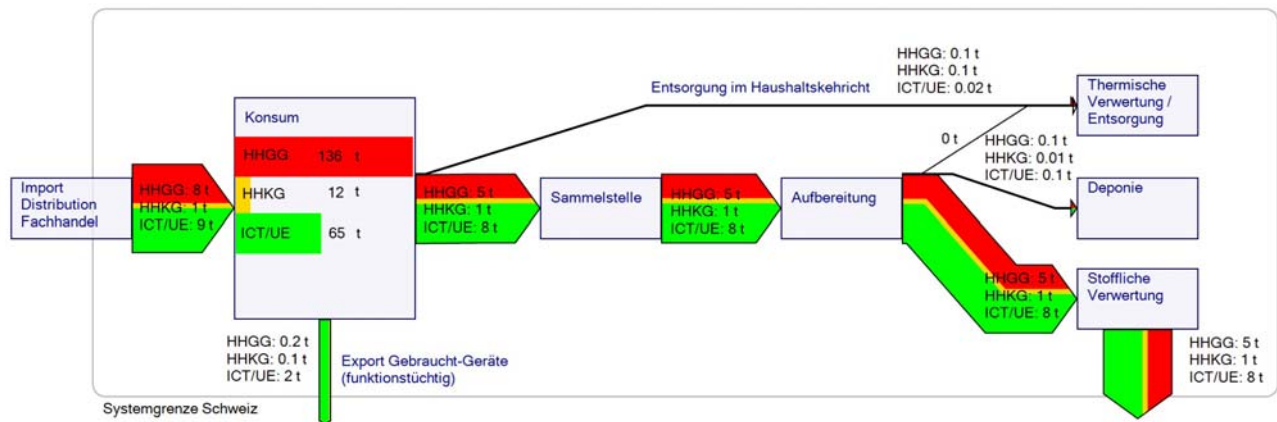


Abbildung 18: Cadmiumflüsse in EEE in der Schweiz aufgeteilt nach Geräte Kategorien (2006).

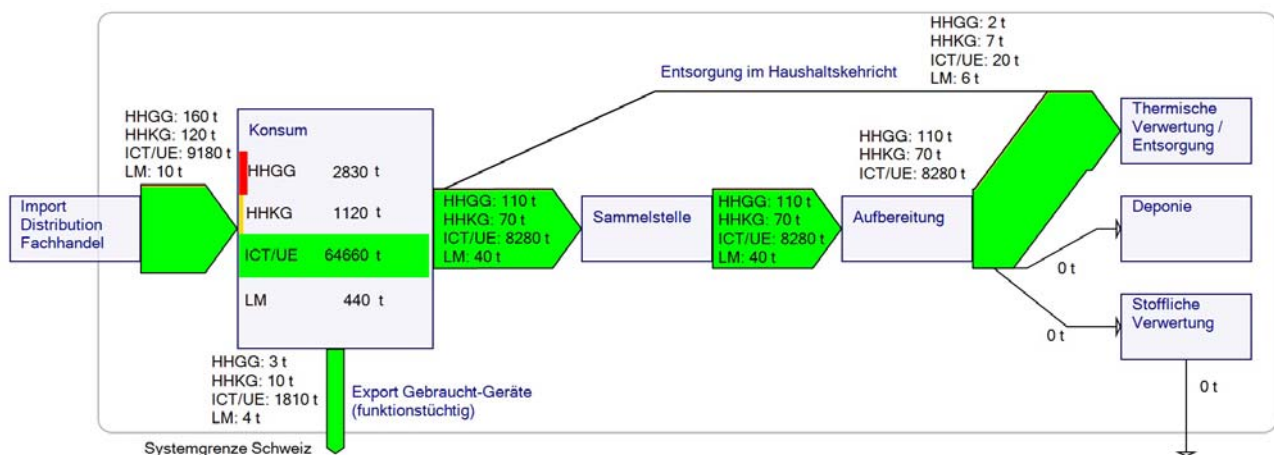


Abbildung 19: Flüsse des bromierten Kunststoffes in EEE in der Schweiz aufgeteilt nach Geräte Kategorien (2006).



### 7.3 Umweltbelastung

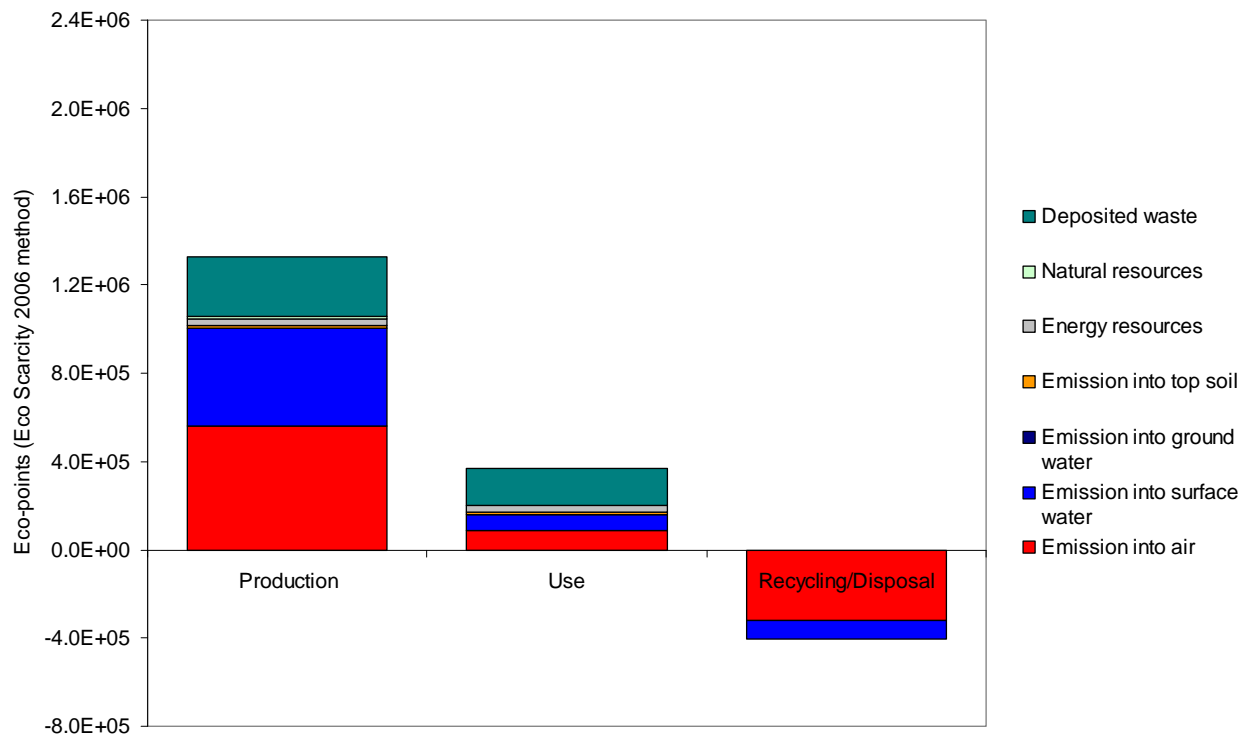


Abbildung 20: Umweltbelastung der drei Lebenszyklen Produktion, Gebrauch und Entsorgung eines Desktop-PC's mit LCD-Monitor gemessen in Umweltbelastungspunkten.