

# Abfall-Management von Elektronik-Produkten

Kurzfassung der Diplomarbeit von Dominik Oetiker  
ETH / exact AGU

Betreuung:

Dr. Marion Tobler, Institut für automatisierte Produktion der ETH Zürich  
Georg Brändle, IG exact / Mettler Toledo, Nänikon ZH

# Inhaltsverzeichnis

<b>INHALTSVERZEICHNIS</b>	<b>2</b>
<b>1 ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>3</b>
<b>2 EINLEITUNG</b>	<b>4</b>
2.1 Elektronikschrott als Umweltproblem	4
2.2 Elektronikrecycling in der Schweiz	5
<b>3 UNTERSUCHUNGSDESIGN</b>	<b>6</b>
3.1 Vorgehen	6
3.2 Konzeptionelles Systemmodell	6
3.3 Szenario KVA	7
3.4 Szenario Recycling	8
3.5 Systemgrenzen	9
<b>4 ERGEBNISSE</b>	<b>10</b>
4.1 Zerlegung	10
4.2 Ökologische Bewertung	12
4.3 Ökonomische Beurteilung	16
<b>5 DISKUSSION</b>	<b>20</b>
<b>5.1 Ökologische Bewertung</b>	<b>20</b>
5.1.1 Bewertungsmethoden	20
5.1.2 Einfluss der Kupferproduktion auf die Ergebnisse	23
5.1.3 Beurteilung der ökologischen Vorteile des Recyclings von Elektronikgeräten	24
<b>5.2 Ökonomische Beurteilung</b>	<b>25</b>
<b>5.3 Ausblick</b>	<b>26</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>28</b>

# 1 Zusammenfassung

Die elektronische Industrie sieht sich in Europa zunehmend dem Druck gesetzlicher Regelungen ausgesetzt, welche die Hersteller von Elektronikprodukten im Sinne einer erweiterten Produkthaftung auch für die Entsorgung ihrer Geräte in die Verantwortung nehmen will. In der Schweiz ist mit der Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung von elektrischen und elektronischen Geräten (VREG) eine entsprechende Verordnung bereits in Kraft. In dieser Arbeit wurde untersucht, ob solche gesetzliche Regelungen sich auch aus ökologischer Sicht rechtfertigen lassen, da das Recycling nicht schon im vornherein die "bessere Lösung" für die Entsorgung von Elektronikprodukten darstellen muss.

Zu diesem Zweck wurden anhand des Fallbeispiels "Recycling von Kopiergeräten" die Stoffströme und die damit verbundenen Umweltauswirkungen beim Elektronikrecycling analysiert. Ausgangspunkt bildeten die Ergebnisse des Zerlegungsprozesses in einem typischen Recyclingunternehmen. Anhand dieser Resultate konnte das weitere Schicksal der einzelnen Fraktionen bestimmt werden.

Dem Recycling wurde als alternatives Entsorgungsszenario die Verbrennung der Kopiergeräte in einer KVA (Kehrichtverbrennungsanlage) gegenübergestellt. Um den gleichen Nutzen wie beim Recycling zu erreichen, wurden bei diesem Szenario auch die Prozesse der Primärproduktion für die beim Recyclingprozess gewonnenen Metalle berücksichtigt. Die beiden Entsorgungsszenarien wurden mit der Ökobilanzmethodik analysiert und mit drei verschiedene Bewertungsmethoden verglichen. Zum Einsatz kamen die Methode der ökologischen Knappheit (EP), Eco-Indicator 95 (EI95) und Eco-Indicator 99 (EI99).

Bei allen drei Methoden erwies sich das Recycling als die ökologisch bessere Variante. Die Entsorgung in der KVA verursacht je nach angewendeter Bewertungsmethode zwischen 1.54 (EI99) und 3.2 (EP) mal mehr Umweltbelastung. Dies ist bei allen drei Methoden auf die starke Gewichtung der Primärproduktion von Kupfer zurückzuführen, vor allem auf die damit verbundenen SO<sub>2</sub>-Emissionen. Ohne Berücksichtigung des Kupferrecyclings wäre die Entsorgung in der KVA aus ökologischer Sicht vorzuziehen.

Zusätzlich zur ökologischen Beurteilung wurde auch ein Vergleich der Kostenstrukturen zwischen der Entsorgung in der KVA und dem Recycling vorgenommen. Das Recycling verursacht ca. 1.4 bis 1.5 mal höhere Kosten als die Entsorgung in der KVA. Dies ist vor allem auf die personalintensive Demontage und die manuelle Aussortierung der problematischen Komponenten zurückzuführen. Es ist nicht möglich, die Kosten für das Recycling von Kopiergeräten aus dem Erlös der Metallfraktionen zu finanzieren. Daher besteht für das Recycling von Kopiergeräten nur dann ein Anreiz, wenn die Finanzierung über gesetzliche Bestimmungen gesichert werden kann.

## 2 Einleitung

### 2.1 Elektronikschrott als Umweltproblem

In der Schweiz fallen jährlich ca. 110'000 t Abfälle von elektrischen und elektronischen Geräten an (*Monteil et al., 2000*). Damit machen sie etwa 4% der gesamten Siedlungsabfallmenge aus, die bei ca. 2.6 Mio. t liegt (*BFS, 1997*). Verglichen mit der Gesamtabfallmenge ist der Anteil des Elektronikschrotts noch gering. Dieser Anteil dürfte aber in Zukunft weiter anwachsen. Die EU rechnet mit einem dreimal schnelleren Wachstum der Abfälle aus Elektro- und Elektronikgeräten verglichen mit den restlichen kommunalen Abfällen (*Ogilvie, 1997*).

Die Motivation für gesetzliche Regelungen liegt aber weniger in den absoluten Schrottmengen, sondern vielmehr in der Qualität des Elektronikschrotts. EE-Geräte (Elektrische und elektronische Geräte) enthalten neben grossen Anteilen an rückgewinnbaren Substanzen wie Kupfer, Eisen und Edelmetallen eine Vielzahl von Stoffen, die bei unsachgemässer Entsorgung negative Effekte für die Umwelt haben können (*Blum und Schmidt, 1996*). Allein die bestückten Leiterplatten umfassen nahezu die gesamte Palette der chemischen Elemente, die in zum Teil toxischen Verbindungen auftreten. In vielen Fällen ist die genaue Zusammensetzung gar nicht bekannt, da keine detaillierten Informationen über die gesamte Produkt-Produktionskette vorhanden sind. Elektro- und Elektronikgeräte sind zu einem wesentlichen Teil für die Schwermetallbelastung der kommunalen Abfälle verantwortlich (*Fahrni und Gerber, 1999*). Kupfer steht im Verdacht als Katalysator die Bildung von Dioxinen und Furanen (PBDD, PBDF) bei der Verbrennung von Kunststoffen mit halogenhaltigen Flammschutzmittel zu fördern (*Menad et al., 1998*). Auch enthalten Elektronikprodukte verschiedene Schwermetalle. Blei wird in Lötmetall verwendet, Cadmium ist Bestandteil von Batterien und dient als Farbpigment in Kunststoffen, und Quecksilber wird für Schalter und in Dampfdrucklampen eingesetzt. Alle diese Stoffe sind toxisch und werden in der Umwelt nicht oder nur schlecht abgebaut. Hohe Schwermetallgehalte erschweren auch den Betrieb von KVA's und die Weiterverwendung der Verbrennungsprodukte, z.B. den Einsatz von Schlacke im Strassenbau (*Fahrni und Gerber, 1999*). Aber auch während der Gebrauchsphase entstehen Umweltbelastungen. Verbindungen wie PBB und PBDE sind nicht völlig in die Kunststoffmaterialien eingebunden, denen sie zugesetzt werden. Durch Erwärmung können kleine Mengen dieser Verbindungen verdunsten und in die Atemluft übergehen.

## 2.2 Elektronikrecycling in der Schweiz

Das Elektronikrecycling ist auf privatwirtschaftlicher Ebene organisiert, wie dies in der VREG vorgesehen ist. Die zwei wichtigsten Organisationen sind SWICO (Schweizerischer Wirtschaftsverband der Informations-, Kommunikations- und Organisationstechnik und S.EN.S (Stiftung Entsorgung Schweiz). Bei der Branchenlösung der SWICO wird beim Kauf eines entsprechenden Gerätes<sup>1</sup> eine vorgezogene Recyclinggebühr erhoben, die ertragsneutral für die Finanzierung der Sammellogistik und der Recycling- und Entsorgungskosten verwendet wird. Die SWICO garantiert dem Konsumenten die kostenlose Rücknahme der Geräte und eine fachgerechte Zerlegung gemäss den Anforderungen der VREG. Für FCKW-haltige Geräte hat die S.EN.S ein Vignettensystem eingeführt. Bei der Rückgabe des alten Gerätes bezahlt der Kunde einen Betrag und erhält dafür eine Vignette, mit der sich der Entsorgungsweg zurückverfolgen lässt. Auf diese Weise ist eine kontrollierte Entsorgung sichergestellt. Für die übrigen Geräte besteht keine einheitliche Lösung. Zwar sind Händler verpflichtet alle Gerätekategorien, welche sie im Sortiment führen zurückzunehmen, die Höhe der nachgezogenen Recyclinggebühr ist aber Verhandlungssache zwischen Händler und Konsument. Damit eine fachgerechte Entsorgung sichergestellt werden kann, arbeiten SWICO und S.EN.S mit verschiedenen Recyclingbetrieben in der Schweiz zusammen. Im Jahr 2000 wurden über diese beiden Kanäle knapp 39'000 t Elektronikschrott verarbeitet. Bei einer Einwohnerzahl von 7 Millionen ergibt sich somit eine Erfassungsquote von 5.6 kg pro Einwohner (S.EN.S, 2000). Demgegenüber stehen die Schätzungen des BUWAL von 110-150'000 t Elektronikschrott jährlich. Was mit den restlichen ca. 70'000 t passiert, ist schwer bezifferbar. Ein Teil dürfte direkt über die Importeure und Hersteller in das Recycling gehen. Da die Kontrolle von illegalen Elektronikschrott-Exporten sehr aufwendig ist, weil nachgewiesen werden muss, dass es sich bei den entsprechenden Geräten auch wirklich um Schrott handelt, besteht ein Anreiz, Geräte auf diese Weise zu entsorgen. Nach Auskunft des BUWAL<sup>2</sup> dürfte eine nicht unbedeutende Menge an Elektronikschrott unter dem Deckmantel von Occasionsgeräten den Weg zu einer günstigen Entsorgung im Ausland finden. Weitere nicht VREG-konforme Entsorgungswege sind die Entsorgung im Hauskehricht oder die Verarbeitung in nicht dafür vorgesehenen Betrieben. Sollte sich die privatwirtschaftliche Lösung als ungeeignet erweisen kann der Bund eine generelle vorgezogene Entsorgungsgebühr auf EE-Geräten einführen.

---

<sup>1</sup> Geräte der Kategorie Büro- Informations- und Kommunikationstechnik

<sup>2</sup> Persönliche Mitteilung Herr M. Monteil; BUWAL

## 3 Untersuchungsdesign

### 3.1 Vorgehen

Die Untersuchung umfasst 15.6 t Elektronikschrott von Kopierern (hauptsächlich der Firma Canon), welche bei der Recyclingfirma Immark AG zerlegt wurden. Anhand der Resultate des Zerlegungsprozesses wurden die Fraktionen ausgewählt, deren Recyclingschritte genauer untersucht werden sollten. Dazu war es notwendig Informationen von weiteren Verarbeitern einzuholen. Die gesammelten Daten zum Recyclingprozess und der Verbrennung in der KVA wurden anschliessend mit Hilfe der Ökobilanzmethodik ausgewertet. Dazu wurde die Ökobilanzsoftware SimaPro eingesetzt (PRé Consultants, 1997).

### 3.2 Konzeptionelles Systemmodell

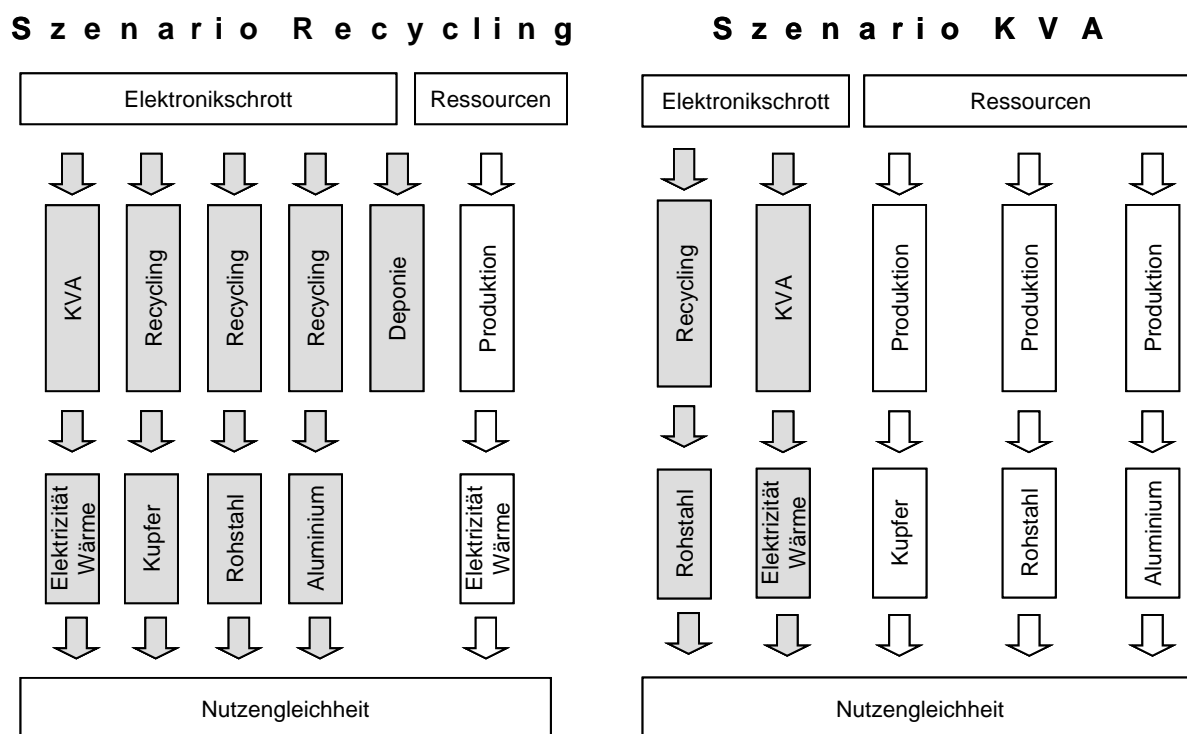


Bild 1: Konzeptionelle Systemdefinition. Grau: Prozesse, die beim jeweiligen Szenario stattfinden, weiss: zu addierende Komplementärprozesse, um Nutzengleichheit herzustellen

Bei der Beurteilung der Entsorgung von Elektronikschrott handelt es sich nicht um einen Vergleich zwischen dem Recycling und der KVA, sondern zwischen zwei unterschiedlichen Entsorgungsstrategien, da auch beim Recycling die Prozesse Deponierung (Glas) und KVA (Kunststoffe, Papier) enthalten sind. Bei der Abfallverbrennung kann aus der Schlacke zusätzlich Eisen abgeschieden und dem Recycling zugeführt werden. Damit ein gültiger Vergleich zwischen den Systemen möglich ist, müssen die Systeme so definiert werden, dass sie den gleichen Nutzen liefern.

Aus diesem Grund wurden die beiden verschiedenen Entsorgungsstrategien als Szenarien definiert. Dies ist in *Bild 1* veranschaulicht. Jedes Szenario enthält zusätzlich zu den eigenen Systemprozessen (graue Balken) die Komplementärprozesse des anderen Szenarios (weisse Balken), die notwendig sind, um Nutzengleichheit herzustellen. Nutzengleichheit bedeutet, dass bei beiden Szenarien die gleiche Menge an Elektronikschrott entsorgt wird, die gleichen Mengen an Metallen mit derselben Qualität und die gleiche Menge an Energie produziert wird.

### 3.3 Szenario KVA

In dieser Arbeit wurde für das Szenario KVA auf das Soll-Szenario des BUWAL zurückgegriffen, da es den aktuellen Stand der Abfallverbrennung in der Schweiz beschreibt (*BUWAL, 1996*). Damit der gleiche Nutzen wie im Szenario Recycling erreicht wird, müssen im Szenario KVA zusätzlich zu den Systemprozessen (*siehe Bild 2*) noch die Komplementärprozesse für die Metallproduktion berücksichtigt werden (*Bild 1*). Folgende Annahmen wurden für das Szenario KVA getroffen:

- Deponierung der Schlacke und der Rauchgasreinigungsrückstände
- Transporte: 76 % Kommunal Sammlung und 24 % Direktanlieferung
- KVA's sind vollständig mit weitergehender Rauchgasreinigung und zu 80 % mit Entstickungsanlagen ausgerüstet
- Wirkungsgrad der Energierückgewinnung bei der Verbrennung ist 36 % (10 % Strom und 26 % Wärme ) bezogen auf den unteren Heizwert
- Eisenabscheidung aus Schlacke beträgt 400 kg pro Tonne zugeführtes Eisen. In dieser Arbeit wurde angenommen, dass diese Eisenfraktion gleich verarbeitet wird, wie beim Szenario Recycling
- Die gewinnbare Energie bei der Verbrennung von Metallen ist gleich null

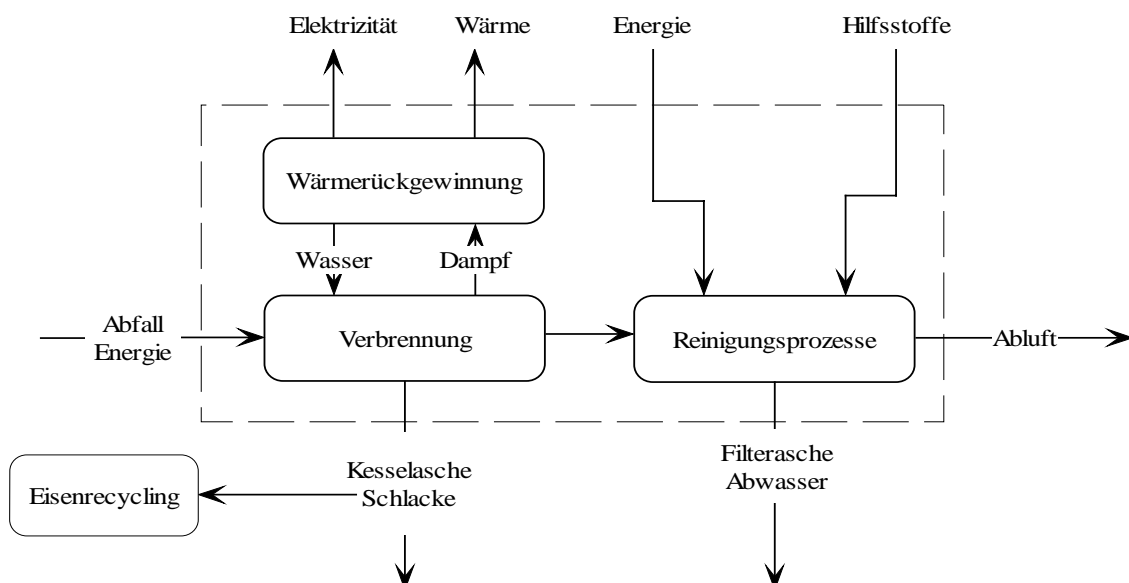


Bild 2: Flusschema der Systemprozesse des Szenarios KVA

### 3.4 Szenario Recycling

Dieses Szenario enthält die Trennprozesse bei der Firma Immark (*Bild 3*) und die weitergehenden Recyclingprozesse in den Metallhütten. Für die Verbrennung der Kunststoffe gelten die gleichen Annahmen wie für das Szenario KVA. Es wurden nur die Prozesse der ersten Verarbeitungsstufe der Sekundärproduktion berücksichtigt. So ist z.B. das Metallrecycling aus Filterstäuben, die bei der Sekundärmetallproduktion anfallen, nicht berücksichtigt. Die Allokation erfolgt zu 100% auf die verarbeitete Metallfraktion. D.h., dass alle Umweltauswirkungen der Sekundärmetallproduktion den Hauptprodukten (Aluminium, Rohstahl und Kathodenkupfer) angelastet werden und keine Aufteilung auf etwaige Kuppelprodukte vorgenommen wird.

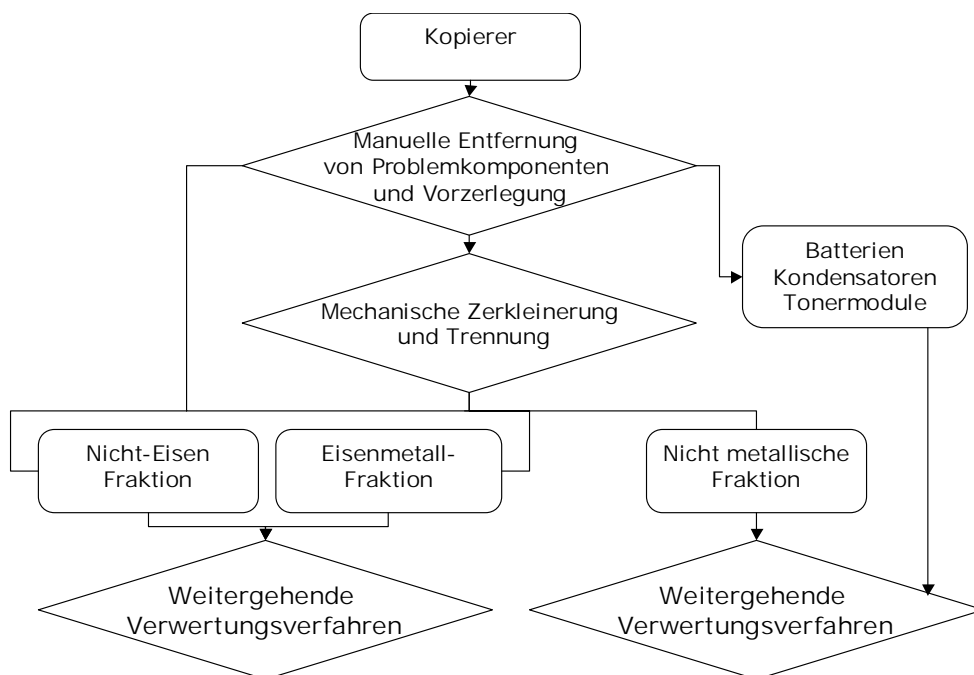


Bild 3: Schematische Darstellung der Trennprozesse bei der Firma Immark



### 3.5 Systemgrenzen

Angesichts der grossen Vielfalt von unterschiedlichen Recyclingtechnologien, war es im Rahmen dieser Arbeit notwendig, gewisse Einschränkungen zu machen und Annahmen zu treffen. Folgende Abgrenzungen wurden vorgenommen:

- Für die Recycling- und Verbrennungsprozesse wurden nur die Fraktionen gemäss *Tabelle 1 S.12* berücksichtigt. Die Verbrennung von Leiterplatten und Kondensatoren wurde nicht betrachtet
- Bei der ökologischen Bewertung wurden jeweils nur die Systemprozesse bewertet. Es wird angenommen, dass die Umweltauswirkungen, die mit der Herstellung der Infrastruktur und des Maschinenparks verbunden sind, vernachlässigt werden können.
- Es wurde angenommen, dass die Recyclingprozesse für eine bestimmte Fraktion die gleichen sind. D.h., dass sämtliche Kupferfraktionen mit der gleichen Technik recycelt werden. Etwaige Unterschiede zwischen den verschiedenen Technologien in den Kupferhütten konnten hier nicht genauer einbezogen werden.
- Die Allokation im Recyclingprozess findet zu 100 % auf die ausgewählten Fraktionen statt. Der Anfall von Kuppelprodukten hat somit keinen Einfluss auf die Ergebnisse.
- Für das Produktionssystem der Komplementärprozesse beim Szenario KVA wurden ein System mit einem Recyclinganteil gemäss dem weltweiten Recyclinganteil gewählt: Aluminium (33%), Kupfer (20%), Rohstahl (64%). D.h., dass ein 1kg Aluminium, welches durch Recycling von Kopiergeräten hergestellt wird, im Komplementärprozess des Szenarios KVA durch Primärproduktion mit einem Recyclinganteil von 33% produziert wird.

# 4 Ergebnisse

## 4.1 Zerlegung

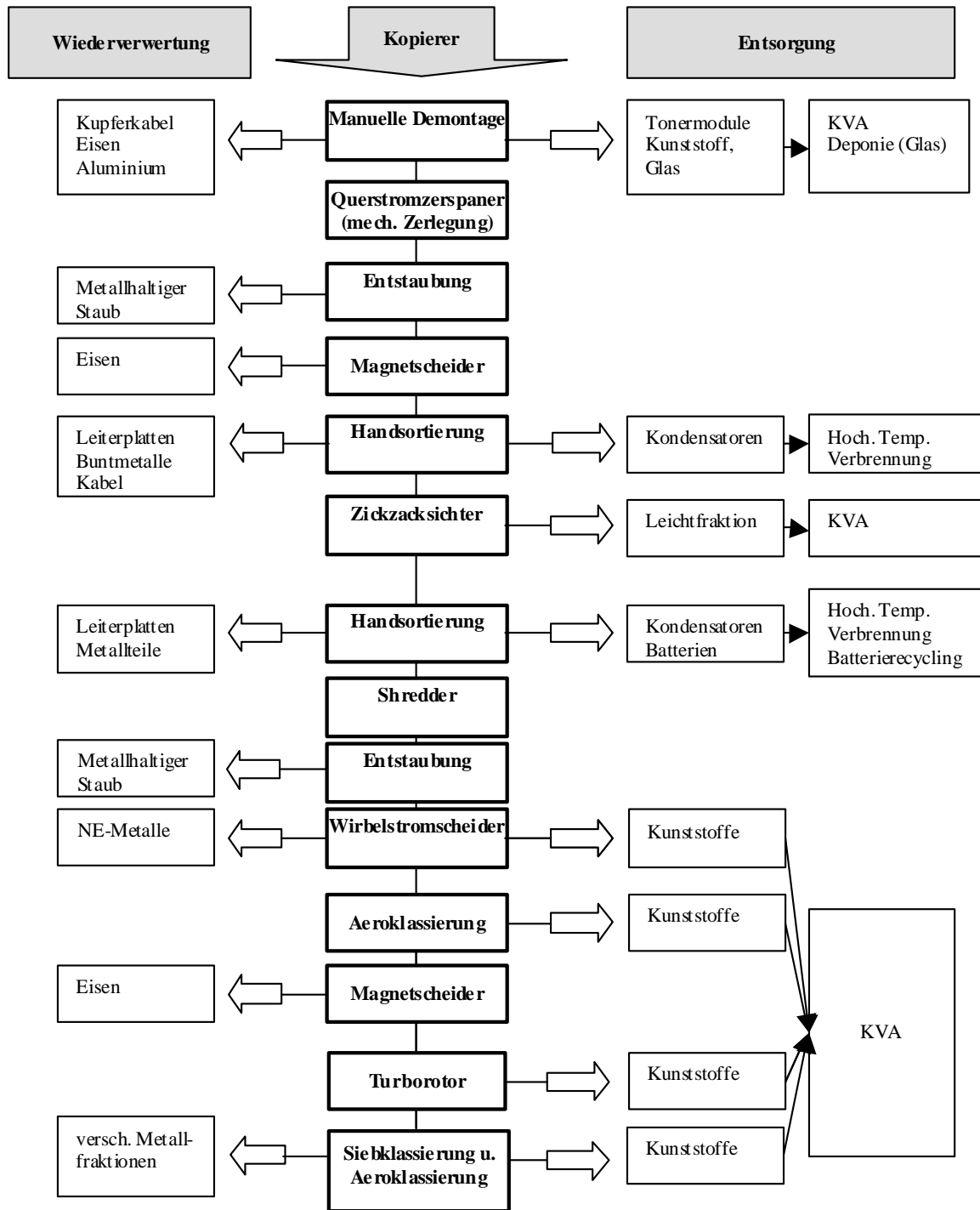


Bild 4: Zerlegungsschema von Kopiergeräten bei der Firma Immark

In *Bild 4* sind die Zerlegungsprozesse für die Kopiergeräte bei der Firma Immark zusammengefasst. Hinsichtlich der weiteren Verarbeitung können folgende Fraktionen unterschieden werden:

- *Schadstoffhaltige Teile aus der Entfrachtung:* Batterien und Akkumulatoren werden als Sonderabfälle recycelt. PCB-haltige Kondensatoren gehen in die Sonderabfallverbrennungsanlage. Tonermodule werden verbacken und in der KVA entsorgt.
- *Eisen, Stahl, rostfreier Stahl, Messing, Aluminium und andere Metalle:* Über den Altstoff- und Altmetallhandel erfolgt eine Sortierung und Zuführung der Metalle an die entsprechenden Metallhütten.
- *Kupfer, edelmetallhaltige Fraktionen :* Diese Fraktionen gelangen direkt zur Weiterverarbeitung in Kupferhütten.
- *Leiterplatten:* Leiterplatten werden einer speziellen Behandlung unterworfen, um möglichst den gesamten Metallanteil zurückzugewinnen. Dies geschieht in dafür ausgerüsteten Kupferhütten.
- *Kunststoffummantelte Kabel:* Elektrokabel werden dem Kabelrecycling zugeführt, wo die Komponenten Kunststoff und Kupfer getrennt werden.
- *Brennbare Anteile:* Die Entsorgung erfolgt je nach Zusammensetzung grösstenteils in Kehrichtverbrennungsanlagen oder in Sonderabfallverbrennungsanlagen
- *restliche Anteile:* Glasplatten werden deponiert

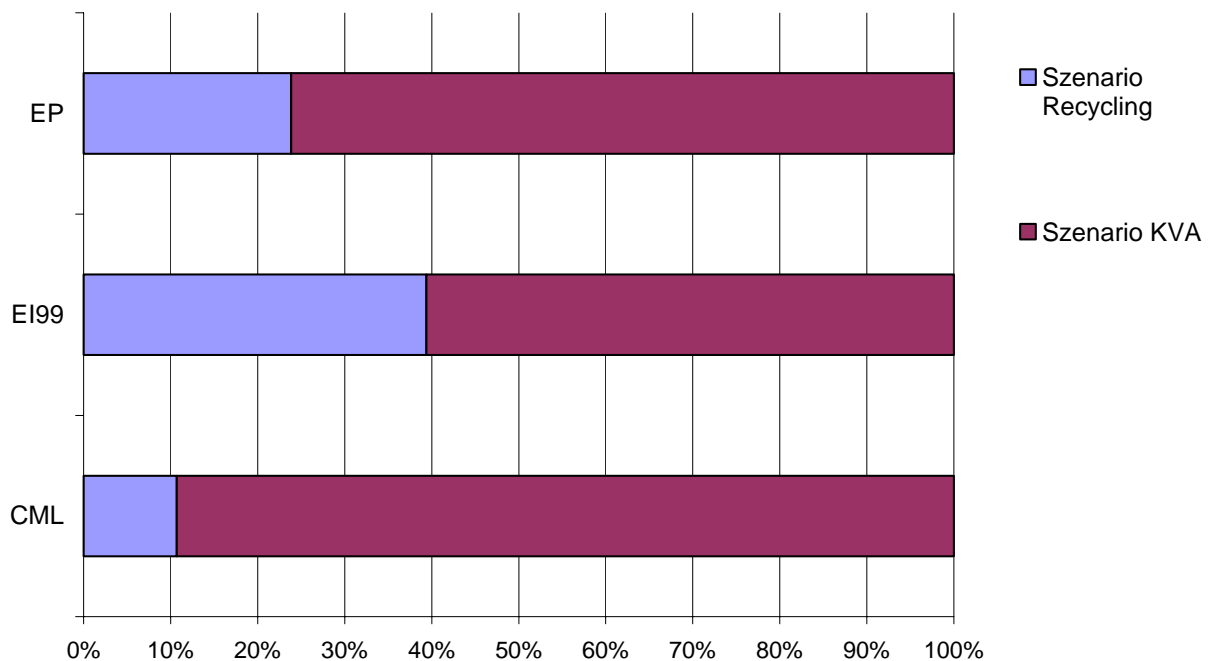
Die Resultate des Zerlegungsprozesses und die für die weitere Untersuchung ausgewählten Fraktionen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

*Tabelle 1: Für die Beurteilung der Umweltauswirkungen ausgewählte Fraktionen*

<b>Fraktion</b>	<b>Menge [kg/t Kopierer]</b>
Eisen	689
Aluminium	31
Kupfer	28
übrige Metalle	12.5
Leiterplatten	5.5
Kunststoffe	223
Papier	1
Glas	9
Kondensatoren u. Batterien	1

## 4.2 Ökologische Bewertung

In *Bild 5* ist das Gesamtergebnis der ökologischen Bewertung zusammengefasst. Bei allen Bewertungsmethoden schneidet das Recyclingszenario besser ab, allerdings in unterschiedlichem Ausmass. Beim Eco-Indicator 99 verursacht das KVA Szenario 1.54 mal mehr Umweltbelastung als das Recyclingszenario, bei der Methode der ökologischen Knappheit sind es 3.19 soviel Umweltbelastung. Dazwischen liegt der Wert von Eco-Indicator 95 (Szenario KVA verursacht 1.89 mal mehr Umweltbelastung).



*Bild 5: Vergleich der Umweltbelastung zwischen dem Szenario KVA und dem Szenario Recycling mit vier verschiedenen Bewertungsmethoden: EP: Methode der ökologischen Knappheit; EI99: Ecoindicator 99; EI95: Ecoindicator 95. 100 % entsprechen der Summe der Umweltbelastungen beider Szenarien. Bei 50 % wären beide Szenarien als gleichwertig zu betrachten*

Nachfolgend wird die Bedeutung der jeweiligen Prozesse in den beiden Szenarien dargestellt. Bezugsgrösse ist immer die Entsorgung eines Kilogramms Elektronikschrott von Kopiergeräten. *Bild 6* zeigt die Anteile der einzelnen Prozesse an der gesamten Umweltbelastung für das Szenario KVA. Hierbei entsprechen 100% dem KVA-Anteil in *Bild 5*.

Die Bewertungsmethoden liefern sehr ähnliche Ergebnisse. Deutlich erkennbar ist die starke Gewichtung der Kupferproduktion. Obwohl pro Tonne Elektronikschrott nur etwa 40 kg Kupfer im Komplementärprozess produziert werden müssen, ist die Primärkupferproduktion aus ökologischer Sicht der Prozess, welcher am stärksten zur Umweltbelastung im Szenario KVA beiträgt.

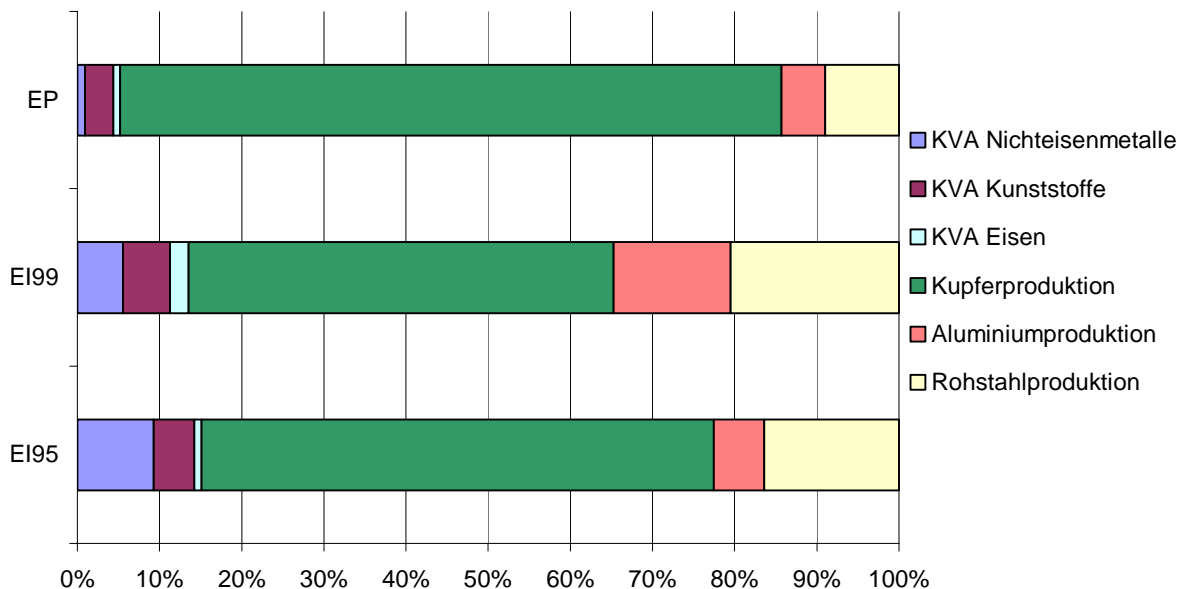


Bild 6: Szenario KVA: Anteile der einzelnen Prozesse an der bewerteten Umweltauswirkung.

Die Anteile der einzelnen Prozesse an der Umweltbelastung für das Szenario Recycling sind in Bild 7 dargestellt. Auch hier liefern die einzelnen Bewertungsmethoden sehr ähnliche Ergebnisse. Hinsichtlich der Umweltbelastung ist das Eisenrecycling der wichtigste Prozess. Die Trennprozesse bei der Immark und die damit verbundenen Transporte machen nur einen kleinen Teil der gesamten Umweltauswirkung aus (maximal 9%).

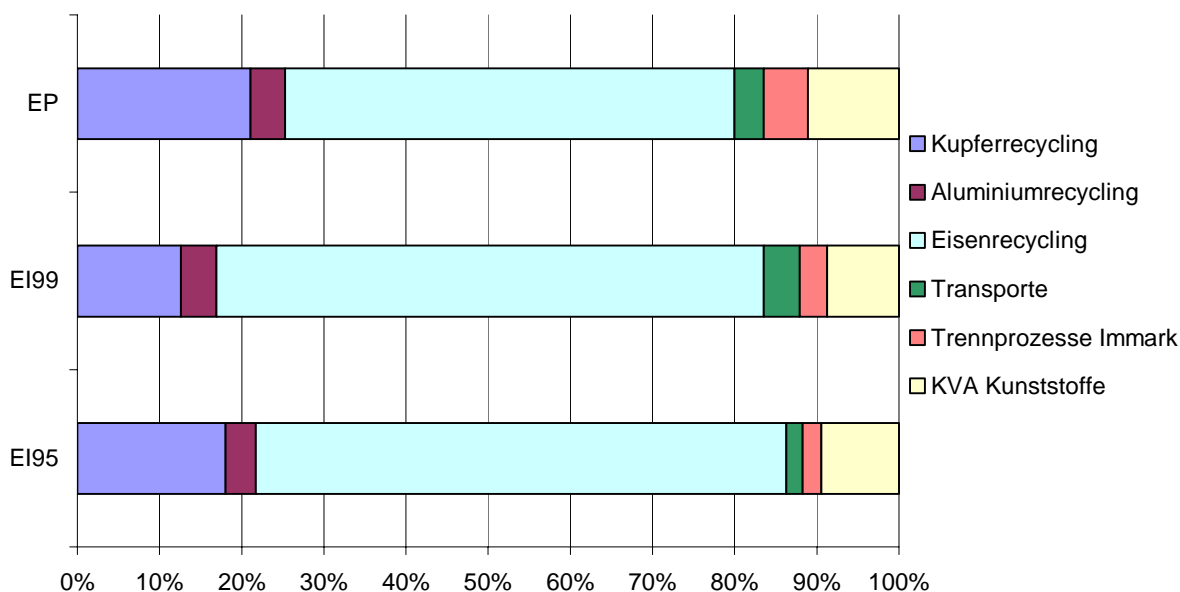
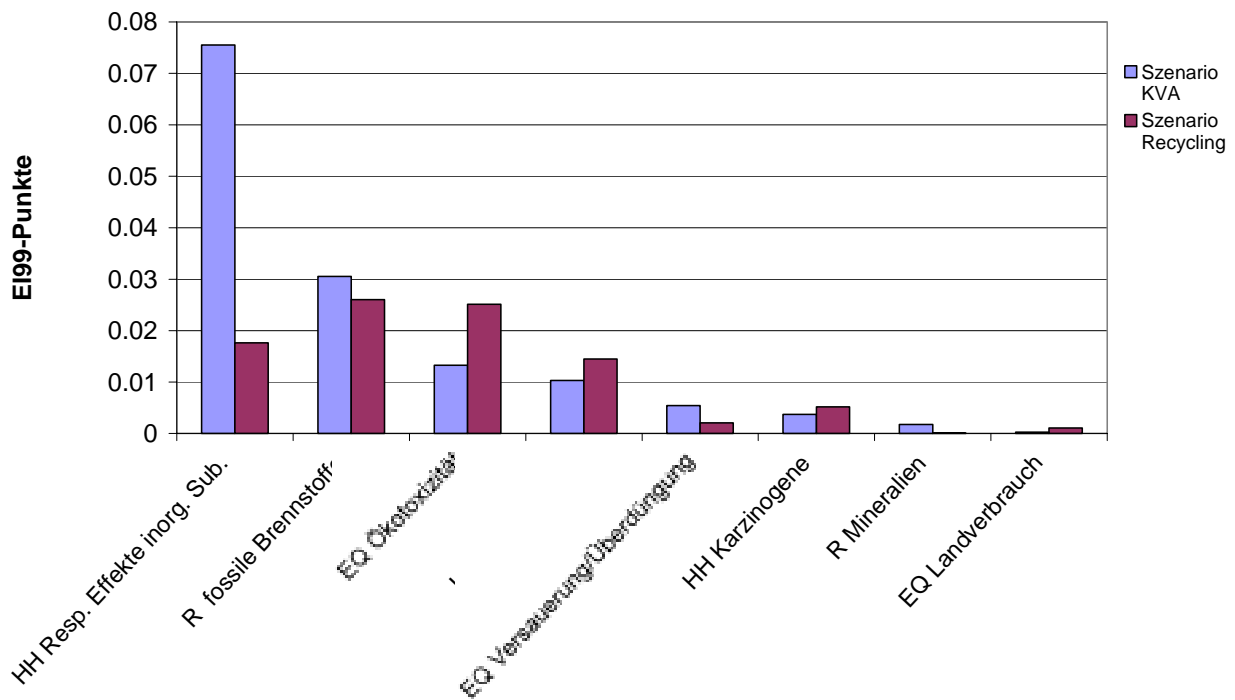


Bild 7: Szenario Recycling: Anteile der einzelnen Prozesse an der bewerteten Umweltauswirkung

In *Bild 8 bis Bild 10* werden die beiden Szenarien in Bezug auf die einzelnen Wirkungskategorien<sup>3</sup> miteinander verglichen. Beim EI99 (*Bild 8*) dominiert die Kategorie "respiratorische Effekte anorganischer Substanzen" des Szenarios KVA. Beim Szenario Recycling verteilen sich die Umweltauswirkungen auf die Kategorien "Ressourcenverbrauch an fossilen Brennstoffen", Ökotoxizität, respiratorische Effekte anorganischer Substanzen und die Effekte des Klimawandels.



*Bild 8: EI99: Vergleich der einzelnen Wirkungskategorien in den beiden Szenarien. Bezugsgrösse ist die Entsorgung von einem 1kg Kopiergeräten. Aufgeführt sind nur jene Kategorien, die mehr als 1% zum Gesamtergebnis beitragen. Die Abkürzungen HH: Human Health; EQ: Ecosystem Quality und R: Resources bezeichnen Schadenskategorien.*

Bei der Methode der ökologischen Knappheit (*Bild 9*) dominieren zwei Auswirkungen das Ergebnis: die Schwefeldioxidemissionen und der Anfall an Abfall beim Szenario KVA. Zusammen sind sie zu 85% für die Umweltauswirkungen des Szenarios KVA verantwortlich. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen bilden die wichtigste Wirkungskategorie beim Szenario Recycling. Sie sind zu 30 % für die Umweltauswirkungen dieses Szenarios verantwortlich.

<sup>3</sup> Dieser Begriff ist eigentlich nur für die EI95-Methodik korrekt, im weiteren wird er aber auch für die anderen Methoden verwendet.

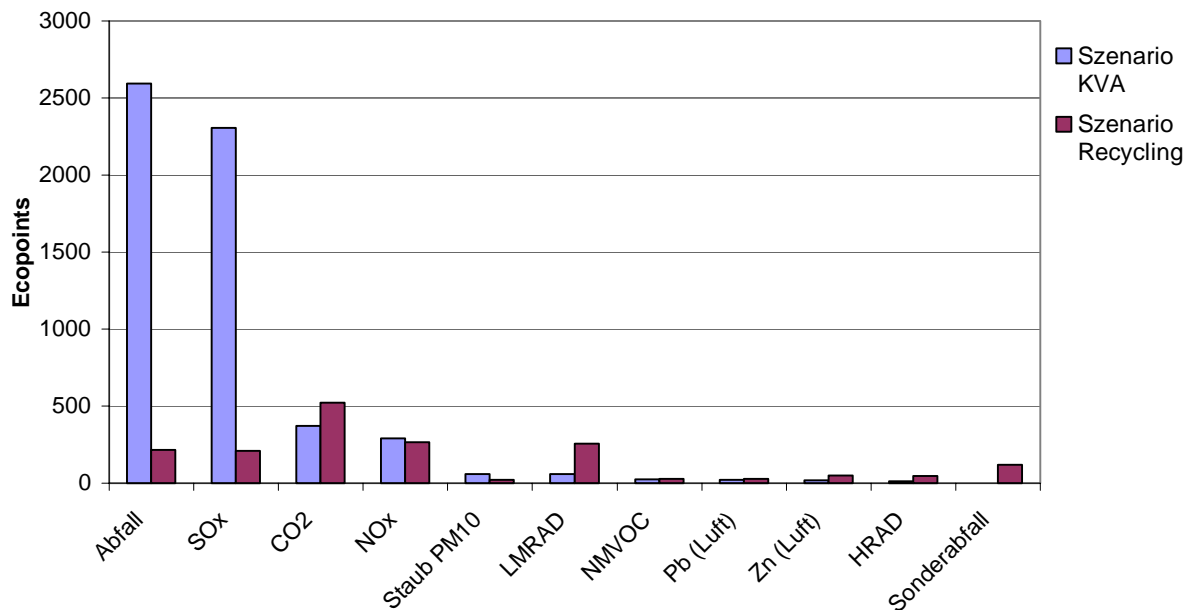


Bild 9: Bewertungsmethode der ökologischen Knappheit: Vergleich der einzelnen Wirkungskategorien in den beiden Szenarien. Aufgeführt sind nur jene Kategorien, die mehr als 1 % der Gesamtwirkung ausmachen. Bezugsgrösse ist die Entsorgung von einem 1kg Kopiergeräten

Beim EI95 (Bild 10) verteilen sich die Umweltauswirkungen des Szenarios KVA zu 93% auf die Wirkungskategorien Versauerung, Wintersmog und Schwermetalle. Die letztgenannte Kategorie ist auch für 68% der Umweltauswirkungen des Szenario Recyclings verantwortlich.

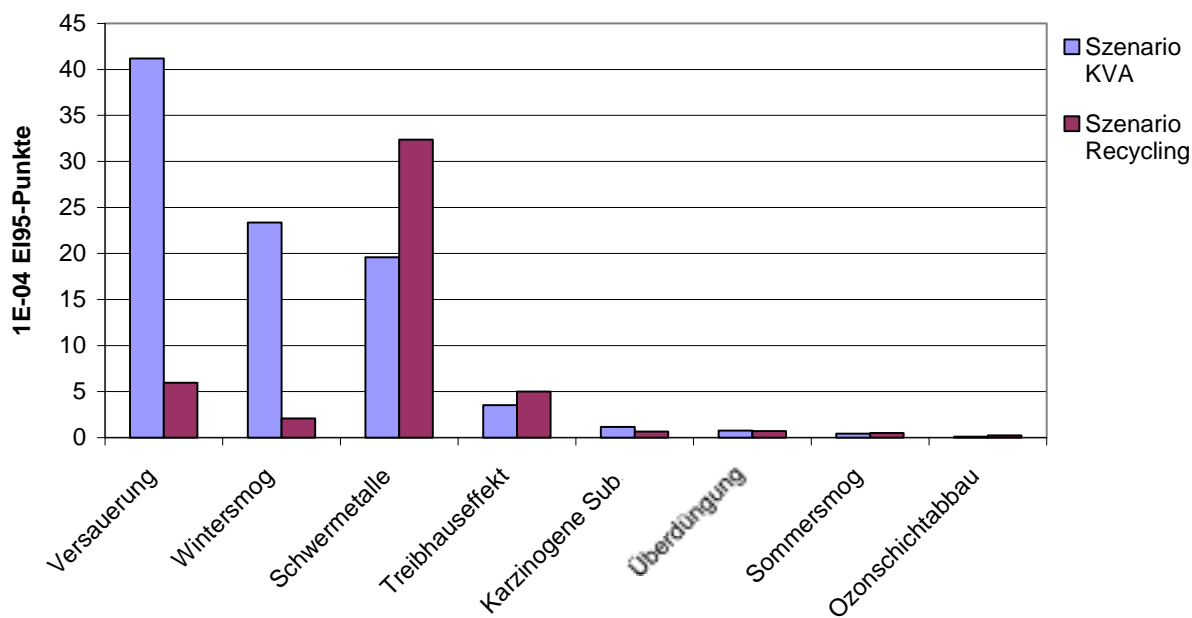


Bild 10: EI 95: Vergleich der einzelnen Wirkungskategorien in den beiden Szenarien. Bezugsgrösse ist die Entsorgung von einem 1kg Elektronikschrott von Kopierern.

In *Tabelle 2* sind die Gewichtungen der einzelnen Prozesse in den verschiedenen Bewertungsmethoden zusammenfassend wiedergegeben.

*Tabelle 2: Gewichtung der einzelnen Prozesse durch die unterschiedlichen Bewertungsmethoden pro 1kg, normalisiert auf 100. Lesebeispiel: Die gesamten Umweltauswirkungen, welche durch Recycling von 1 kg Aluminium entstehen, werden mit Methode EI99 ca. dreimal so hoch bewertet wie bei Verbrennung von 1 kg Kunststoff in der KVA*

Prozesse	EI95	EI99	EP
Deponie Glas	0.01	0.04	0.01
Energie Immark	0.05	0.09	0.06
KVA Aluminium	0.06	0.18	0.06
KVA Eisen	0.05	0.14	0.04
KVA Glas	0.05	0.15	0.05
KVA Kunststoffe	0.88	1.06	0.58
KVA NE-Metalle	9.03	5.66	0.87
KVA Papier	0.07	0.12	0.05
Primärproduktion Aluminium (33% Recycling-Anteil)	7.10	17.24	5.85
Primärproduktion Kupfer (20 % Recycling-Anteil)	67.51	58.66	83.00
Primärproduktion Rohstahl (64% Recycling-Anteil)	1.89	2.52	0.99
Recycling Aluminium	2.02	3.05	1.32
Recycling Eisen	1.96	2.60	0.93
Recycling Kupfer	9.29	8.39	6.13
Transporte	0.04	0.12	0.04

### 4.3 Ökonomische Beurteilung

In *Tabelle 3* sind die Kosten für den Recyclingprozess bei der Immark und die Verbrennung in der KVA gegenübergestellt. Aufgrund des unterschiedlichen Aufbaus der Kostenrechnungen wurde für den Vergleich in *Bild 11* eine Vereinheitlichung durchgeführt. Die Transport-, Personal- und Entsorgungskosten sowie die Abschreibungen für Maschinen wurden aus den entsprechenden Kostenrechnungen direkt übernommen. Bei der KVA wurden die Kosten für Kapitalzinsen, die Bauabschreibungen, die Aufwendungen für Reparatur und Unterhalt sowie die Administration in den Gemeinkosten zusammengefasst. Die Rubrik Material/Betrieb umfasst bei der KVA die Kosten für die Betriebsstoffe, beim Recycling die Strom- und Materialkosten.



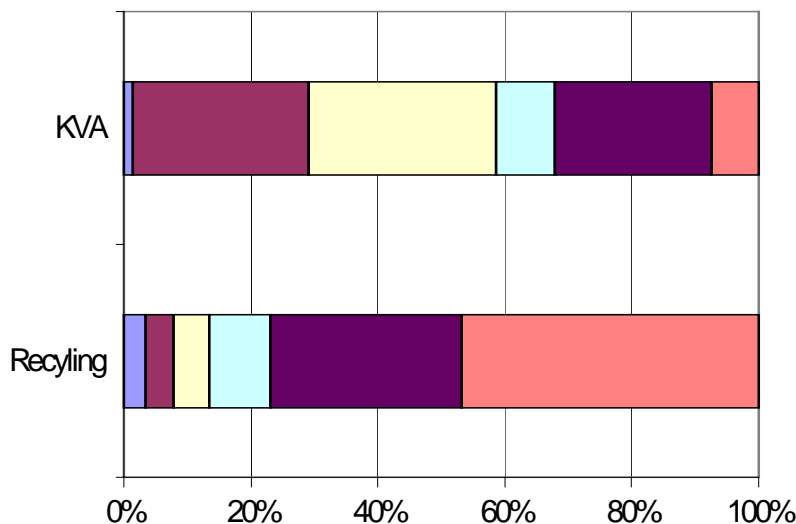
Tabelle 3: Kostenvergleich KVA und Recycling von Kopiergeräten; in SFr. pro Tonne Elektronikschrott (Quelle: Schleiss, 1999 und Erhebung bei Immark 2001)

KVA		Recycling	
Transportkosten	100.00	Transportkosten	208.75
Personalkosten	30.00	Personalkosten	324.10
Administration	4.00	Materialkosten	8.20
Betriebsstoffe	6.00	Stromkosten	15.50
Entsorgungskosten	37.00	Mietkosten Maschinen	3.55
Kapitalzinsen	53.10	Entsorgungskosten	65.48
Abschreibungen Bau	26.00	Abschreibungen Maschinen	27.65
Abschreibungen Maschinen	112.00	Gemeinkosten	38.65
Reparatur u. Wartung	28.90		
Versicherungen	7.10		
<i>Total Kosten</i>	<i>404.10</i>	<i>Total Kosten</i>	<i>691.88</i>
<i>Ertrag Energieverkauf</i>	<i>21.00</i>	<i>Wertstoffertag</i>	<i>129.28</i>
<b>Nettokosten</b>	<b>383.10</b>	<b>Nettokosten</b>	<b>562.60</b>

In Bild 11 sind die Kostenstrukturen des Recyclingprozesses bei der Immark und der Verbrennung in der KVA einander gegenübergestellt. Dieser Vergleich muss aber relativiert werden. Während bei der KVA die gesamten Kosten und Erträge erfasst sind, ist beim Recycling nur ein Teil der Erträge enthalten. Die Gewinne, die in der nachgelagerten Wertschöpfungskette mit dem Handel und Verarbeitung von Eisen- und Aluminiumfraktionen erzielt werden, sind in den angegebenen Zahlen nicht enthalten.

Für die Verarbeitung der kupfer- und edelmetallhaltigen Fraktionen bezahlt die Immark den Kupferhütten eine Bearbeitungsgebühr, bleibt aber im Besitze der zurückgewonnenen Metalle und verkauft diese über die verarbeitenden Kupferhütten auf dem Rohstoffmarkt, so dass bei diesen Fraktionen die ganze Wertschöpfungskette berücksichtigt ist. Die für die Berechnung verwendeten Erlöse sind Erfahrungswerte der Firma Immark. Da die Metallbörsen sehr volatil sind, ergeben sich im Einzelfall andere Werte. Die Daten für die KVA sind Mittelwerte für die Schweiz. Die Kosten können hier je nach Grösse und Auslastung der Anlage variieren. Es wurde nicht unterschieden, ob Elektronikschrott oder ein anderes Gut verbrannt wird. Die Annahme, dass die Verbrennung von Elektronikschrott die gleichen Kosten verursacht, wie die Verbrennung der übrigen Siedlungsabfälle dürfte aber nur bedingt berechtigt sein.

Der erhöhte Gehalt an Metallen und Kunststoffen dürfte vor allem die Rauchgasreinigung stärker belasten. Gemäss Auskunft von verschiedenen KVA-Betreibern wird die unterschiedliche Zusammensetzung von Abfällen bei der Festlegung des Verbrennungspreises allerdings nicht berücksichtigt, da dies vom Beprobungsaufwand nicht praktikabel wäre.



	Recycling	KVA
Personal	324	30
Transport	209	100
Entsorgung	67	37
Gemeinkosten	39	119
Abschreibungen Maschinen	31	112
Material/Betrieb	24	6

Bild 11: Vergleich der Kostenstruktur von KVA und Recyclingunternehmen bei der Entsorgung von Kopiergeräte; in SFr. pro Tonne Elektronikschrott)

In Bild 12 sind die Mengenanteile und die dazugehörigen Wertstoff Erlöse der einzelnen Metallfraktionen dargestellt. Die mengenmässig bedeutendste Fraktion, die Eisenfraktion, macht nur 18 % des gesamten Wertstoff Erlöses aus. Die z.T. teuren Eisenlegierungen, welche in Elektronikprodukten Einsatz finden, können nicht getrennt erfasst werden. Die ganze Eisenfraktion wandert direkt oder über den Metallhandel ins Stahlwerk, wo Stähle für den Baubereich produziert werden. Bei den übrigen Fraktionen spiegelt sich der intrinsische Wert der entsprechenden Metalle wieder.

Die Aluminiumfraktion aus dem Turborotor (1.7% Gewichtanteil an den Kopierer) kann von der Immark für SFr. 1'800.- weiterverkauft werden. Verglichen mit dem durchschnittlichen Marktpreis von Primäraluminium für den Juni 2001 von SFr.2'521 pro Tonne <sup>4</sup>, können somit durch den Trennvorgang 71 % Prozent des ursprünglichen Metallwertes erreicht werden. Für bestimmte Kupferfraktionen sieht dieses Verhältnis noch besser aus, da hier noch zusätzlich die Edelmetalle zurückgewonnen werden können. Trotz dieser hohen Wertschöpfung sind die Gehalte dieser hochpreisigen Metalle zu gering, um das Recycling finanziell selbsttragend betreiben zu können.

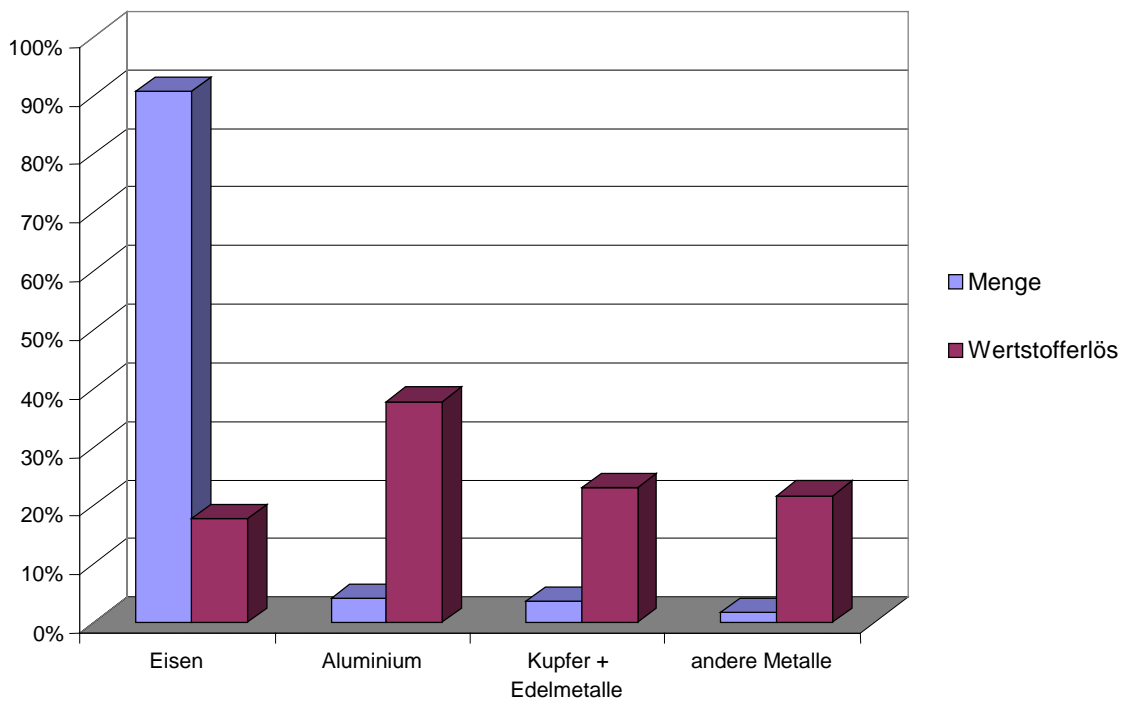


Bild 12: Anteil der Wertfraktionen in Kopiergeräten in bezug auf Menge und Erlös

4 London Metal Exchange: [http://www.lme.co.uk/data\\_prices/monthly\\_prices.asp](http://www.lme.co.uk/data_prices/monthly_prices.asp); berechnet mit Dollarkurs 1.72

## 5 Diskussion

### 5.1 Ökologische Bewertung

#### Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden drei verschiedene Bewertungsmethoden verwendet. Die ökologische Beurteilung wurde auf der Stufe der vollaggregierten Daten vorgenommen. Man mag diese Vollaggregation kritisieren, letztlich muss aber immer eine Bewertungsmethode eingesetzt werden, um verschiedene Umweltauswirkungen miteinander vergleichen zu können. Obwohl die verwendeten Methoden z.T. unterschiedliche Aspekte berücksichtigen, und die gleichen Emissionen unterschiedlich gewichten, wurde bei allen drei Bewertungsmethoden das Szenario Recycling als ökologisch vorteilhafter beurteilt. Dies ist vor allem auf die grosse Bedeutung der SO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Primärkupferproduktion zurückzuführen. Diese Emissionen gehen bei allen drei Methoden stark ins Gesamtergebnis des Szenarios KVA ein.

Bei der Methode der ökologischen Knappheit sind die SO<sub>2</sub>-Emissionen der Primärproduktion von Kupfer zu 36 % Prozent für die gesamten Umweltauswirkungen verantwortlich. Da bei dieser Methode auch der durch die Kupferproduktion anfallende Abraum des Kupfererzabbaus bewertet wird, gehen beim Szenario KVA mehr als 80 % der gesamten Umweltauswirkungen auf das Konto der Primärkupferproduktion. Bei den anderen Bewertungsmethoden sind es 62% (Eco-Indicator 95) und 51% (Eco-Indicator 99).

#### 5.1.1 Bewertungsmethoden

##### Methode der ökologischen Knappheit

Bei dieser Bewertungsmethode schneidet das Szenario KVA im Vergleich zum Szenario Recycling am schlechtesten ab. Dies ist vor allem auf die hohe Gewichtung der Kupferproduktion zurückzuführen (vgl. *Tabelle 2 S.16*). Die wichtigsten Wirkungskategorien sind die SO<sub>x</sub>-Emissionen (40% der gesamten Umweltauswirkungen), Abfall (44 %) und die CO<sub>2</sub>-Emissionen (6%). Die SO<sub>x</sub>-Emissionen und der Abfall lassen sich nahezu vollständig auf die Kupferproduktion im Komplementärprozess zurückführen (über 90%).

Die Emissionen von SO<sub>x</sub> und der Abfall entstehen direkt bei der Gewinnung des Kupfers. Da Kupfer nur in sehr geringen Konzentrationen in Erzen vorliegt, die durchschnittliche Konzentration liegt bei 0.6% -0.8% (*DKI, 1989*), ist der anfallende Abraum dementsprechend gross. Pro 1 kg gefördert Kupfer sind es 134 kg<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> IDEMAT Datenbank in SimaPro, Modul Copper I

Die SO<sub>2</sub>-Emissionen betragen 1.06 kg<sup>6</sup> pro kg geförderttes Kupfer. Diese dürften aus der Röstung der Kupfersulfide stammen aus denen das Kupfer gewonnen wird. Die hohe Gewichtung der Kupferproduktion resultiert daher vor allem wegen den hohen SO<sub>2</sub>-Emissionen und den grossen Abfallmengen, weniger aufgrund der absoluten Gewichtungsfaktoren für diese Kategorien. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen stammen zu einem Drittel aus der Verbrennung von Kunststoffen, die restliche Anteile entfallen auf die Produktion von Kupfer und Aluminium (je ein Sechstel).

Beim Szenario Recycling ist die Verteilung der Umweltauswirkungen auf die einzelnen Kategorien gleichmässiger (*siehe Bild 9*). Die wichtigste Wirkungskategorie bilden die CO<sub>2</sub>-Emissionen (30%). Diese stammen zu 60% aus dem Eisenrecycling, wovon 24% auf die Energiebereitstellung entfallen, und zu 24% aus der Verbrennung von Kunststoffen (direkte Emissionen). Weitere wichtige Wirkungskategorien beim Szenario Recycling sind die leicht- und mittelradioaktiven Abfälle (14%). Diese stammen zu 72% aus der Energiebereitstellung für das Stahlrecycling. Ebenfalls zum grössten Teil (72%) auf das Stahlrecycling zurückzuführen ist die Ausprägung der Wirkungskategorie Abfall (Anteil von 12% an den Umweltauswirkungen des Szenarios Recycling).

### **Ecoindicator 99**

Der Unterschied zwischen den beiden Szenarien ist bei dieser Bewertungsmethode am geringsten. Dies ist vor allem auf die gegenüber den anderen Methoden geringere Bewertung der Kupferproduktion zurückzuführen (*siehe Tabelle 2 S.16*). Die wichtigsten Umweltauswirkungen des Szenarios KVA (*siehe Bild 8*) sind die "respiratorischen Effekte anorganischer Substanzen" (53% Anteil an den gesamten Umweltauswirkungen), der Ressourcenverbrauch fossiler Brennstoffe (22%) und Ökotoxizität (9%). Die respiratorischen Effekte lassen sich zu 76% auf die SO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Kupferproduktion zurückführen. Weitere 10 % stammen aus den SO<sub>2</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen der Aluminiumproduktion.

Der Ressourcenverbrauch entsteht aufgrund der Energiebereitstellung durch fossile Brennstoffe (Gas, Öl) und verteilt sich zu je einem Drittel auf die Kupferproduktion, die Aluminiumproduktion und die Stahlproduktion. Darin widerspiegelt sich der unterschiedliche Energieverbrauch der mit der Herstellung dieser Metalle verbunden ist. Dies ist in *Tabelle 4* veranschaulicht. Der Gesamtenergiebedarf für die Herstellung der Metalle Aluminium, Kupfer und Rohstahl ist mit dem für das Szenario KVA definierten Produktionssystem annähernd identisch. Der spezifische Energiebedarf und die produzierten Mengen gleichen einander aus.

Die Ökotoxizität (9 % Anteil an den Umweltauswirkungen im Szenario KVA) ist zu 60% auf die Zink-Emissionen beim Eisenrecycling zurückzuführen. Für den restlichen Anteil sind Luftemissionen von Kupfer, Blei und Zink verantwortlich, die aus der Verbrennung der NE-Metalle stammen.

---

<sup>6</sup> IDEMAT Datenbank in SimaPro, Modul Copper I

Die relevanten Wirkungskategorien des Szenarios Recycling sind die Ökotoxizität (28%), der Ressourcenverbrauch fossiler Brennstoffe (27%) und die respiratorischen Effekte anorganischer Substanzen (19%). Die Ökotoxizität wird zu 95 % durch die Zinkemissionen beim Eisenrecycling bestimmt. Auch für den Ressourcenverbrauch ist hauptsächlich das Eisenrecycling verantwortlich (70%). Wie aus *Tabelle 4* hervorgeht, ist der energetische Vorteil bei der Sekundärproduktion von Eisen gegenüber den anderen Metallen viel kleiner als bei der Primärproduktion, so dass beim Szenario Recycling der Einfluss der verarbeiteten Mengen stärker zur Geltung kommt. Die respiratorischen Effekte anorganischer Substanzen verteilen sich auf die SO<sub>x</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen beim Stahlrecycling (40 %), Kupferrecycling (20%) und auf die Verbrennung von Kunststoffen (16%).

*Tabelle 4: Energiebedarf für die Produktion von Primär- und Sekundärmetallen. Quelle: Wernick und Themelis, 1998.\*) unter Berücksichtigung der Verluste beim Recycling.*

Metall	*) produzierte Menge pro Tonne E-Schrott [kg]	Recycling -quote	Energiebedarf			Totaler Energiebedarf pro Tonne E-Schrott [GJ]
			Primärproduktion [GJ/t]	Sekundärproduktion [GJ/t]	Mixproduktion [GJ/t]	
Kupfer	36.45	20%	160	25	133	4.85
Aluminium	28	33%	300	13	202	5.73
Eisen gesamt	571				10	5.71
<i>Eisen</i>	<i>343</i>	<i>64%</i>	<i>30</i>	<i>4.5</i>	<i>13.7</i>	<i>5.65</i>
<i>Eisen aus Schlacke</i>	<i>228</i>	<i>100%</i>		<i>4.5</i>	<i>4.5</i>	<i>1.24</i>

## Eco-Indicator 95

Beim Eco-Indicator 95 lassen sich für das Szenario KVA drei relevante Wirkungskategorien ausmachen. Die Versauerung (45%), der Wintersmog (26%) und die Schwermetalle (22%). Die Ausprägung der Wirkungskategorie Versauerung und Wintersmog lassen sich zu 90% auf die SO<sub>2</sub> Emissionen bei der Kupferproduktion zurückführen. Für die Kategorie Schwermetalle finden sich drei hauptverantwortliche Emissionsquellen. 40% werden durch die Emissionen beim Stahlrecycling verursacht (v.a. Mangan, Blei und Cadmium). 42% stammen aus der Verbrennung der NE-Metalle (Cadmium, Nickel, Blei) und 12% gehen auf das Konto der Kunststoffverbrennung.

Die wichtigste Wirkungskategorie beim Szenario Recycling sind die Schwermetalle (68%). Verantwortliche dafür ist zu 74% das Stahlrecycling (Mangan 48%, Blei 32%, Cadmium 10%). 16 % können auf das Kupferrecycling zurückgeführt werden. (Cadmium 22%, Blei 22%, Nickel 15%).

## Vergleich der Methoden

Wie bereits festgestellt wurde, bewerten alle drei Methoden stark die SO<sub>2</sub>-Emissionen der Kupferprimärproduktion. Beim Betrachten von *Bild 7 S. 13* würde man annehmen, dass sich auch für das Szenario Recycling die ähnlichen Resultate der drei Methoden durch eine ähnliche Gewichtung der gleichen Emissionen erklären lassen. Dies ist allerdings nur sehr bedingt der Fall. So sind zum Beispiel beim Eco-Indicator 99 27% der gesamten Umweltauswirkungen des Szenarios Recycling auf den Ressourcenverbrauch an fossilen Brennstoffen zurückzuführen. Beim Ecoindicator 95 fehlt eine entsprechende Kategorie und bei der Methode der ökologischen Knappheit wäre zwar eine solche Kategorie vorhanden (Energieverbrauch) sie macht aber weniger als 1% der gesamten Umweltauswirkungen beim Szenario Recycling aus, und wurde deshalb nicht in den Grafiken aufgeführt. Ein zweites Beispiel für die unterschiedliche Selektivität der Methoden liefern die Zink-Emissionen. Während beim EI99 gut 26 % der gesamten Umweltauswirkungen des Szenarios Recycling auf die Zinkemissionen beim Eisenrecycling zurückgeführt werden können, sind es bei der Methode der ökologischen Knappheit nur 3%, obwohl diese eine eigene Wirkungskategorie für Zinkemissionen aufweist. Beim EI95 schliesslich machen die Schwermetallemissionen sogar 68% der gesamten Umweltauswirkungen des Szenarios Recycling aus. Hier liegt aber die Gewichtung auf den Metallen Mangan 48%, Blei 33% und Cadmium 10%.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die verschiedenen Bewertungsmethoden zwar ähnliche Ergebnisse liefern, diese aber nicht auf die gleichen Emissionen zurückzuführen sind. Dies lässt sich auf zwei Unterschiede zwischen den Bewertungsmethoden zurückführen. Die verschiedenen Bewertungsmethoden gewichten die gleichen Emissionen unterschiedlich stark und die Bewertungsmethoden decken nur einen bestimmten Ausschnitt der gesamten Umweltauswirkungen ab.

### 5.1.2 Einfluss der Kupferproduktion auf die Ergebnisse

Wie bei der Analyse der ökologischen Bewertung festgestellt wurde, lassen sich die Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien hauptsächlich auf die Kupferproduktion zurückführen. Wie stark die Ergebnisse von der Kupferproduktion abhängen ist in *Bild 13* dargestellt. Würde die Kupferfraktion nicht berücksichtigt, da sie nur etwa 4% des gesamten Elektronikschrotts ausmacht, würde dies die Beurteilung komplett ändern. Da das Kupferrecycling beim Szenario Recycling nur eine geringe Bedeutung hat, hier ist das Eisenrecycling der entscheidende Prozess, ändert sich bei diesem Szenario nicht viel. Drastisch hingegen ist die Abnahme der Umweltauswirkungen beim Szenario KVA. Diese Abnahme führt dazu, dass ohne Berücksichtigung der Kupferproduktion das Szenario KVA bei allen Bewertungsmethoden als die ökologisch bessere Variante zu bezeichnen ist. Dieses Beispiel zeigt eindrücklich wie gefährlich es sein kann, wenn man in Ökobilanzen Massenflüsse als Abschneidekriterium für die Systemgrenzen wählt.

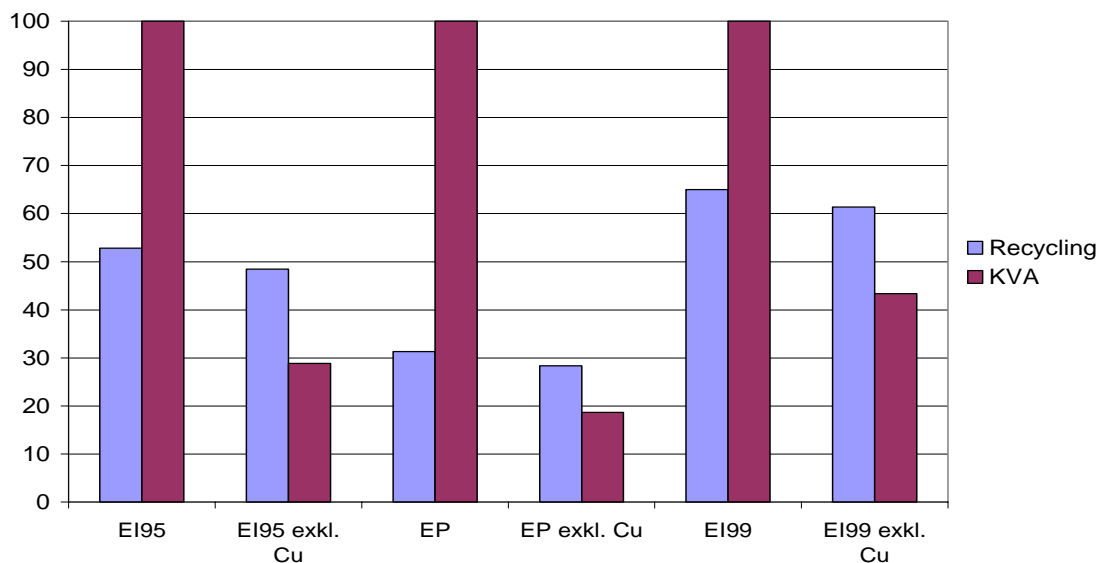


Bild 13: Einfluss der Kupferproduktion auf das Gesamtergebnis der ökologischen Beurteilung. Normiert auf die Umweltauswirkungen des Szenarios KVA (=100)

### 5.1.3 Beurteilung der ökologischen Vorteile des Recyclings von Elektronikgeräten

Aus den bisherigen Ausführungen ist hervorgegangen, dass das Recycling von Kopiergeräten im Vergleich zur Verbrennung in der KVA mit ökologischen Vorteilen verbunden ist. Allerdings stellt sich die Frage, wie relevant denn dieser Vorteil ist. Absolute Resultate von Ökobilanzbetrachtungen (Ecopoints, EI-Punkte) lassen sich nur schwer beurteilen, da ein entsprechender Vergleichsmassstab fehlt. Anhand einer kleinen Rechnung lässt sich der ökologische Vorteil des Szenarios Recycling veranschaulichen. Nimmt man das durchschnittliche Gewicht eines Kopierers aus der Verarbeitung (120 kg) und rechnet die entsprechenden Ecopoints und EI-Punkte der Szenarien KVA und Recycling auf dieses Gewicht um, so stellt die Differenz zwischen den Szenarien den ökologischen Vorteil dar, der durch das Recycling eines Kopierers erreicht werden kann.

Diese Differenz wird nun verglichen mit den Umweltauswirkungen, die mit dem Betrieb und Unterhalt eines Kopierers verbunden sind. Dabei werden der Stromverbrauch und die Servicekilometer berücksichtigt<sup>7</sup>. Daraus ergibt sich folgender Vergleich: Mit den durch das Recycling von einem Kopiergerät "eingesparten" Umweltauswirkungen können die Umweltauswirkungen aus dem Betrieb und Unterhalt eines Kopierers für: 4.8 Jahre (Methode der ökologischen Knappheit), 3.5 Jahre (EI95) und 1.2 Jahr (EI99) abgedeckt werden.

<sup>7</sup> Stromverbrauch 72 kWh/Jahr (Durchschnitt 1995-2000), 216 jährliche Servicekilometer pro Kopierer. Quelle: Canon Schweiz AG



Als ein Ziel des Recyclings gilt die Ressourcenschonung. Welchen Beitrag kann aber das Recycling von Elektronikprodukten an dieses Ziel leisten? Auch dies lässt sich am besten anhand einer kleinen Rechnung aufzeigen. In *Tabelle 5* sind die gesamten Metallflüsse<sup>8</sup> den Metallflüssen aus dem Recycling von Elektronikschrott gegenübergestellt. Die Zahlen beziehen sich auf die Situation in Europa. Recyclingverluste wurden vernachlässigt. Wie zu sehen ist, kann das Recycling von Elektronikprodukten einen nicht vernachlässigbaren Beitrag zu den gesamten Metallflüssen leisten. Vor diesem Hintergrund scheint die Regelung der Stoffströme von Elektronikprodukten gerechtfertigt.

*Tabelle 5: Vergleich der Metallflüsse im Elektronikschrott mit den gesamten Metallflüssen in Europa. Das jährliche Elektronikschrottaufkommen beträgt in Europa 6 Mio. t (Ogilvie, 1997)*

<b>Metall</b>	<b>Konzentration im Elektronikschrott</b>	<b>Metallfluss Elektronikschrott Mio. t pro Jahr</b>	<b>Metallfluss Total Mio. t pro Jahr</b>	<b>Anteil Elektronikschrott am Metallfluss</b>
Aluminium	5.00%	0.3	7	4.29%
Kupfer	5.00%	0.3	3.8	7.89%
Rohstahl	65.00%	3.9	155	2.52%

## 5.2 Ökonomische Beurteilung

Für das Recycling ergeben sich im Vergleich zur KVA um 50 % höhere Entsorgungskosten. Dies ist auf die hohen Personalkosten zurückzuführen. Bei der manuellen Zerlegung und Sortierung von Elektronikschrott fallen fast 50 % der Gesamtkosten des Elektronikrecyclings an. Sie sind annähernd dreimal so hoch wie der Wertstofftertrag. Verantwortlich dafür sind die ersten beiden Teilschritte des Recyclings, die manuelle Vorzerlegung und die mechanische Vorzerkleinerung. Die manuelle Vorzerlegung wird vor allem zur Entfernung der Tonermodule durchgeführt, um Staubemissionen bei der weiteren Verarbeitung zu vermeiden. Als zweiten Hauptkostenfaktor beim Elektronikrecycling lassen sich die Transportkosten ausmachen. Darin sind die Anlieferung und die firmeninternen Transporte enthalten. Die reinen Transportkosten sind noch etwas höher, da in den Wertstoffterlösen die Transportkosten miteingerechnet sind.

Im Gegensatz zur KVA machen die Abschreibungen und Gemeinkosten beim Recycling einen relativ geringen Teil aus. Die personalintensive Kostenstruktur des Elektronikrecyclings erklärt auch, warum viele Betriebe mit Arbeitslosenprojekten und Behindertenwerkstätten zusammenarbeiten. Die Recyclingkosten dürften in Zukunft eher noch zunehmen, da davon auszugehen ist, dass die Metallgehalte in elektronischen Produkten und somit der Wertstofftertrag abnehmen wird, und der Einsatz von billigen Arbeitskräften schwieriger wird (S.EN.S, 2000). Der Materialerlös kann die Kosten bei weitem nicht decken. Für das Recycling von Kopiergeräten besteht somit nur dann ein ökonomischer Anreiz, wenn gesetzliche Massnahmen eine Finanzierung garantieren können.

<sup>8</sup> <http://www.eurometaux.org>

## 5.3 Ausblick

In welchem Ausmass ein elektronisches Produkt während seines Lebenszyklus die Umwelt belasten wird, ist im wesentlichen schon durch die Produktentwicklung bestimmt. Dabei müssen neben ökologischen Gesichtspunkten auch Kosten, Aussehen, Sicherheit, Langlebigkeit, Unterhalt usw. berücksichtigt werden. Produktentwickler sehen sich daher oft widersprüchlichen Ansprüchen ausgesetzt. Mit dem Ziel eine bessere Umweltleistung in der Herstellung, Gebrauch und Entsorgung von Produkten zu erreichen, werden in der Industrie eine Reihe von verschiedenen DfX-Konzepten (Design für...) verfolgt, wobei X eine Variable für z.B. Recycling, Umwelt, Demontage, Sparsamkeit etc. sein kann (*Goldberg, 2000*). Nach *Dietrich et al. (2000)* sollte bei einer recyclinggerechten Produktentwicklung auf folgende Punkte geachtet werden:

- Ausbaufähigkeit (Schnittstellen etc.) ⇒ erhöht Produktlebensdauer
- Modulare Bauweise ⇒ erhöht Produktlebensdauer
- Zugänglichkeit der Komponenten ⇒ geringere Kosten bei Demontage
- Reduzierung der Materialvielfalt ⇒ besseres Materialrecycling
- Materialkennzeichnung ⇒ besseres Materialrecycling
- Materialverträglichkeit (PP-Kleber auf PP-Gehäuse) ⇒ besseres Materialrecycling
- Verzicht auf störende Stoffe ⇒ besseres Materialrecycling
- Verzicht auf Verbundmaterialien ⇒ besseres Materialrecycling

Je nach gewählter Recyclingstrategie bestehen unterschiedliche Anforderungen an die Produktentwicklung. Nur wenn die entsprechend gestalteten Produkte auch bestimmungsgemäss entsorgt werden, kann dieses Potenzial genutzt werden. Was bringt es, wenn ein Produkt, welches speziell für die Demontage optimiert wurde, nicht demontiert wird, sondern direkt im Shredder landet? Aus ökologischer Sicht ist das Ziel einer guten Produktentwicklung die Verbesserung der gesamten Umweltleistung, nicht nur das Optimieren einer bestimmten Kenngrösse. Hier gilt es möglichst gute Lösungen für den gesamten Produktlebenszyklus zu finden. Das ist nicht ganz einfach, da bei der ökologischen Produktentwicklung zwischen den einzelnen Designansätzen Zielkonflikte bestehen können:

- Miniaturisierung (geringerer Materialeinsatz) vs. Demontagefreundlichkeit
- Neuersatz vs. Langlebigkeit
- Recyclingfähigkeit vs. technische Anforderungen und Designaspekten

Wie gezeigt werden konnte, lassen sich durch das Recycling von Kopiergeräten im Vergleich zum Szenario Entsorgung und Primärproduktion ökologische Vorteile erzielen. Aus ökonomischer Sicht besteht dieser Vorteil nicht.

Dies stellt insofern ein Problem dar, da dadurch ein Anreiz entsteht Elektronikgeräte anderweitig zu entsorgen, wodurch das ökologische Potenzial verloren geht. Um dies zu vermeiden, sollte das Augenmerk auf die Reduktion der Recyclingkosten gerichtet werden. Insbesondere gilt es, die teure Handarbeit weiter durch maschinelle Trennverfahren zu ersetzen. Hier sind Recyclingunternehmen und Hersteller gleichermaßen gefordert. Für Hersteller ergeben sich z.B. Möglichkeiten durch:

- Verzicht auf den Einsatz von problematischen Komponenten
- Problematische Komponenten werden mit solchen physikalischen Eigenschaften "versehen", dass sie durch die in Recyclingbetrieben eingesetzten Trennverfahren vom restlichen Elektronikschrott abgesondert werden können

Da beim Materialrecycling Elektronikgeräte unterschiedlicher Art und von verschiedenen Herstellern miteinander verarbeitet werden, genügt es nicht, wenn nur einzelne Firmen obige Punkte bei der Produktentwicklung berücksichtigen. Verwendet z.B. ein Hersteller in seinen Produkten recyclingfähigen Kunststoff, so wird dieser mit den anderen Kunststoffen vermischt und verliert seine Recyclingfähigkeit. Um dies zu vermeiden ist es notwendig, bestimmte Standards zu setzen, auf welche sich die Recyclingunternehmen verlassen können. Dies kann auf gesetzlichem Weg oder mit der Schaffung einer Industrienorm geschehen.

Für die Recyclingunternehmer besteht die Herausforderung in der Entwicklung von neuen und der Verbesserung der bestehenden Trennverfahren. Eine optimale Lösung lässt sich allerdings nur dann erreichen, wenn neue Konzepte gemeinsam mit den Herstellern erarbeitet werden.

# Literaturverzeichnis

Aufgeführt sind nicht nur die in dieser Kurzfassung zitierten Quellen, sondern die gesamte für diese Arbeit herbeigezogene Literatur.

- Ahbe S., A. Braunschweig und R. Müller-Wenk.** 1990. *Methodik für Ökobilanzen auf der Basis der ökologischer Optimierung*. Schriftenreihe Nr. 133. Bern, Schweiz. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
- Bahadir, M., H. Parler und M. Speiteller (Hrsg.).** 1995. *Umweltlexikon*. Berlin : Springer.
- Bandt, O.** 1991. *Umweltprobleme des Stahlschrottrecyclings*. Werkstattreihe Nr. 72. Freiburg, Deutschland : Institut für angewandte Ökologie.
- Behrendt, S., R. Kreibich, S. Lundie, R. Pfitzner und M. Scharp.** 1998. *Ökobilanzierung komplexer Elektronikprodukte*. Berlin : Springer.
- Belz, F.** 1998. *Ökologische Innovationen in der Kreislaufwirtschaft: Leistungs- statt Produktverkauf*. IWÖ-Diskussionsbeitrag Nr. 62. St. Gallen, Schweiz : Institut für Wirtschaft und Ökologie, Universität.
- Berg, N.W. van den, C.E. Dutilh and G. Huppés.** 1995. *Beginning LCA: A guide into environmental Life Cycle Assessment*. Leiden, Netherlands : Centrum voor Milieukunde (CML).
- Berger, St. und M. Lehmann.** 1996. *Kostenstruktur schweizerischer Kehrlichtverbrennungsanlagen*. Umwelt-Materialien Nr. 52. Abfälle. Bern, Schweiz : Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
- BFS, BUWAL (Hrsg.).** 1997. *Umwelt in der Schweiz*. Bern, Schweiz : Bundesamt für Statistik, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
- BFS.** 1997. *Umweltstatistik Schweiz Nr. 6: Abfälle*. Bern, Schweiz : Bundesamt für Statistik.
- Bilitewski, B., G. Härdtle und K. Marek.** 2000. *Abfall-Wirtschaft: Handbuch für Praxis und Lehre. 3., neubearbeitete Auflage*. Berlin : Springer.
- Blum B. und J. Schmidt (Hrsg.).** 1996. *Schadstoffe in elektrischen und elektronischen Geräten : Emissionsquellen, Toxikologie, Entsorgung und Verwertung*. Berlin : Springer.
- Brandrup, J., M. Bittner, W. Michaeli und G. Menges (Hrsgb.).** 1995. *Die Wiederverwertung von Kunststoffen*. München; Wien : Hanser.
- BUWAL (Hrsg.).** 1996. *Oekoinventare für Verpackungen*.Schriftenreihe Nr. 250. Bern : Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
- BUWAL.** 1992. *Anorganische Zusammensetzung von Computer-Einzelteilen*. Bern, Schweiz : Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).

- Chambaz, D., Ch. Huter und Rytec AG.** 1998. *Die Rückstände der Verbrennung. Flugasche und Filterkuchen.* Umwelt-Materialien Nr. 100. Abfälle. Bern, Schweiz : Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
- Corsten, H. und M. Reiss.** 1991. Recycling in PPS-Systemen. *Die Betriebswirtschaft* Bd. 51, Nr. 5: 615-627
- Dietrich, K.-H., T. Dorn, M. Mörtl und S. Rath.** 2000. *Leitfaden zur recyclinggerechten Produktentwicklung.* Bonn, Deutschland : Bundesministerium für Bildung und Forschung.
- DKI (Hrsg.).** 1989. *Recycling von Kupferwerkstoffen.* DKI Informationsdruck. Düsseldorf, Deutschland : Deutsches Kupferinstitut.
- DKI (Hrsg.).** 1995. *Sachbilanz einer Ökobilanz der Kupfererzeugung- und Verarbeitung.* DKI Sonderdruck. Düsseldorf, Deutschland : Deutsches Kupferinstitut.
- DKI (Hrsg.).** 1995. *Sachbilanz einer Ökobilanz der Kupfererzeugung- und Verarbeitung.* DKI Sonderdruck. Düsseldorf, Deutschland : Deutsches Kupferinstitut.
- Dreyhaupt, F. J. (Hrsg.).** 1994. *VDI-Lexikon Umwelttechnik.* Düsseldorf, Deutschland : VDI-Verlag.
- Ernst, T., R. Popp and R. van Eldik.** 2000. Quantification of heavy metals for the recycling of waste plastics from electrical applications. *Talanta.* Vol. 53 : 347 -357
- Fahrni, H.-P. und P. Gerber.** 1999. *Handbuch Separatsammlungen von Abfällen: Stand, Handlungsbedarf und Szenarien.* Bern, Schweiz : Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
- Finnveden, G.** 2000. On the Limitations of Life Cycle Assessment and Environmental Systems Analysis Tools in General. *International Journal of LCA.* Vol. 5, No. 4 : 229 – 238
- Fleischer, G.** 1993. Der ökologische break-even-point für das Recycling. *Abfallwirtschafts Journal* Bd. 5, Nr. 5 : 209-215
- Fleischer, G. und W.-P. Schmidt.** 1996. Functional Unit for Systems Using Natural Raw Materials. *International Journal of Life Cycle Assessment.* Vol.1, No. 1 : 23-27
- Frischknecht, R.** 2001. *Ökobilanzen.* Vorlesungsunterlagen: Methoden der Bewertung von Umwelttechnik Teil 1, Studiengang Umweltnaturwissenschaften. Zürich : Eidgenössische Technische Hochschule.
- Gaballah I., J. Hager and R. Solozabal (Eds.).** 1999. *Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology.* Vol. 2. Warrendale, Pennsylvania : The Minerals, Metals and Materials Society.
- Georgescu-Roegen, N.** 1971. *The Entropy Law and the Economic Process.* Cambridge, MAS : Harvard University Press.

- Goedkoop, M.** 1995. *The Eco-indicator 95: Weighting method for environmental effects that damage ecosystems or human health on a European scale*. Amersfoort, Netherlands : PRé Consultants.
- Goedkoop, M. and R. Spriensma.** 2000. *The Eco-Indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment*. Methodology Report. Amersfoort, Netherlands : PRé Consultants.
- Goldberg, L. H. (Ed.).** 2000. *Green electronics/Green bottom line. environmentally responsible engineering*. Boston, MAS : Newnes.
- Hauschild, M., S. I. Olsen, Ch. Poll and F. Bro-Rasmussen (Eds.).** 2000. *Risk Assessment and Life Cycle Assessment: Environmental Strategies, Nordic Workshop, Vedbaek 1999*. Copenhagen : Nordic Council of Ministers.
- Heijungs, R. (Ed.).** 1992. *Environmental life cycle assessment of products. Guide*. Leiden, Netherlands : CML (Centrum voor Milieukunde).
- Heijungs, R. (Ed.).** 1992. *Environmental life cycle assessment of products. Backgrounds*. Leiden, Netherlands : CML (Centrum voor Milieukunde).
- Hertwich E. G., J.K. Hammitt and W.S. Pease.** 2000. A Theoretical Foundation for Life-Cycle Assessment. *Journal of Industrial Ecology*. Vol. 4, No. 1 : 13-28
- Holst, H.** 1994. *Aufkommen und Zusammensetzung von Elektro- und Elektronikgeräten*. Materialien Nr. 3. Essen, Deutschland : Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen.
- Kleineidam, U.** 2000. *Modelling and Control of Product Life-Cycles*. Eindhoven, Netherlands : Technische Universität.
- Koellner, W. und W. Fichtler.** 1996. *Recycling von Elektro- und Elektronikschrott*. Berlin : Springer.
- Kommission der Europäischen Gemeinschaften.** 2000. *Vorschlag für eine Richtlinie des europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronikgeräte 2000/0158 (COD)*. Brüssel : Kommission der Europäischen Gemeinschaften.
- Krone, K.** 2000. *Aluminiumrecycling : Vom Vorstoff zur fertigen Legierung*. Düsseldorf, Deutschland : Vereinigung Deutscher Schmelzhütten.
- Lechner, P. ( Hrsg.).** 1996. *Elektrogeräte-Stand der Technik. Sammlung, Demontage, Verwertung und Wege in die Zukunft*. Waste Reports No. 1. Wien : Universität für Bodenkultur.
- Lettemieke M., L.-G. Scheidt and A. Schneider.** 1999. Collecting Electronic Waste in Europe : A Sony View. *Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*. Piscataway NJ, Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) : 244-250
- Menad N., B. Björkman and E. G. Allain.** 1998. Combustion of plastics contained in electric and electronic scrap. *Ressources, Conservation and Recycling*. Vol. 24 : 66 – 85

- Monteil M. B., M. Tellenbach (Mitarb.) und B. Frey (Mitarb.).** 2000. *Wegleitung zur Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung von elektrischen und elektronischen Geräten (VREG)*. Bern : Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).
- Moyer, L.K. and S.M. Gupta.** 1996. Environmental Concerns and Recycling/Disassembly Efforts in the Electronic Industry. *Journal of Electronics Manufacturing*. Vol. 7, No.1: 1-22
- Ogilvie, S. M.** 1997. *Recovery of Waste from Electrical & Electronic Equipment: Economic & Environmental Impacts: A report produced for European Commission DG XI*. Abingdon, United Kingdom : AEA Technology.
- Perillieux, R.** 1990. Ziele und Module eines integrierten Technologie- und Innovationsmanagements. *Integriertes Technologie- und Innovationsmanagement : Konzepte zur Stärkung der Wettbewerbskraft von High-Tech- Unternehmen*. Berlin : Erich Schmidt Verlag.
- Pitz, T.** 1999. *Recycling aus produktionstheoretischer Sicht*. Wirtschaftswissenschaftliche Beiträge Bd. 173. Heidelberg, Deutschland : Physica-Verlag.
- PRé Consultants.** 1997. *SimaPro User Manual*. Amersfoort, Netherlands : PRé Consultants.
- Rausch, H.** 2000. *Panorama des Umweltrechts: Schriftenreihe Umwelt Nr. 226. 3. Auflage*. Bern, Schweiz : Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
- Sofres Conseil.** 1995. *Information system on plastics in the Electrics sector and wastes from Electric and Electronic equipment in Western Europe. A report for APME (Association of Plastics Manufacturers in Europe)*. Brussels : APME.
- Stubenvoll, J., B. Winter und H. Wiesenberger.** 1999. *Stand der Technik in der Sekundärkupfererzeugung im Hinblick auf die IPCC-Richtlinie*. Monographien Bd. 115. Wien : Umweltbundesamt
- Stutz, M.** 1997. *Geeignete ökologische Bewertung für Elektronikbauteile*. Zürich : Diplomarbeit Departement Umweltnaturwissenschaften, Eidgenössische Technische Hochschule.
- SWICO.** 2000. *Tätigkeitsbericht 2000 Kommission Umwelt*. Zürich : SWICO (Schweizerischer Wirtschaftsverband der Informations-, Kommunikations- und Organisationstechnik)
- Tartler, Ch.** 1994. *Analytisch-chemische Behandlung von elementreichen Verbundmaterialien und Möglichkeiten ihrer stofflichen Verwertung am Beispiel Elektronikschrott*. Erlangen-Nürnberg, Deutschland : Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität.
- Udo de Haes, H.A. (Ed.).** 1996. *Towards a Methodology for Life Cycle Impact Assessment*. Brussels : SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry).
- Union Minière.** 1999. *Environment Report 1999*. Brussels, Belgium : Union Minière s.a.

- Wackernagel, M. und W. Rees.** 1997. *Unser ökologischer Fussabdruck*. Basel, Schweiz : Birkhäuser.
- Weizsäcker, E.U., A. Lovins und H. Lovins.** 1995. *Faktor Vier. Doppelter Wohlstand, halbierter Naturverbrauch*. München : Droemer.
- Werner, F. und K. Richter.** 1998. *Ökobilanz eines Aluminiumfensters nach Massgabe gegebener Recycling-Stoffströme*. Eine Ergänzung zur EMPA/SZFF-Fensterstudie. Dübendorf, Schweiz : Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt.
- Wernick K. and J. Themelis.** 1998. Recycling Metals for the Environment. *Annual Review of Energy and the Environment*. Vol. 23 : 465-97
- White, P. R., M. Franke and P. Hindle.** 1995. *Integrated Solid Waste Management: A Lifecycle Inventory*. Glasgow, United Kingdom : Chapman and Hall.
- Zimmermann, P., D. Gabor, F. Huber, A. Labhardt und M. Ménard.** 1996. *Ökoinventare von Entsorgungsprozessen: Grundlagen zur Integration der Entsorgung in Ökobilanzen*. Zürich : ESU-Reihe Nr.1/96, Institut für Energietechnik, Eidgenössische Technische Hochschule.
- Zindel, H.** 1993. *Entsorgung von Abfällen aus Kopiersystemen mit halbleitenden Schichten*. Schriftenreihe Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz Nr. 134. Wiesbaden, Deutschland : Hessische Landesanstalt für Umwelt.