

CustomLCA

Ökobilanz Stiftung SENS

**Ökologischer Nutzen des Elektrogeräte-Recyclings durch die SENS über
25 Jahre**

Auftraggeber

Stiftung SENS, Frau Heidi Luck, Obstgartenstrasse 28, 8006 Zürich

Verfasser

Thomas Kägi & Emil Franov, Carbotech AG

Anzahl Seiten: 50

Basel, 16. Juni 2016

Impressum

Titel

Ökobilanz Stiftung SENS

Auftraggeber

Stiftung SENS,
Frau Heidi Luck,
Obstgartenstrasse 28,
8006 Zürich

Auftragnehmer

Carbotech AG, Basel

Autoren

Thomas Kägi, Emil Franov

Projektleitung/ Kontakt

Emil Franov
+41 61 206 95 32
e.franov@carbotech.ch

Hinweis

Für den Inhalt ist ausschliesslich der Auftragnehmer verantwortlich.

Version

1.04 (Ökobilanz Stiftung SENS v1.04)

Datum

16. Juni 2016

—

Dieser Bericht wurde von der Carbotech AG mit Sorgfalt erarbeitet unter Verwendung aller uns zur Verfügung stehenden, aktuellen und angemessenen Hilfsmittel und Grundlagen, dies im Rahmen der vertraglichen Abmachung mit dem Auftraggeber unter Berücksichtigung der Vereinbarung bezüglich eingesetzter Ressourcen. Die Grundlagen der Bewertungsmethode, auf welcher dieser Bericht basiert, können ändern. Danach sind die Schlussfolgerungen nicht mehr uneingeschränkt gültig und vom Auftraggeber nur noch auf eigene Verantwortung verwendbar. Aus dem Inhalt dieses Berichtes hervorgehende Veröffentlichungen, welche Resultate und Schlussfolgerungen daraus nur teilweise und nicht im Sinne des Gesamtberichtes darstellen, sind nicht erlaubt. Insbesondere dürfen solche Veröffentlichungen diesen Bericht nicht als Quelle angeben oder es darf nicht anderweitig eine Verbindung mit diesem Bericht oder der Carbotech AG hergestellt werden können. Für Forderungen ausserhalb des oben genannten Rahmens lehnen wir jegliche Verantwortung gegenüber dem Auftraggeber sowie Dritten ab. Dieser Bericht ist ausschliesslich für den Auftraggeber erstellt worden und wir übernehmen keine Verantwortung gegenüber Dritten, welche Kenntnis erlangen über diesen Bericht oder Teile davon.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
1 Ausgangslage und Zielsetzung	7
1.1 Einleitung	7
1.2 Zielsetzung	7
2 Vorgehen und Methodik	9
2.1 Allgemeine Beschreibung der Ökobilanzierung	9
2.2 Vorgehen bei der Ökobilanzierung	9
2.3 Zielsetzung und Rahmenbedingungen	10
2.3.1 Zielsetzung	11
2.3.2 Funktionelle Einheit (Vergleichsgrösse)	11
2.3.3 Anwendung und Zielgruppe der Studie	11
2.3.4 Betrachtete Verwertungsszenarien	11
2.3.5 Systemgrenzen	12
2.4 Methodvalidierung und Potenzialanalyse	14
2.4.1 Sensitivitätsanalyse: Datenunsicherheit	15
2.4.2 Second Opinion Analyse: Bewertungsmethode	15
2.4.3 Potenzialanalyse: Zusätzliches Recycling von Elektronikmetallen	15
2.5 Sachbilanz	16
2.5.1 Modellierung des Produktsystems	16
2.5.2 Annahmen und Berechnungsgrundlagen	16
2.6 Wirkbilanz	17
2.7 Bewertung der Umweltbelastungen	17
3 Datengrundlagen	19
3.1 Verarbeitete Mengen an Geräten und Energiebedarf Recyclingbetriebe	19
3.2 Erzeugte Fraktionen	20
3.2.1 Fraktionen pro Gerätekategorie	20
3.3 Relevante Schadstoffe	21
3.3.1 Kälte- und Treibmittel	21
3.3.2 PCB	21
3.3.3 Bromierte Flammschutzmittel	23
3.3.4 Weitere Schadstoffe	25
3.4 Potenzielle Rückgewinnung von Elektronikmetallen	26
4 Resultate und Diskussion	27
4.1 Stoffflüsse	27
4.1.1 Mengen an separierten Wertstoffen und Schadstoffen	27
4.2 Umweltnutzen	30
4.2.1 Umweltnutzen über 25 Jahre SENS	30
4.2.2 Umweltnutzen pro Jahr	33
4.2.3 Relativer Umweltnutzen pro Tonne Gerät	34
4.3 Klimanutzen	35
4.3.1 Klimanutzen über 25 Jahre SENS	35

4.3.2 Klimanutzen pro Jahr	38
4.3.3 Relativer Klimanutzen pro Tonne Gerät	39
4.4 Methodenvalidierung	40
4.4.1 Sensitivitätsanalyse Datenunsicherheit	40
4.4.2 Second Opinion Analyse: Bewertungsmethode	41
4.5 Potenzialanalyse: Elektronikmetalle	41
5 Schlussfolgerungen	43
6 Literatur	45

Anhang

A1 Resultate UBP in Tabellenform

A2 Resultate CO₂-Äq in Tabellenform

A3 Jährliche Menge Wertstoffe

A4 Jährliche Mengen Schadstoffe

Zusammenfassung

Der Umweltnutzen von 25 Jahren Elektrogeräte-Recycling durch die SENS und ihre Partner (Konsumenten, Hersteller/Importeure, Handel, Leistungspartner (Sammelstellen, Transporteure, Recycler), Behörden) wurde mittels einer Ökobilanz ermittelt. Nebst der Ermittlung des Umweltnutzens als Hauptziel sollen ergänzend auch der Klimanutzen und die Mengen der wichtigsten zurückgewonnen Materialien quantifiziert werden.

Für die Quantifizierung der Nutzen für Umwelt und Klima soll die Leistung der SENS über 25 Jahre mit einem Szenario „ohne SENS“ verglichen werden. Als funktionelle Einheit wurde die Entsorgung der Menge von Kühl-, Gefrier-, Klimageräten, Elektrogross- und Elektrokleingeräten sowie Leuchtmittel gewählt, welche von 1990 bis 2015 über die Stiftung SENS gesammelt wurden.

Das SENS Recyclingsystem beinhaltet die Sammlung, Sortierung, Zerlegung der Geräte sowie die fachgerechte Entsorgung von Schadstoffen wie FCKW oder PCB. Für das Szenario „ohne SENS“ wurde ein möglichst realistisches Szenario definiert, auch angelehnt an die Szenarien in der Ecodom Studie über den Klimanutzen des Elektrogeräte-Recyclings in Italien. Als Grundannahme würden beim Szenario „ohne SENS“ gleich viele Geräte von den Konsumenten zum Rezyklieren retourniert wie mit dem System SENS. Weiter nehmen wir an, dass die eine Hälfte der Elektrogeräte von spezialisierten Fachbetrieben verwertet würde, jedoch – aufgrund fehlender externer Kontrollen – mit tieferen Rückgewinnungsraten für Schadstoffe. Die andere Hälfte würde ökonomisch optimiert wirtschaften und möglichst effizient in unspezifischen Anlagen nur die wichtigsten Wertstoffe rezyklieren, ohne Beachtung von speziellen Umweltauflagen. Der Umweltnutzen des SENS-Systems wurde aus der Differenz der Iststandsanalyse „SENS“ und dem Basisszenario „ohne SENS“ berechnet.

Die Datengrundlagen zu den verarbeiteten Gerätemengen, den erzeugten Wertstofffraktionen und den entfernten und fachgerecht entsorgten Schadstoffen stammen grösstenteils aus den jährlichen SENS-Statistiken. Für die Schadstoffe PCB und bromierte Flammschutzmittel (BFS) sind nur ältere jahresspezifische Daten vorhanden (aus 2006 resp. 2003), weshalb der Verlauf des Gehaltes dieser Schadstoffe in den Geräten für die Folgejahre extrapoliert werden musste.

Insgesamt beläuft sich der Umweltnutzen von 25 Jahren SENS Elektrogeräte-Recycling auf 155'000 Mia. vermiedene Umweltbelastungspunkte. Fast der ganze Nutzen (98.4 %) wird durch die Verhinderung von Schadstoffemissionen generiert, mit PCB als wichtigstem Schadstoff (89.4 %), gefolgt von FCKW R11 (5.5 %), bromierten Flammschutzmitteln (2.1 %) und FCKW R12 (1.0 %). Das PCB stammt hauptsächlich aus den Kondensatoren von Elektrokleingeräten (insbesondere den Vorschaltgeräten von Leuchten) und Elektrogrossgeräten.

Der Klimanutzen von 25 Jahren SENS Elektrogeräte-Recycling beträgt 7.1 Mio. Tonnen CO₂-Äq. Der grosse Teil des Nutzens stammt dabei von der korrekten Entsorgung von FCKW R11 (66.7 %) und FCKW R12 (26.4 %). Diese Treibhausgase sind hauptsächlich in den verschiedenen Kühlgeräten wie Kühlschränken, Gefriertruhen und Klimageräten zu finden.

Über die betrachtete Zeitspanne wurden einerseits gut 650'000 Tonnen Wertstoffe verwertet, andererseits rund 3'900 Tonnen Schadstoffe kontrolliert entsorgt. Anteilsmässig die wichtigsten Wertstoffe sind Eisen (70.0 %), Stahl (10.9 %) und Kunststoffe (8.5 %). Wesentlich weniger relevant sind die gesammelten Mengen an Kupfer (4.2 %), Aluminium (2.6 %), Zink (2.5 %) und Glas (1.2 %). Von den restlichen Wertstoffen

fallen nur sehr geringe Mengen an (weniger als 0.1 %). Anteilsmässig die wichtigsten Schadstoffe FCKW R11 (33.8 %) und Öl (32.5 %). Wesentlich tiefer liegen die gesammelten Mengen an bromierten Flamm- schutzmitteln (14 %), FCKW R12 (6.1 %), Cyclopentan (6.0 %) und R600a (5.2 %). Von den restlichen Schadstoffen fallen nur geringe Mengen an (weniger als 2.1 %).

Die vorliegende Ökobilanzstudie zeigt, dass die Stiftung SENS im Zusammenspiel mit Konsumenten, Her- steller/Importeuren, Handel, Leistungspartnern (Sammelstellen, Transporteure, Recycler) und Behörden während 25 Jahren Einsatz einen sehr hohen Umweltnutzen generiert hat. Durch die umweltfreundliche Entsorgung von Elektrogeräten wurde die jährliche Umweltbelastung der Schweiz um durchschnittlich etwa 4 % gesenkt, ein sehr beachtlicher Wert für eine einzelne Massnahme.

Trotz der Tatsache, dass heute immer weniger PCB-haltige Kondensatoren in den Elektroaltgeräten zu fin- den sind, hat dieser Schadstoff gemäss unseren Berechnungen immer noch das höchste Umweltschadenpo- tential. Insbesondere die Kondensatoren in den Vorschaltgeräten von Leuchten, aber auch solche in Haus- haltgrossgeräten müssen weiterhin mit grösster Sorgfalt entfernt und fachgerecht entsorgt werden. Für eine genauere Abschätzung des aktuellen Umweltnutzens wäre ein Update der Studie über PCB-Gehalte in Kon- densatoren aus dem Jahr 2007 sehr hilfreich, wobei empfohlen wird, gleichzeitig auch PCB-Ersatzstoffe auf ihr Umweltbelastungspotenzial hin zu untersuchen.

Die Vermeidung von Emissionen von Schadstoffen wie FCKW, BFS und Quecksilber durch ihre kontrollierte fachgerechte Entsorgung wird anteilmässig immer wichtiger, weil diese Schadstoffe später als PCB verbo- ten wurden und ihr Gehalt in den Geräten somit weit weniger schnell abnehmen wird.

Der Beitrag an den Umweltnutzen durch das Recycling von Wertstoffen wie Eisen, Kupfer, Aluminium etc. ist aufgrund der Dominanz der Schadstoffe noch sehr tief, steigt aber stetig an, insbesondere da immer we- niger PCB in den Geräten vorhanden ist. Trotzdem ist das Recycling solcher Wertstoffe aus Umweltsicht sinnvoll, da der ökologische Nutzen (Ressourcenschonung, etc.) für das Recycling meist viel grösser ist als der Aufwand für die Aufbereitung (Energieverbrauch, etc.). Eine Potentialabschätzung für das zukünftige Recycling von in Spuren vorhandenen Elektronikmetallen hat des Weiteren ergeben, dass der dadurch ge- nerierte Umweltnutzen marginal ist, sogar wenn angenommen wird, dass die Elektrometall-Gehalte in Lei- terplatten von Elektrogeräten gleich hoch wären wie in Computerleiterplatten.

1 Ausgangslage und Zielsetzung

1.1 Einleitung

Bevor die Stiftung SENS¹ 1990 gegründet wurde und ihre Tätigkeit aufnahm, wurden kleine Elektroaltgeräte (EAG) meist mit dem Hausmüll entsorgt. Metallreiche Grossgeräte wie Waschmaschinen wurden teilweise über Betriebe entsorgt, die auf Metallrecycling spezialisiert waren. Keine Beachtung wurde jedoch den in den Geräten verbauten Schadstoffen gewidmet. Erst internationale Einigungen wie der Beschluss über das mittelfristige Verbot ozonabbauender Stoffe (Montrealer Protokoll, 1988 in der Schweiz in Kraft gesetzt) lenkten den Fokus auf die Schadstoffe in Elektroaltgeräten. Mit dem Ziel, die in den Kühlgeräten enthaltenen ozonabbauenden Stoffe umweltgerecht zu entsorgen, richtete die SENS folglich als Erste ein auf freiwilliger Basis beruhendes Sammel- und Entsorgungssystem ein. Mit dem Inkrafttreten der Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (VREG) im Jahr 1998 wurde das SENS-System auf Elektrokleingeräte (Küchen-, Garten-, Hobbygeräte, Spielwaren etc.) und Elektrogrossgeräte (Waschmaschinen, Backöfen etc.) ausgeweitet. In der Revision 2005 wurden schliesslich auch Leuchten und Leuchtmittel integriert. Für die Entsorgung von Elektronikgeräten existiert ein separates System (von Swico²). Die VREG schreibt den Händlern die kostenlose Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung vor, wobei insbesondere die problematischen Stoffe fachgerecht entsorgt werden müssen. Die Stiftung SENS bietet diese Dienstleistung an.

Damit EAG tatsächlich umweltgerecht entsorgt werden, sind für die SENS neben den Herstellern/Importeuren von Elektrogeräten als Auftraggeber weitere wichtige Partner beteiligt: zum einen die Konsumenten, welche die EAG an den dafür eingerichteten Sammelstellen zurückgeben und zum anderen die Fachfirmen, welche nach strengen Qualitätsvorgaben aus den EAG die Schadstoffe von den Wertstoffen separieren und entsorgen respektive recyceln.

1.2 Zielsetzung

Für das 25-Jahr-Jubiläum möchte SENS durch eine Ökobilanz den Umweltnutzen über die 25 Jahre ermitteln lassen, welcher zusammen mit Konsumenten, Hersteller/Importeuren, Handel, Leistungspartnern (Sammelstellen, Transporteure, Recycler) und Behörden realisiert wurde. Die detaillierten Zielsetzungen dieser Studie sind die folgenden:

1. Es soll der Umweltnutzen des Recyclings von Elektrogeräten über 25 Jahre durch die SENS und ihre Partner ermittelt werden mittels der Methode der Ökobilanzierung.
2. Nebst der Ermittlung des Umweltnutzens sollen auch die vermiedenen Treibhausgas-Emissionen (Klimanutzen) und die Mengen der wichtigsten zurückgewonnenen Materialien quantifiziert werden.

Für die Quantifizierung des Umweltnutzens und des Klimanutzens soll die Leistung der SENS über 25 Jahre mit einem Szenario „ohne SENS“ verglichen werden.

¹ Zuerst als Stiftung Entsorgung Schweiz (S.EN.S.)

² Abkürzung für Schweizerischer Wirtschaftsverband der Informations-, Kommunikations- und Organisationstechnik

2 Vorgehen und Methodik

Heute besteht Konsens, dass die Lebenszyklusanalyse oder Ökobilanz die umfassendste und aussagekräftigste Methode ist, um die Umweltauswirkungen von Produkten und Systemen zu beurteilen. Daher wird diese Methode verwendet, um die Umweltauswirkungen der betrachteten Leistungen zu eruieren.

In diesem Kapitel werden die verwendete Methode, das Vorgehen sowie die verwendeten Daten und die getroffenen Annahmen beschrieben.

2.1 Allgemeine Beschreibung der Ökobilanzierung

Die Ökobilanzierung ("Life Cycle Assessment", LCA) ist eine Methode, um die Auswirkungen menschlicher Tätigkeiten auf die Umwelt zu erfassen, zu beurteilen und daraus Optimierungspotenziale abzuleiten. Aufgrund der Komplexität der Natur und des globalen Wirtschaftssystems reicht es nicht, nur einzelne Problemstoffe oder lokale Auswirkungen zu betrachten. Aus dem Anspruch an eine umfassende Bewertung ergeben sich die folgenden Anforderungen an die Methode:

- Möglichst umfassende Berücksichtigung der verschiedenen Umweltauswirkungen
- Berücksichtigung des gesamten Lebensweges
- Quantifizierung der Umweltauswirkungen
- Bewertung der verschiedenen Auswirkungen als Basis für Entscheidungen
- Wissenschaftlich abgestützt, um eine hohe Zuverlässigkeit und Akzeptanz zu erreichen

Die Ökobilanzierung ist diejenige Methode, welche heute diese Anforderungen am besten erfüllt. Die Ergebnisse der Ökobilanz können eingesetzt werden:

- als Entscheidungshilfe, z.B. bei der Auswahl von Produkten
- zur Erfassung der relevanten Auswirkungen
- in der strategischen Planung zur Ermittlung von Optimierungspotenzialen
- zur Ermittlung der wesentlichen Einflussfaktoren
- zur Beurteilung von Massnahmen
- zur Ableitung von Handlungsempfehlungen

2.2 Vorgehen bei der Ökobilanzierung

Nachdem die Fragestellung und die zu untersuchenden Systeme definiert sind, werden die Waren-, Stoff- und Energieflüsse sowie der Ressourcenbedarf erfasst. Anschliessend werden die Auswirkungen auf die Umwelt mit Hilfe von gewählten Indikatoren, welche diese Wirkungen beschreiben, bestimmt. Mit dem Ziel, die Ergebnisse mit einer Kennzahl auszudrücken und damit die Auswertung zu ermöglichen oder zumindest zu erleichtern, kann eine Bewertung der verschiedenen Umweltauswirkungen durch eine entsprechende Gewichtung erfolgen.

Nach ISO 14'040/44 (ISO 14'040, 2006; ISO 14'044, 2006) umfasst eine Ökobilanz die folgenden Schritte:

- Festlegen der Zielsetzungen und Systemgrenzen (Rahmenbedingungen)
- Erfassen der relevanten Stoff- und Energieströme sowie des Ressourcenbedarfs (Sachbilanz)
- Bestimmen der Auswirkungen auf die Umwelt (Wirkbilanz)
- Interpretation der Umweltauswirkungen aufgrund der Zielsetzungen (Bewertung)
- Erarbeiten von Massnahmen (Optimierung)

Wie Abbildung 1 zeigt, ist dies kein linearer Prozess, sondern ein interaktiver Erkenntnis- und Optimierungsprozess.

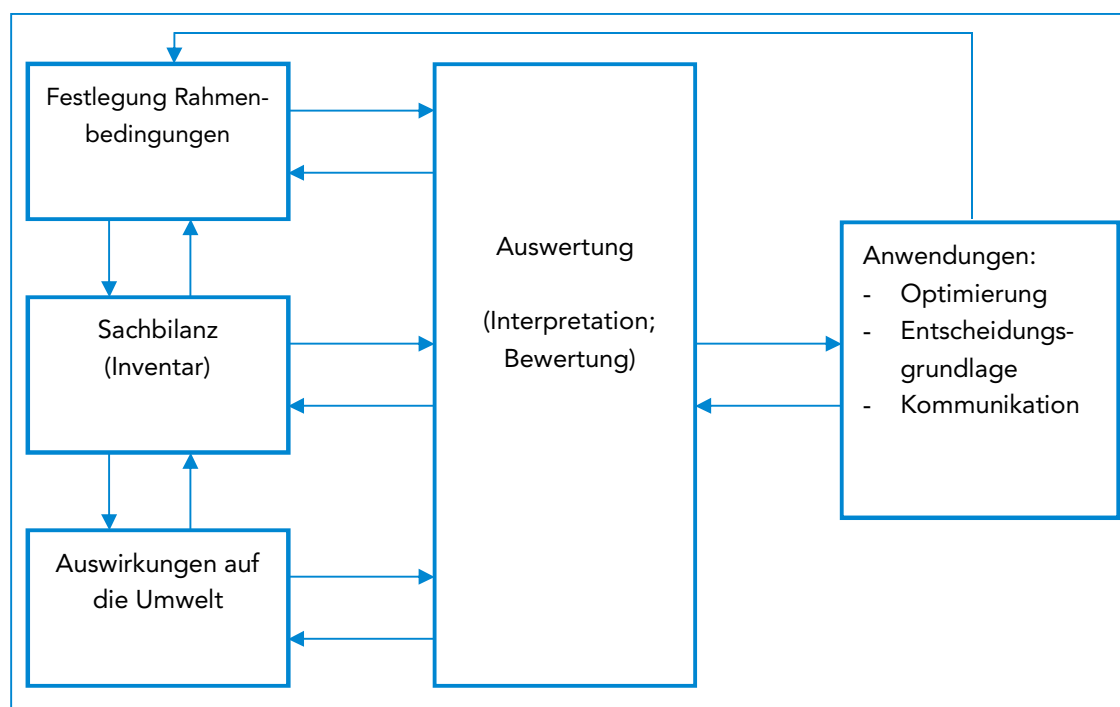


Abbildung 1: Schritte einer Ökobilanz nach ISO 14'040/44

Die vorliegende Studie richtet sich weitgehend nach der Norm ISO 14'040; das Vorgehen entspricht in den wesentlichen Aspekten deren Anforderungen. In gewissen Punkten, wie der Verwendung von gesamt aggregierenden Methoden, geht die vorliegende Studie jedoch über die Norm hinaus.

2.3 Zielsetzung und Rahmenbedingungen

Die Definition der zu untersuchenden und vergleichenden Systeme hängt von der Zielsetzung bzw. Fragestellung ab. Daraus ergeben sich unterschiedliche Rahmenbedingungen und Systemgrenzen. Die Systemgrenzen definieren, welche Prozesse und vorgelagerten Prozesse berücksichtigt werden. Dabei müssen der zeitliche und geographische Rahmen der verwendeten Daten sowie die zu untersuchenden Umweltauswirkungen festgelegt werden.

2.3.1 Zielsetzung

Wie in Kapitel 1 schon dargelegt, verfolgt diese Studie folgende Ziele:

1. Es soll der Umweltnutzen des Recyclings von Elektrogeräten über 25 Jahre durch die SENS und ihre Partner ermittelt werden mittels der Methode der Ökobilanzierung.
2. Nebst der Ermittlung des Umweltnutzens soll auch die vermiedenen Treibhausgas-Emissionen (Klimanutzen) und die Mengen der wichtigsten zurückgewonnen Materialien quantifiziert werden.

Für die Quantifizierung des Umweltnutzens und des Klimanutzens soll die Leistung der SENS über 25 Jahre mit einem Szenario „ohne SENS“ verglichen werden.

2.3.2 Funktionelle Einheit (Vergleichsgrösse)

Vergleicht man ein Produkt oder eine Dienstleistung mit Alternativen, müssen diese denselben Nutzen erbringen bzw. dieselbe Funktion erfüllen. Die Grösse, auf welche sich der Vergleich bezieht, wird als funktionelle Einheit bezeichnet.

In dieser Untersuchung wurde als funktionelle Einheit die Entsorgung der Menge von Kühl-, Gefrier-, Klimageräten, Elektrogross- und Elektrokleingeräten sowie Leuchtmittel gewählt, welche von 1990 bis 2015 über die Stiftung SENS gesammelt wurden.

2.3.3 Anwendung und Zielgruppe der Studie

Die Studie richtet sich primär an den Auftraggeber. Die Erkenntnisse aus der vorliegenden Studie sollen zudem einen sachorientierten Dialog über den ökologischen Nutzen des Elektrogeräte-Recyclings durch die SENS fördern. Eine weitere Zielgruppe ist daher auch die interessierte Öffentlichkeit.

2.3.4 Betrachtete Verwertungsszenarien

Der Umweltnutzen des SENS-Systems wurde aus der Differenz zwischen der Iststandsanalyse „SENS“ und dem Szenario „ohne SENS“ berechnet. D. h. das Szenario „ohne SENS“ wurde als Basis (Referenzszenario) verwendet. Die Umwelleistung des SENS-Systems besteht somit aus dem über das Referenzszenario hinausgehenden Umweltnutzen.

Iststandsanalyse „SENS“

Das SENS Recyclingsystem beinhaltet die Sammlung, Sortierung, Zerlegung der Geräte sowie die fachgerechte Entsorgung von Schadstoffen wie FCKW oder PCB. Der Nutzen bei der Schadstoffvermeidung ergibt sich somit aus der Differenz zwischen dem Aufwand der Schadstoffentsorgung und den vermiedenen Schadstoffemissionen in die Umwelt. Weiter wurde der Nutzen des stofflichen Recyclings berücksichtigt als Differenz zwischen dem Aufwand der Wiederaufbereitung der Wertstoffe zu Sekundärmaterial und der damit einhergehenden Ressourcenschonung durch den Ersatz von Primärmaterial.

Szenario „ohne SENS“

Für das Szenario „ohne SENS“ sind verschiedene Varianten denkbar: Von „es wird gar nichts recycelt und alles auf offenen Deponien gelagert oder verbrannt“ bis „Umgang mit Elektrogeräteentsorgung unter Einhaltung bestehender CH-Gesetze“. Für diese Studie wurde als Mittelweg ein möglichst realistisches „ohne SENS“ Szenario definiert, auch angelehnt an die Szenarien in der Ecodom Studie über den Klimanutzen des Elektrogeräte-Recyclings in Italien (ECODOM, 2008). Dabei gehen wir von folgenden Annahmen aus:

- Es werden gleich viele Geräte von den Konsumenten zum Rezyklieren zurückgegeben wie mit SENS.

- Die eine Hälfte der Elektrogeräte wird ökonomisch optimiert ohne Beachtung von speziellen Umweltauflagen in unspezifischen Anlagen "verwertet", die andere Hälfte wird von spezialisierten Fachbetrieben verwertet, jedoch – aufgrund fehlender externer Kontrollen – mit tieferer Rückgewinnungsrate bei Schadstoffen.
- Für alle gesammelten Geräte gilt: Bei der ökonomischer Optimierung wird zur Hälfte Eisen/Stahl rückgewonnen mit vollständiger Entweichung der Kältemittel, Treibmittel und Quecksilber. Sämtliche anderen Materialien werden entsorgt.
- Bei der anderen Hälfte werden alle Materialien zurückgewonnen wie unter SENS - 50 % der Kältemittel, Treibmittel und Quecksilber entweichen in die Umwelt.
- Hinsichtlich PCB wurden folgende Annahmen getroffen gestützt auf Messungen des PCB-Gehaltes von verschiedenen Fraktionen der Sortier- und Zerlegeprozesse (Morf & Taverna, 2004):
 - 85 % der PCB-Inputs befinden sich nach der Zerlegung im RESH³, welcher in einer KVA entsorgt wird. 15 % befinden sich in Wertstoffen: Über kurz oder lang ist damit zu rechnen, dass dieser PCB-Anteil direkt in die Umwelt gelangt, sei dies bei der Aufbereitung zu Sekundärmaterialien oder während der Nutzungsphase. Vom PCB-Anteil, welcher in eine KVA gelangt, wurde aufgrund fehlender Daten angenommen, dass 90 % vernichtet werden und 10 % in die Umwelt gelangen.
 - Insgesamt gelangen somit 24 % des PCB-Inputs in die Umwelt.
- Hinsichtlich der bromierten Flammenschutzmittel (BFS) wurden folgende Annahmen getroffen, gestützt auf Morf u. a. (2002):
 - Eine Hälfte der BFS-haltigen Kunststoffe wird aufgrund der angenommenen ökonomischen Optimierung nicht recycelt und landet direkt in der KVA, in der die BFS praktisch vollständig zerstört werden (Transferkoeffizienten siehe Tabelle 1).
 - Die andere Hälfte der BFS-haltigen Kunststoffe wird (im Ausland) recycelt. Dabei wird davon ausgegangen, dass diese Kunststoffe während ihrer Nutzungsphase BFS emittieren sowie durch Abrieb BFS in die Umwelt gelangen und irgendwann einmal je zur Hälfte in einer KVA oder einer Deponie landen, in der die BFS teilweise ins Wasser ausgewaschen werden (Transferkoeffizienten siehe Tabelle 1).
 - Somit gelangen 1.02 Promille des OctaBDPE, 0.94 Promille des DecaBDPE sowie 1.50 Promille des TBBPA zusätzlich in die Umwelt im Vergleich zur Iststandsanalyse „SENS“.

Tabelle 1: BFS-Transferkoeffizienten für das Szenario „nicht SENS“

Kompartiment	Recycling: Abrieb/Staub während Nutzung	Recycling: Ausdünstung während Nutzung	Deponie	KVA	Total
Anteil an „nicht SENS“ Szenario	50 %	50 %	25 %	75 %	
OctaBDPE	1.00E-03	5.40E-04	9.86E-04	3.30E-10	1.02E-03
DecaBDPE	1.00E-03	3.80E-04	1.00E-03	3.30E-10	9.40E-04
TBBPA	1.00E-03	5.00E-04	3.00E-03	1.00E-06	1.50E-03
Quelle	Eigene Schätzung	(Morf u. a., 2002)	(Morf u. a., 2002)	(Morf u. a., 2002)	berechnet

2.3.5 Systemgrenzen

Die Ökobilanz betrachtet die ökologischen Auswirkungen und Einsparungen „von der Wiege bis zur Bahre“, also von der Extraktion der Rohstoffe über deren Verarbeitung bis zur finalen Entsorgung. Entsprechend des Ökobilanzansatzes werden soweit möglich alle umweltrelevanten Prozesse über den gesamten Lebens-

³ Reststoffe Schredder (brennbare Abfälle)

weg erfasst und bewertet. Je nach Fragestellung kann es sinnvoll sein, das System zu vereinfachen, indem etwa bei einer Differenzbetrachtung identische Teile nicht bilanziert werden.

Inhaltliche Systemgrenze

In das System der Ökobilanz eingeschlossen sind alle als relevant betrachteten Stoff- und Energieflüsse des Elektrogeräte-Recyclings ab dem Zeitpunkt, wo die Geräte von den Konsumenten entsorgt werden.

Die vorliegende Studie umfasst im Wesentlichen die folgenden Prozesse und Dienstleistungen (siehe auch Abbildung 2):

- Sammeltransporte der Geräte
- Sortierung und Zerlegung der Geräte
- Recycling der Wertstoffe und damit einhergehende Einsparung von Primärmaterialherstellung
- Entsorgung der Schadstoffe
- Bereitstellung der Energieträger wie Erdöl, Erdgas, Kohle oder Strom etc. für die involvierten Prozesse
- Für alle diese Prozesse werden die Auswirkungen durch Emissionen in Boden, Luft und Wasser sowie der Ressourcenbedarf, wie energetische Ressourcen oder Landnutzung, berücksichtigt.

Aufgrund der spezifischen Fragestellung (Verbesserung im Vergleich zu einem Referenzszenario) werden die Lebenswegabschnitte, welche im Rahmen dieser Studie keinen Einfluss auf das Elektrogeräte-Recycling haben und deshalb bei allen Szenarien gleich sind, nicht berücksichtigt:

- Herstellung der Elektrogeräte
- Nutzung und Unterhalt der Elektrogeräte

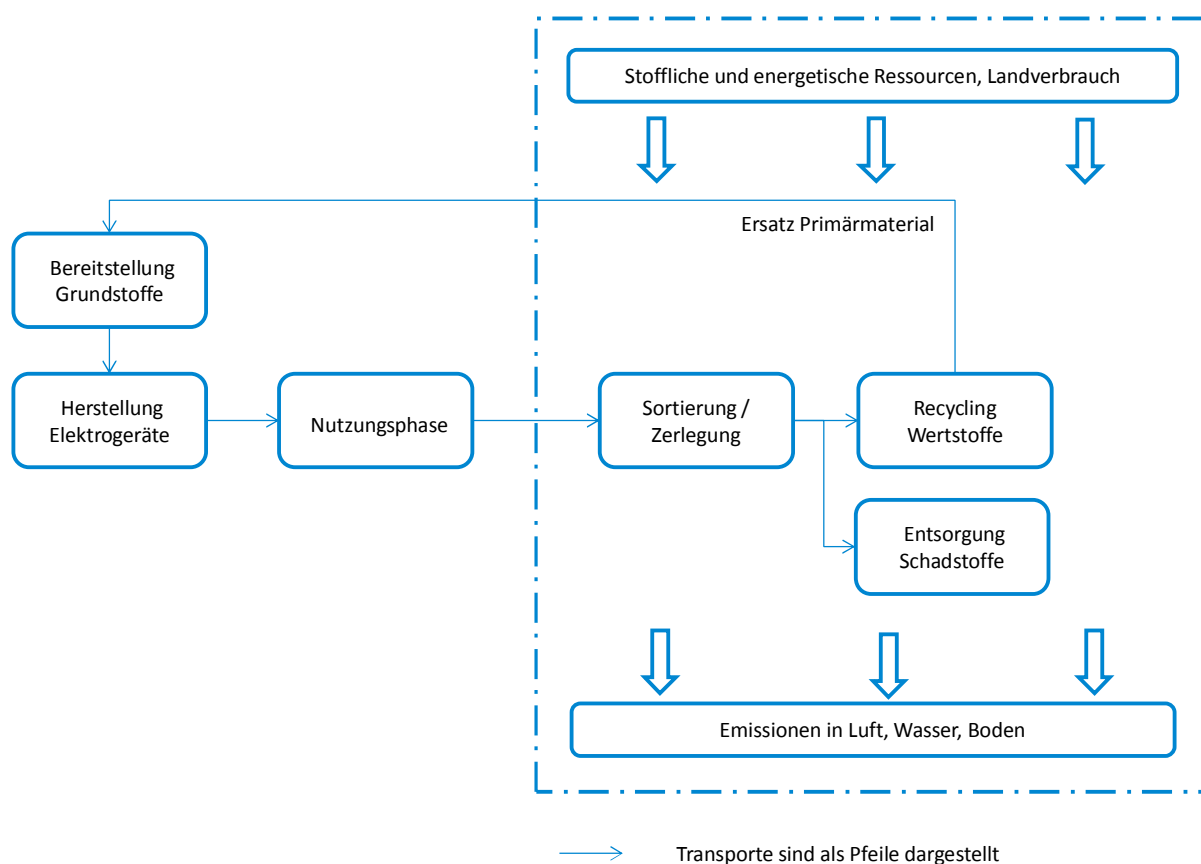


Abbildung 2: Schematische Darstellung der berücksichtigten Prozesse

Zeitliche Systemgrenze

Die Daten über die gesammelten und rezyklierten Mengen beziehen sich auf 25 Jahre. Für sämtliche Hintergrunddaten und Ökoinventare wurde die Ökoinventardatenbank ecoinvent v3.1 (ecoinvent, 2015) verwendet. Zeitliche Veränderungen der Inventare (ecoinvent v1.0 bis ecoinvent v3.1) wurden nicht berücksichtigt, da die Resultate von den direkten Emissionen dominiert werden und somit die involvierten Ökoinventare wenig relevant sind. Auch die zeitliche Veränderungen der Bewertungsmethode (Ökologische Knappheit 1997, 2006, 2013) wurden nicht berücksichtigt: Einerseits hätte für die Emission PCB, welche den grössten Anteil am Resultat ausmacht und für die in den älteren Methoden der Ökofaktor fehlt, der Ökofaktor retrospektive ermittelt werden müssen. Und andererseits haben sich die Ökofaktoren der anderen relevanten Emissionen nicht gross verändert.

Geografische Systemgrenze

Es wurde das Elektrogeräte-Recyclingsystem in der Schweiz betrachtet.

2.4 Methodvalidierung und Potenzialanalyse

Eine Methodvalidierung mittels Verfahren wie Sensitivitätsanalysen und Second Opinion Analysen wurde durchgeführt, um die Ergebnisrelevanz von Systemannahmen und Datenunsicherheiten zu überprüfen und somit die Robustheit der Resultate bezüglich dieser Einflussfaktoren abschätzen zu können. Des Weiteren

wurde eine Potentialanalyse durchgeführt, um eine mögliche Erhöhung des Umweltnutzens durch zusätzliche Recyclinganstrengungen abschätzen zu können.

2.4.1 Sensitivitätsanalyse: Datenunsicherheit

Unsicherheiten der zugrundeliegenden Daten (Annahmen, fehlende Daten etc.) können einen wesentlichen Einfluss auf das Resultat haben. Daher wurde für die wichtigsten Einflussgrößen die Unsicherheit ermittelt. Ein besonderer Fokus wird hier auf den Schadstoff PCB als dominanten Faktor für den Umweltnutzen gelegt, Die im Szenario „ohne SENS“ als emittiert angenommenen PCB-Mengen hängen vor allem von der Anzahl PCB-haltiger Kondensatoren (gekoppelt mit dem effektiven PCB-Gehalt in den einzelnen Kondensatoren) ab, Zusätzlich wurde die zeitliche Abnahme der PCB-haltiger Kondensatoren ausgehend von bekannten Eckwerten extrapoliert. Als solche Eckwerte wurden die Mittelwerte der in der Studie von Eugster u. a. (2007) ausgewiesenen PCB-Gehalte verwendet. Die ermittelten Werte variieren jedoch aufgrund analytischer Unsicherheiten stark, wie in Tabelle 2 ersichtlich ist. Daher wurde die Sensitivität der Resultate auf diesen Parameter untersucht, indem der tiefste (best case) und der höchste (worst case) PCB-Gehalt des in der Studie angegebenen Unsicherheitsbereichs für die Berechnung des Umweltnutzens verwendet wurde.

Tabelle 2: PCB-Gehalt von allen anfallenden Kondensatoren je Gerätekategorie 2006 (Eugster u. a., 2007)

Kühl, Gefrier- und Klimageräte enthalten keine PCB-haltigen Komponenten, weswegen sie hier nicht aufgelistet sind

Geräte SENS	Elektrogrossgeräte	Elektrokleingeräte	Leuchtmittel (SLRS)
Einheit	mg PCB / kg Kondensator	mg PCB / kg Kondensator	mg PCB / kg Kondensator
Mittelwert (in dieser Studie als Basis verwendet)	9'000	395	137'750
Szenario Tiefer Gehalt	1'500	350	24'500
Szenario Hoher Gehalt	16'500	440	250'000

2.4.2 Second Opinion Analyse: Bewertungsmethode

Die Gründe für die Wahl der Methode der ökologischen Knappheit als Bewertungsmethode für die Berechnung des Umweltnutzens ist in Kapitel 2.7 beschrieben. Weil das Resultat des Umweltnutzens dominiert wird durch eine nicht alltägliche Substanz, wurden die wichtigsten Berechnungen der Ökobilanz zusätzlich mit einer zweiten Bewertungsmethode durchgeführt. Damit soll geprüft werden, ob eine andere Bewertungsmethode zu einem ähnlichen Ergebnis kommen und so das Resultat bestätigen kann. Dazu wurde die Methode ILCD v1.06 (European Commission-Joint Research Centre, 2011) ausgewählt, weil sie als in der Fachwelt breit abgestützter Zusammenschluss verschiedener bestehender Bewertungsmethoden durch die Ökobilanz-Forschungsstelle der Europäischen Union breite Akzeptanz genießt.

2.4.3 Potenzialanalyse: Zusätzliches Recycling von Elektronikmetallen

Aufgrund der aktuellen Diskussion in Fachkreisen, ob die Anstrengungen für die Rückgewinnung von Elektronikmetallen⁴ verstärkt werden sollen, wurde das Potenzial für die Erhöhung des Umweltnutzens durch ein zusätzliches Recycling der wichtigsten Elektronikmetalle analysiert. Dabei ist zu bemerken, dass die gewählte Bewertungsmethode UPB 13 auch die Knappheit von mineralischen Primärressourcen bewertet und somit gut geeignet ist für eine Potenzialabschätzung.

Insbesondere die Leiterplatten der Elektrokleingeräte enthalten neben Gold und Silber in geringen Mengen noch weitere Metalle wie Gallium, Lanthan etc., die momentan nicht rezykliert werden. Für die Potenzial-

⁴ Metalle wie Gallium, Indium, Neodym, Tantal

analyse von zusätzlichem Recycling von Elektronikmetallen wurde der Extremfall angenommen, dass die Elektrogeräte Computerleiterplatten eingebaut hätten, aus welchen die Elektronikmetalle zu 100 % zurückgewonnen würden.

2.5 Sachbilanz

2.5.1 Modellierung des Produktsystems

In der Sachbilanz wird ein Modell für das zu bilanzierende Produktsystem entworfen und es werden die Energie- und Stoffflüsse der damit verbundenen Prozesse erfasst. Diese umfassen:

- Die Beziehungen eines Prozesses mit anderen Prozessen der Technosphäre, wie z. B. Menge an benötigten Rohmaterialien, Hilfsstoffen, Energiebedarf, Transporte oder Verwertungs- beziehungsweise Entsorgungssysteme.
- Die Beziehungen eines Prozesses mit seiner natürlichen Umwelt der Ökosphäre, wie z. B. Bedarf an Ressourcen (fossile Energieträger, Landressourcen etc.) und Emissionen, wie z. B. CO₂, FCKW, PCB u. a.

Die Sachbilanz wurde mit der Ökobilanz-Software SimaPro V8.0 (PRé Consultants, 2015) berechnet und für die Wirkbilanz verwendet. Die Produktionszahlen des SENS-Systems wurden von SENS zur Verfügung gestellt (die detaillierten Datengrundlagen sind in Kapitel 3 erwähnt). Als Datengrundlage für vorgelagerte Prozesse wurde auf Standarddaten aus ecoinvent V3.1 (ecoinvent, 2015) zurückgegriffen.

2.5.2 Annahmen und Berechnungsgrundlagen

Für sämtliche Prozesse wurden Grundlagendaten aus ecoinvent V3.1 (ecoinvent, 2015) verwendet. Dabei handelt es sich um Daten, welche einen sehr hohen Qualitätsstandard haben und auch international anerkannt sind.

Korrekturen der ecoinvent-Inventare

Diverse Ökoinventare für die Herstellung von Primär- und Sekundärmetallen weisen noch Fehler auf, welche sich relevant auf die Resultate dieser Studie auswirken. Diese Fehler wurden in der internen Datenbank behoben und an die Organisation ecoinvent rückgemeldet.

Annahmen

- Für eine Auswahl der diversen PCBs bestehen Ökofaktoren, die teilweise um den Faktor 200 unterschiedlich sind (Frischknecht & Büsser Knöpfel, 2013). Da es sich bei PCB immer um ein Gemisch von vielen verschiedenen PCBs handelt, wurde in dieser Studie der Mittelwert aller vorhandenen Ökofaktoren für PCBs verwendet.
- Im Gegensatz zu PentaBDPE ist für OctaBDPE in der Methode der ökologischen Knappheit (Frischknecht & Büsser Knöpfel, 2013) kein Ökofaktor angegeben. Da Penta- und OctaBDPE bezüglich Persistenz und Toxizität ähnlich eingeschätzt werden, wurde der PentaBDPE-Ökofaktor auch für OctaBDPE verwendet.
- Bei stofflich verwerteten Metallen wurde davon ausgegangen, dass Sekundärmaterialien entsprechende Primärmaterialien zu 100 % ersetzen.
- Bei stofflich verwerteten Kunststoffen wurde davon ausgegangen, dass Sekundärmaterialien entsprechende Primärmaterialien zu 90 % ersetzen (Dinkel & Kägi, 2014).

2.6 Wirkbilanz

In diesem Schritt wird die Sachbilanz bezüglich den Auswirkungen auf die Umwelt bewertet. Um diese Bewertung vorzunehmen, wird folgendermassen vorgegangen:

- Klassifizierung (Einteilung der Einflüsse bezüglich ihrer Auswirkungen):
Die Stoffe werden nach ihren unterschiedlichen Wirkungen auf die Umwelt gruppiert.
- Charakterisierung (Berechnung der Auswirkungen auf die Umwelt):
Dabei werden die einzelnen Substanzen entsprechend ihres Schädigungspotenzials bezüglich einer Leitsubstanz gegeneinander gewichtet. Daraus ergeben sich die Schädigungspotenziale bezüglich einer bestimmten Umweltauswirkung.

Auf Wunsch des Auftraggebers wird die Wirkbilanz „Treibhauspotenzial“ gesondert ausgewiesen.

2.7 Bewertung der Umweltbelastungen

Beim Resultat der Wirkbilanz handelt es sich um eine Zusammenstellung von verschiedenen Indikatoren, welche jeweils einen Aspekt der Umweltauswirkungen beschreiben. Um eine fundierte Entscheidungsbasis zu erhalten, können die verschiedenen Auswirkungen gewichtet und zu einer Kennzahl zusammengefasst werden. Die Gewichtung verschiedener Umweltauswirkungen ist ein Prozess, in welchen Werthaltungen einfließen und welcher deshalb für eine hohe Akzeptanz möglichst breit abgestützt wird.

Im Rahmen dieser Studie wurde die Methode der ökologischen Knappheit 2013 (Frischknecht & Büsser Knöpfel, 2013) verwendet. Die Bewertung mittels der Methode der ökologischen Knappheit wurde unter Mitarbeit des Bundesamts für Umwelt entwickelt und ist in der Schweiz etabliert. Diese Methode wurde einerseits gewählt, weil sie für die Bewertung sowohl die Umweltsituation wie auch die Umweltziele der Schweiz berücksichtigt (vgl. Abbildung 3) und somit bezüglich Werthaltung breit abgestützt ist. Ein weiterer Grund war andererseits, dass diese Methode alle in dieser Ökobilanz wichtigen Umweltaspekte wie Emissionen von POP und Ressourcenverbrauch auch tatsächlich bewertet.

Obwohl diese Methode die schweizerische Umweltpolitik widerspiegelt, hat sie auch international eine hohe Akzeptanz. Die Resultate werden in Umweltbelastungspunkten (UBP) ausgedrückt.

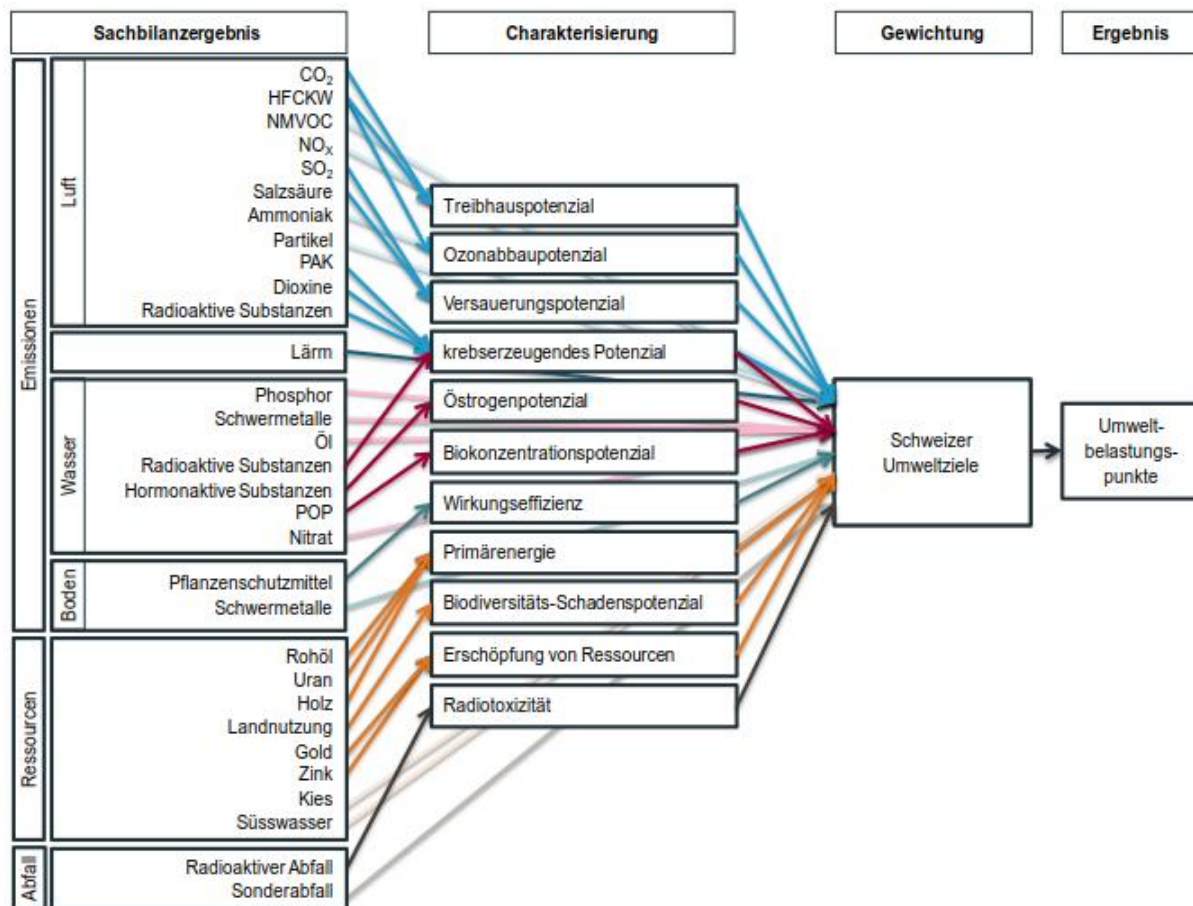


Abbildung 3: Grundschemata der Methode der ökologischen Knappheit (Grafik aus (Frischknecht & Büsser Knöpfel, 2013))

Im Rahmen einer Second Opinion Analyse wurde die Bewertungsmethode ILCD v1.06 (European Commission-Joint Research Centre, 2011) verwendet (Details siehe Kapitel 2.4.2).

3 Datengrundlagen

3.1 Verarbeitete Mengen an Geräten und Energiebedarf Recyclingbetriebe

In Tabelle 3 sind die verarbeiteten Mengen an Elektrogeräten gemäss SENS-Statistiken über 25 Jahre dargestellt. Die ersten Jahre nach der Gründung der SENS im Jahr 1990 wurde das Rücknahmesystem aufgebaut, so dass ab 1993 die ersten Geräte gesammelt und fachgerecht rezykliert werden konnten. Bis 1998 konzentrierte sich die Sammlung auf Kühl-, Gefrier- und Klimageräte. Ab 1998 wurden auch Elektrogeräte gesammelt. Ab 2005 wurden Leuchtmittel (SLRS) in das Sammel- und Recyclingkonzept aufgenommen. Insgesamt wurden in den letzten 25 Jahren 836'000 Tonnen Geräte fachgerecht entsorgt. Der mengenmässig grösste Anteil machen die Elektrogrossgeräte aus (42 %) gefolgt von den Kühl-, Gefrier- und Klimageräten (28 %) und den Elektrokleingeräten (22 %). Rund 6 % sind nicht VREG Geräte, 1 % sind Leuchtmittel.

Daten zu den Sammeltransporten wurden aus einer Studie zur Transportabgeltung der SENS (Starostina & Ott, 2010) entnommen. Die Transportdistanzen variieren dabei von 63 km für SENS-kg-Ware bis 73 km für Kühl-, Klima, und Gefriergeräte. In der vorliegenden Studie wurde für alle involvierten Geräte mit einer Transportdistanz von 73 km und mit der LKW-Kategorie 16-32 t, EURO3 gerechnet.

Daten zum Energieaufwand der Recyclingbetriebe wurden von der SENS (SENS Recycling, 2015) zur Verfügung gestellt. Der Stromverbrauch pro Tonne Gerät beläuft sich dabei auf 53 kWh bei Elektrokleingeräten respektive 71 kWh bei Elektrogrossgeräten und auf 467 kWh bei Kühl-, Gefrier-, und Klimageräten. Der Dieselbedarf liegt pro Tonne Gerät bei 109 MJ bei Elektrogeräten (Klein und Gross) und bei 179 MJ bei Kühl-, Gefrier-, und Klimageräten.

Tabelle 3: Verarbeitete Menge Elektrogeräte in Tonnen pro Jahr

Jahr	Kühl-, Gefrier- und Klimageräte	Elektro-grossgeräte	Elektro-kleingeräte	Leuchtmittel (SLRS)	Fractionen nicht VREG	Total
1990	0	0	0	0	0	0
1991	0	0	0	0	0	0
1992	0	0	0	0	0	0
1993	3'110	0	0	0	0	3'110
1994	3'832	0	0	0	0	3'832
1995	4'774	0	0	0	0	4'774
1996	5'501	0	0	0	0	5'501
1997	6'009	0	0	0	0	6'009
1998	6'100	8'000	1'532	0	4'600	18'700
1999	6'500	9'900	2'242	0	4'000	20'400
2000	6'900	9'600	3'003	0	2'500	19'000
2001	6'700	9'600	2'654	0	4'300	20'600
2002	6'400	5'600	3'383	0	300	12'300
2003	11'600	14'600	5'400	0	800	32'400
2004	13'100	18'100	7'500	0	1'800	40'500
2005	11'400	19'100	9'300	420	1'900	42'120
2006	15'300	23'400	10'700	1'100	4'200	54'700
2007	14'500	26'100	12'300	1'110	2'900	56'910
2008	15'100	26'800	13'800	1'130	2'300	59'130
2009	15'300	30'400	14'900	1'100	1'200	62'900
2010	15'900	30'700	15'400	1'130	3'500	66'630
2011	16'800	27'800	16'300	1'110	5'200	67'210
2012	17'500	30'300	18'800	960	6'000	73'560
2013	16'700	30'600	22'300	1'100	4'000	74'700
2014	17'150	30'947	25'418	1'121	2'957	77'593
Total	236'177	351'547	172'118	10'281	52'457	822'580
Anteil	28 %	42 %	22 %	1 %	6 %	100 %

3.2 Erzeugte Fraktionen

3.2.1 Fraktionen pro Gerätekategorie

Die aus der Verarbeitung resultierenden Wertstoff- und Schadstofffraktionen wurden für jede Gerätekategorie mittels vorliegenden Batchversuchen der SENS ermittelt. Dabei wurde für die Wertstoffe angenommen, dass die Wertstoffzusammensetzung über die Jahre mehr oder weniger identisch blieb. Eine Übersicht über die durchschnittliche Wertstoffzusammensetzung der SENS-Geräte ist in Tabelle 4 ersichtlich. Die jährlichen Mengen an Wertstoffen sind in Kapitel 4.1, Tabelle 14 und Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 4: Durchschnittliche Fraktionsanteile der SENS-Geräte

Gruppierung	Fraktionen	Anteil in SENS-Geräten
Wertstofffraktionen	Eisen	54.8 %
	Stahl, Edelstahl	8.5 %
	Aluminium	2.0 %
	Kupfer	3.3 %
	Zink	2.0 %
	Silber	0.000012 %
	Gold	0.000012 %
	Blei	0.00020 %
	Nickel	0.0022 %
	Ferromangan	0.035 %
	Kunststoffe	6.6 %
	Glas	1.0 %
	Total	78.2 %
Schadstofffraktionen	Leuchtmittel	0.00079 %
	Quecksilber	0.017 %
	Kondensatoren	0.083 %
	Kunststoff-Metall-Gemische (inkl. RESH)	21.7 %
	Total	21.8 %

Die Aufbereitung der Wertstoffe zu Sekundärrohstoffen mit Produktqualität wurde mit den entsprechenden ecoinvent Inventaren abgebildet. Die Sekundärrohstoffe ersetzen direkt die Herstellung der jeweiligen Primärrohstoffen (Gutschrift). Die Herstellung der Primärrohstoffe wurde ebenfalls mit den entsprechenden ecoinvent Inventaren abgebildet.

3.3 Relevante Schadstoffe

Die meisten Mengendaten zu entfernten und fachgerecht entsorgten Schadstoffen wurden den SENS-Statistiken entnommen. Für PCB und bromierte Flammschutzmittel (BFS) wurden Daten aus anderen Studien mit den Mengendaten der SENS-Statistiken kombiniert.

3.3.1 Kälte- und Treibmittel

Die Daten zu entfernten und fachgerecht entsorgten Kälte- und Treibmitteln stammen aus den SENS-Statistiken und sind in Tabelle 15 aufgelistet.

3.3.2 PCB

Die Hauptquelle für PCB sind die PCB-haltigen Kondensatoren, die bis 1986, als das generelle PCB-Verbot in Kraft trat, in Elektrogeräten eingebaut wurden. Insbesondere aufgrund der Langlebigkeit von Leuchten und Elektrogrossgeräten ist auch heute noch mit PCB-haltigen Kondensatoren in den gesammelten Geräten zu rechnen. Die deutlich kurzlebigeren Elektrokleingeräte weisen heute kaum mehr PCB-haltige Kondensatoren auf.

Für die Ermittlung der jährlich anfallenden PCB-Mengen (hauptsächlich aus PCB-haltigen Kondensatoren) wurden Angaben über den durchschnittlichen PCB-Gehalt in Kondensatoren aus dem Schlussbericht über PCB in Kleinkondensatoren (Eugster u. a., 2007) verwendet und mit den von SENS ausgewiesenen Kondensatormengen verrechnet (Tabelle 5.) Kühl-, Gefrier- und Klimageräte enthalten keine PCB-haltigen Kondensatoren und sind deshalb in der Tabelle nicht aufgeführt. Bei den von den SENS-Partnern auch verarbeiteten Nicht-VREG-Elektrogeräten handelt es sich zum grössten Teil um gewerbliche Klima- und Kühlgeräte, weshalb die in dieser Studie als solche in die Berechnungen einfließen.

Sowohl für 2006 wie auch für das Jahr 1988 sind Daten zum Anteil PCB-haltiger Kondensatoren bekannt (Eugster u. a., 2007). In Kombination mit dem PCB-Gehalt von PCB-haltigen Kondensatoren (rund 40 %) und den gesammelten Kondensatoren wurden die PCB-Mengen für die Gerätekategorien ermittelt. Dabei wurde ebenfalls berücksichtigt, dass der Anteil PCB-haltiger Kondensatoren je Elektrogerätekategorie mit den Jahren unterschiedlich schnell abnimmt (je nach Lebensdauer der Geräte) und mittelfristig gegen Null strebt. Folgende Annahmen wurden dazu getroffen:

- Elektrogrossgeräte: Die ersten 12 Jahre nach dem Verbot von 1986 stammen die gesammelten Geräte gänzlich aus der Zeit vor 1986, für welche ein Anteil an PCB-haltigen Kondensatoren von 8.4 % ermittelt wurde (Angabe 1988 aus Eugster u. a., 2007). Ab 1998 wurde mit einer linearen Abnahme gerechnet bis zu 2.3 % im Jahr 2006 (Angabe 2006 aus Eugster u. a., 2007). Ab 2006 wurde mit einer auslaufenden Abnahme nach der Formel $x = y - y * 0.3$ gerechnet. Das bedeutet, dass im Jahr 2014 noch 0.13 % PCB-haltige Kondensatoren zu erwarten sind, was einer jährlichen PCB-Gesamtfracht von etwa 40 kg entspricht.
- Elektrokleingeräte (exkl. Leuchten): Es wurde mit einer linearen Abnahme ab 1988 (1.4 % PCB haltige Kondensatoren gemäss Eugster u. a., 2007) bis 2006 (0.10 % im 2006 gemäss Eugster u. a., 2007) gerechnet. Ab 2006 wurde mit einer auslaufenden Abnahme nach der Formel $x = y - y * 0.5$ gerechnet. Das bedeutet, dass im Jahr 2014 noch 0.0004 % PCB-haltige Kondensatoren zu erwarten sind, was einer jährlichen PCB-Gesamtfracht von etwa 100 g entspricht.
- Leuchten (gehören zu der Gerätekategorie Elektrokleingeräte): Die ersten 12 Jahre nach dem Verbot von 1986 stammen die gesammelten Leuchten gänzlich aus der Zeit vor 1986 mit einem Anteil PCB-haltiger Kondensatoren von 68.5 % (Angabe 1988 aus Eugster u. a., 2007). Ab 1998 wurde mit einer linearen Abnahme gerechnet bis auf 34 % im Jahr 2006 (Angabe 2006 aus Eugster u. a., 2007). Ab 2006 wurde mit einer auslaufenden Abnahme nach der Formel $x = y - y * 0.1$ gerechnet. Das bedeutet, dass im Jahr 2014 noch 9.8 % PCB-haltige Kondensatoren zu erwarten sind, was einer jährlichen PCB-Gesamtfracht von über 540 kg entspricht.

Basierend auf diesen Annahmen wurden in den 25 Jahren über das SENS-System insgesamt 36.7 t PCB gesammelt und fachgerecht entsorgt. Dabei stammen 27.3 t von den Leuchten, und 9.4 t von den Elektrogrossgeräten. Auf die übrigen Elektrokleingeräte entfallen nur 137 kg PCB.

Tabelle 5: PCB-Mengen der gesammelten Gerätekategorien

Kühl-, Gefrier- und Klimageräte enthalten keine PCB-haltigen Komponenten, weswegen sie hier nicht aufgelistet sind

Geräte SENS	Elektrogrossgeräte			Elektrokleingeräte (exkl. Leuchten)			Leuchten		
	Menge Kondensa- toren	PCB- haltige Kondensa- toren	Menge PCB	Menge Kondensa- toren	PCB- haltige Kondensa- toren	Menge PCB	Menge Kondensa- toren	PCB- haltige Kondensa- toren	Menge PCB
Jahr									
1990	0 t*	8.4 %	0 t	0 t*	1.3 %	0 kg	0 t*	69 %	0 t*
1991	0 t*	8.4 %	0 t	0 t*	1.2 %	0 kg	0 t*	69 %	0 t*
1992	0 t*	8.4 %	0 t	0 t*	1.1 %	0 kg	0 t*	69 %	0 t*
1993	0 t*	8.4 %	0 t	0 t*	1.0 %	0 kg	0 t*	69 %	0 t*
1994	0 t*	8.4 %	0 t	0 t*	0.97 %	0 kg	0 t*	69 %	0 t*
1995	0 t*	8.4 %	0 t	0 t*	0.89 %	0 kg	0 t*	69 %	0 t*
1996	0 t*	8.4 %	0 t	0 t*	0.82 %	0 kg	0 t*	69 %	0 t*
1997	0 t*	8.4 %	0 t	0 t*	0.75 %	0 kg	0 t*	69 %	0 t*
1998	31.6 t**	8.4 %	0.79 t	3.68 t	0.68 %	10 kg	6.63 t**	69 %	1.4 t
1999	31.6 t**	7.6 %	0.93 t	5.86 t	0.61 %	14 kg	6.63 t**	64 %	1.7 t
2000	31.6 t	6.9 %	0.85 t	7.21 t	0.53 %	15 kg	6.63 t	60 %	1.6 t
2001	46.0 t	6.1 %	1.1 t	6.37 t	0.46 %	12 kg	9.65 t	56 %	2.2 t
2002	50.7 t	5.4 %	1.1 t	8.12 t	0.39 %	13 kg	10.6 t	51 %	2.2 t
2003	55.5 t	4.6 %	1.0 t	13.0 t	0.32 %	16 kg	11.6 t	47 %	2.2 t
2004	57.8 t	3.8 %	0.86 t	18.0 t	0.24 %	18 kg	12.1 t	43 %	2.1 t
2005	63.2 t	3.1 %	0.76 t	22.3 t	0.17 %	15 kg	13.2 t	38 %	2.0 t
2006	58.5 t	2.3 %	0.5 t	25.7 t	0.10 %	10 kg	12.3 t	34 %	1.7 t
2007	67.4 t	1.6 %	0.42 t	29.5 t	0.05 %	5.9 kg	14.1 t	31 %	1.7 t
2008	70.6 t	1.1 %	0.31 t	33.1 t	0.03 %	3.3 kg	14.8 t	26 %	1.6 t
2009	80.5 t	0.79 %	0.25 t	35.8 t	0.01 %	1.8 kg	16.9 t	22 %	1.5 t
2010	86.8 t	0.55 %	0.19 t	37.0 t	0.006 %	0.92 kg	18.2 t	19 %	1.4 t
2011	105.8 t	0.39 %	0.16 t	39.1 t	0.003 %	0.49 kg	22.2 t	16 %	1.4 t
2012	92.1 t	0.27 %	0.10 t	45.1 t	0.002 %	0.28 kg	19.3 t	14 %	1.1 t
2013	82.4 t	0.19 %	0.061 t	53.5 t	0.001 %	0.17 kg	17.3 t	12 %	0.81 t
2014	89.2 t	0.13 %	0.046 t	61.0 t	0.0004 %	0.10 kg	18.7 t	10 %	0.74 t
Total	1101 t		9.4 t	444 t		136.6 kg	231 t		27.3 t

* Vor 1998 fand noch keine Sammlung dieser Gerätekategorie durch SENS statt.

** aus den SENS Statistiken waren nur Kondensatormengen ab 2000 extrahierbar. Es wurde vereinfacht angenommen, dass 1998 und 1999 die Kondensatormengen in Relation zu den gesammelten Gerätemengen der Jahre 1998 bis 2000 stehen.

3.3.3 Bromierte Flammschutzmittel

Die Hauptquelle für bromierte Flammschutzmittel (BFS) sind BFS-haltige Kunststoffe von Elektroklein- und Elektrogrossgeräten. Penta- und OctaBDPE⁵ sind ab 2003 verboten. Andere BFS wie das TBBPA⁶ oder DecaBDPE sind weiterhin im Einsatz. In der Schriftenreihe Umwelt Nr. 338 des BAFU über ausgewählte

⁵ BDPE steht für Bromdiphenylether

⁶ TBBPA steht für Tetrabrombisphenol A

polybromierte Flammschutzmittel (Morf u. a., 2002) wurden unter anderem die Flammschutzmittelgehalte von Elektroklein- und Elektrogrossgeräten untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Geräte kein PentaBDPE, wohl aber OctaBDPE, DecaBDPE und TBBPA enthalten.

In der Studie sind nur BFS-Gehalte pro Tonne Gerät für das Jahr 1998 erwähnt (Morf u. a., 2002). Aus der DIN-Norm über die Behandlung von Elektro- und Elektronikgeräten (DIN EN 50625-1:2014-09, 2014) ist zu entnehmen, dass bei den Elektrogrossgeräten, welche ab 2014 in die Entsorgung gelangen, nicht mehr mit BFS-haltigem Kunststoff zu rechnen ist. Die BFS-Mengen ergeben sich aus der Verrechnung der mittleren BFS-Konzentrationen mit den verarbeiteten Gerätemengen. Folgende Annahmen wurden dazu getroffen:

- Elektrokleingeräte:
 - Für DecaBDPE und TBBPA wurden für alle Jahre dieselben Konzentrationen verwendet wie in der Schriftenreihe Umwelt Nr. 338 (Morf u. a., 2002) angegeben, da keine aktuelleren Zahlen verfügbar sind.
 - Für das seit 2003 nicht mehr verwendete OctaBDPE wurde angenommen, dass analog der linearen Abnahme bei PCB-haltigen Kondensatoren der 1998 gemessene OctaBDPE-Gehalt in den Geräten ab 2003 jedes Jahr um umgerechnet 5.2 % zurückgeht.
- Elektrogrossgeräte:
 - Aufgrund der BFS-Gehalte gemäss Morf et al. (2002) wäre unter Berücksichtigung der Lebensdauer damit zu rechnen, dass noch BFS-haltige Kunststoffe vorhanden sein müssten in heutigen Altgeräten. Gemäss der DIN-Norm (DIN EN 50625-1:2014-09, 2014) ist damit nicht mehr zu rechnen. Mangels besserer Daten wurde vereinfacht eine lineare Abnahme von 1998 bis 2014 angenommen, wobei ab 2014 mit 0 % BFS in Kunststoffen gerechnet wurde.

Insgesamt wurden durch die SENS 550 t (in Kunststoffen enthaltene) BFS gesammelt und entsorgt. Der grösste Anteil macht das DecaBDPE mit 298 t aus, gefolgt vom TBBPA mit 225 t. 26.7 t fallen auf das seit 2003 verbotene OctaBDPE.

Tabelle 6: Bromierte Flammschutzmittel-Mengen der gesammelten Gerätekategorien

Kühl-, Gefrier- und Klimageräte sowie Leuchtmittel enthalten keine BFS-haltigen Komponenten, weswegen sie hier nicht aufgelistet sind. Die BFS-Mengen ergeben sich aus dem BFS-Anteil und den gesammelten Gerätemengen (siehe Tabelle 3).

Geräte SENS	Elektrogrossgeräte						Elektrokleingeräte					
	Anteil			Menge			Anteil			Menge		
Jahr	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA
1990	0.005 %	0.045 %	0.031 %	0*	0*	0*	0.007 %	0.068 %	0.052 %	0*	0*	0*
1991	0.005 %	0.045 %	0.031 %	0*	0*	0*	0.007 %	0.068 %	0.052 %	0*	0*	0*
1992	0.005 %	0.045 %	0.031 %	0*	0*	0*	0.007 %	0.068 %	0.052 %	0*	0*	0*
1993	0.005 %	0.045 %	0.031 %	0*	0*	0*	0.007 %	0.068 %	0.052 %	0*	0*	0*
1994	0.005 %	0.045 %	0.031 %	0*	0*	0*	0.007 %	0.068 %	0.052 %	0*	0*	0*
1995	0.005 %	0.045 %	0.031 %	0*	0*	0*	0.007 %	0.068 %	0.052 %	0*	0*	0*
1996	0.005 %	0.045 %	0.031 %	0*	0*	0*	0.007 %	0.068 %	0.052 %	0*	0*	0*
1997	0.005 %	0.045 %	0.031 %	0*	0*	0*	0.007 %	0.068 %	0.052 %	0*	0*	0*
1998	0.005 %	0.045 %	0.031 %	0.41 t	3.6 t	2.5 t	0.007 %	0.068 %	0.053 %	0.60 t	5.4 t	4.2 t
1999	0.005 %	0.042 %	0.029 %	0.48 t	4.2 t	2.9 t	0.007 %	0.068 %	0.052 %	0.74 t	6.7 t	5.2 t
2000	0.005 %	0.040 %	0.027 %	0.43 t	3.8 t	2.6 t	0.007 %	0.068 %	0.052 %	0.71 t	6.5 t	5.0 t
2001	0.004 %	0.037 %	0.025 %	0.40 t	3.5 t	2.4 t	0.007 %	0.068 %	0.052 %	0.71 t	6.5 t	5.0 t
2002	0.004 %	0.034 %	0.023 %	0.22 t	1.9 t	1.3 t	0.007 %	0.068 %	0.052 %	0.42 t	3.8 t	2.9 t
2003	0.004 %	0.031 %	0.021 %	0.52 t	4.6 t	3.1 t	0.007 %	0.068 %	0.052 %	1.1 t	9.9 t	7.7 t
2004	0.003 %	0.028 %	0.020 %	0.58 t	5.1 t	3.5 t	0.007 %	0.068 %	0.052 %	1.3 t	12.3 t	9.5 t
2005	0.003 %	0.025 %	0.018 %	0.56 t	4.9 t	3.4 t	0.007 %	0.068 %	0.052 %	1.3 t	13.0 t	10.0 t
2006	0.003 %	0.023 %	0.016 %	0.60 t	5.3 t	3.7 t	0.007 %	0.068 %	0.052 %	1.6 t	15.9 t	12.3 t
2007	0.002 %	0.020 %	0.014 %	0.59 t	5.2 t	3.6 t	0.006 %	0.068 %	0.052 %	1.6 t	17.7 t	13.7 t
2008	0.002 %	0.017 %	0.012 %	0.52 t	4.6 t	3.1 t	0.006 %	0.068 %	0.052 %	1.6 t	18.2 t	14.1 t
2009	0.002 %	0.014 %	0.010 %	0.49 t	4.3 t	3.0 t	0.006 %	0.068 %	0.052 %	1.7 t	20.6 t	16.0 t
2010	0.001 %	0.011 %	0.008 %	0.40 t	3.5 t	2.4 t	0.005 %	0.068 %	0.052 %	1.6 t	20.8 t	16.1 t
2011	0.001 %	0.008 %	0.006 %	0.27 t	2.4 t	1.6 t	0.005 %	0.068 %	0.052 %	1.3 t	18.9 t	14.6 t
2012	0.001 %	0.006 %	0.004 %	0.20 t	1.7 t	1.2 t	0.004 %	0.068 %	0.052 %	1.3 t	20.6 t	15.9 t
2013	0.000 %	0.003 %	0.002 %	0.10 t	0.87 t	0.60 t	0.004 %	0.068 %	0.052 %	1.2 t	20.8 t	16.1 t
2014	0.000 %	0.000 %	0.000 %	0.00 t	0.00 t	0.00 t	0.004 %	0.068 %	0.052 %	1.1 t	21.0 t	16.2 t
Total				6.8 t	59.4 t	40.9 t				19.9 t	238.7 t	184.5 t

* Vor 1998 fand noch keine Sammlung dieser Gerätekategorie durch SENS statt.

3.3.4 Weitere Schadstoffe

Zusätzlich wurde auch Quecksilber basierend auf den SENS-Statistiken in der Berechnung der Ökobilanz berücksichtigt.

Weil das Batterierecycling primär über ein anderes System (Inobat) organisiert wird, wurde im Sinne eines konservativen Ansatzes entschieden, den Umweltnutzen der vermiedenen Dissipation der Batterieschadstoffe nicht in die Systemgrenzen dieser Ökobilanz zu integrieren. Die Batterien wurden als korrekt entsorgt betrachtet.

Nicht berücksichtigte Schadstoffe sind Asbest und Selen, da diese in SENS-Geräten nur in sehr geringen Mengen vorkommen.

3.4 Potenzielle Rückgewinnung von Elektronikmetallen

Die Mengen an Elektronikmetallen einer Computer-Leiterplatte (Blaser u. a., 2012) dienen als Grundlage für eine Best-Case-Abschätzung (Leiterplatten von Computern sind metallreicher als solche von Elektrogeräten). Für die Umweltbelastung der Sekundärproduktion dieser Metalle wird die e-Recmet Studie (Böni u. a., 2015) als Grundlage herangezogen.

Tabelle 7: Mengen an Elektronikmetallen in einer Computer-Leiterplatte, verwendet zum Abschätzen des Umweltnutzens eines erweiterten Metallrecyclings.

	Be	Ce	Co	Ga	La	Li	Nb	Nd	Pd	Pt	Ru	Sb	Sn	Ta	Te
mg / kg Gerät	0.2	1.7	1.0	0.2	9.2	6.8	1.6	8.3	4.6	0.1	0.2	168	1591	0.1	0.2

4 Resultate und Diskussion

Kapitel 4.1 zeigt eine Übersicht über die Mengen an Wert- und Schadstoffen, welche durch das SENS-System in 25 Jahren recycelt respektive nicht emittiert wurden. In Kapitel 4.2 wird der entsprechende Umweltnutzen dargestellt, berechnet mit der Methode der ökologischen Knappheit. In Kapitel 4.3 ist der Klimanutzen aufgeführt. Kapitel 4.4 enthält verschiedene Sensitivitätsanalysen.

4.1 Stoffflüsse

4.1.1 Mengen an separierten Wertstoffen und Schadstoffen

Die Menge an separierten Wertstoffen ist in Tabelle 8 dargestellt (eine jährliche Auflistung ist in Anhang A3 zu finden). Insgesamt wurden gut 650'000 Tonnen Wertstoffe verwertet. Mengenmässig am relevantesten sind die Wertstoffe Eisen (70.0 %), Stahl (10.9 %) und Kunststoffe (8.5 %). Wesentlich weniger relevant sind die gesammelten Mengen an Kupfer (4.2 %), Aluminium (2.6 %), Zink (2.5 %) und Glas (1.2 %). Von den restlichen Wertstoffen fallen nur sehr geringe Mengen an (weniger als 0.1 %).

Tabelle 8: In 25 Jahren verwertete Mengen Wertstoffe

Wertstoffe	Mengen	Anteil
Eisen	457'495 t	70.0 %
Stahl, Edelstahl	71'440 t	10.9 %
Aluminium	16'718 t	2.6 %
Kupfer	27'581 t	4.2 %
Zink	16'530 t	2.5 %
Silber	0.10 t	0.00002 %
Gold	0.10 t	0.00002 %
Blei	1.7 t	0.0003 %
Nickel	18.2 t	0.003 %
Ferromangan	294 t	0.05 %
Kunststoffe	55'237 t	8.5 %
Glas	7'947 t	1.2 %
Total	653'262 t	100 %

Die Menge von 530'000 Tonnen verwertetem Eisen und Stahl über 25 Jahre würde reichen, um sieben Golden Gate Brücken zu bauen. Die 28'000 Tonnen Kupfer ergäben ein Starkstromleitungskabel, welches 1.4 Mal die Erde umspannt. Die 17'000 Tonnen Aluminium reichen aus, um 100 Stück des grössten Passagierflugzeugs der Welt (Airbus A380) zu bauen.

Die Herkunft der Wertstoffe ist in Abbildung 4 illustriert. Das Glas stammt ausschliesslich von den Leuchtmitteln. Kunststoffe werden zum grossen Teil aus Kühl, Gefrier- und Klimageräten zurückgewonnen sowie aus Elektrokleingeräten und nicht VREG-Geräten. Ferromangan und Nickel stammt ausschliesslich aus den

Batterien der Elektrokleingeräte. Blei, Gold, Silber wird aus den Leiterplatten der Elektrogross-, und Elektrokleingeräten zurückgewonnen. Zink stammt fast ausschliesslich aus den Elektrogrossgeräten. Kupfer, Stahl und Eisen stammt von allen Gerätekategorien ausgenommen den Leuchtmitteln. Aluminium ist der einzige Wertstoff, der in allen Gerätekategorien in grösseren Mengen vorkommt und zurückgewonnen wird.

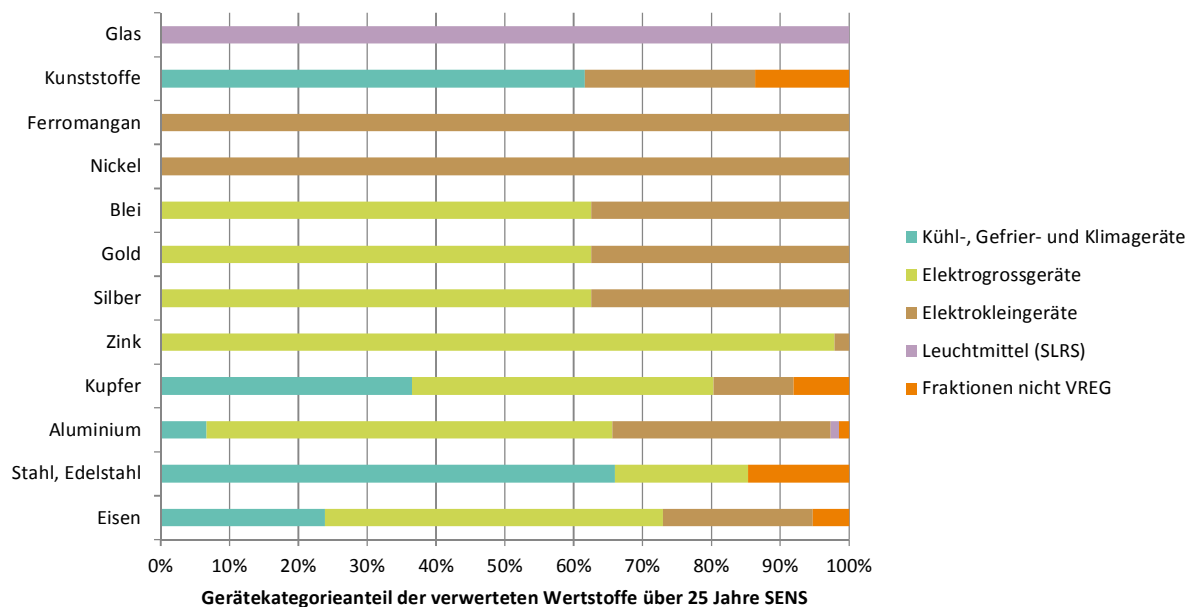


Abbildung 4: Anteil der SENS Gerätekategorien für die jeweiligen verwerteten Wertstoffe

Die Mengen an separierten und kontrolliert entsorgten Schadstoffen sind in Tabelle 9 dargestellt (eine jährliche Auflistung ist in Anhang A4 zu finden). Insgesamt wurden rund 3'900 Tonnen Schadstoffe kontrolliert entsorgt. Mengenmässig am relevantesten sind die Schadstoffe FCKW R11 (33.8 %) und Öl (32.5 %). Wesentlich tiefer liegen die gesammelten Mengen an bromierten Flammschutzmitteln (14 %), FCKW R12 (6.1 %), Cyclopentan (6.0 %) und R600a (5.2 %). Von den restlichen Schadstoffen fallen nur geringe Mengen an (weniger als 2.1 %).

Tabelle 9: In den letzten 25 Jahren kontrolliert entsorgte Schadstoffe

Jahr	Total	Anteil
FCKW, R12	239.3 t	6.1 %
FCKW, R11	1328 t	33.8 %
R600a	205.3 t	5.2 %
R134	44.9 t	1.1 %
Ammoniak	7.4 t	0.2 %
Cyclopentan	235.9 t	6.0 %
Öl	1280 t	32.5 %
PCB	36.7 t	0.9 %
Quecksilber	6.6 t	0.2 %
OctaBDPE	26.7 t	0.7 %
DecaBDPE	298.1 t	7.6 %
TBBPA	225.4 t	5.7 %
Total	3934 t	100.0 %

Die Herkunft der Schadstoffe ist in Abbildung 5 illustriert. BFS stammen vor allem aus Elektrokleingeräten und –grossgeräten. PCB stammt von Elektrogrossgeräten und Leuchten, welche der Kategorie Elektrokleingeräte zugeordnet sind. Quecksilber stammt zu einem grossen Teil aus den Quecksilberschaltern der Kategorie Kühl-, Gefrier- und Klimageräte und nicht VREG-Geräte (welche als gewerbliche Kühl-, Gefrier- und Klimageräte betrachtet wurden) und zu einem geringen Teil aus der Kategorie Leuchtmittel. Die Kühl- und Treibmittel kommen aus der Kategorie der Kategorie Kühl-, Gefrier- und Klimageräte und nicht VREG-Geräte.

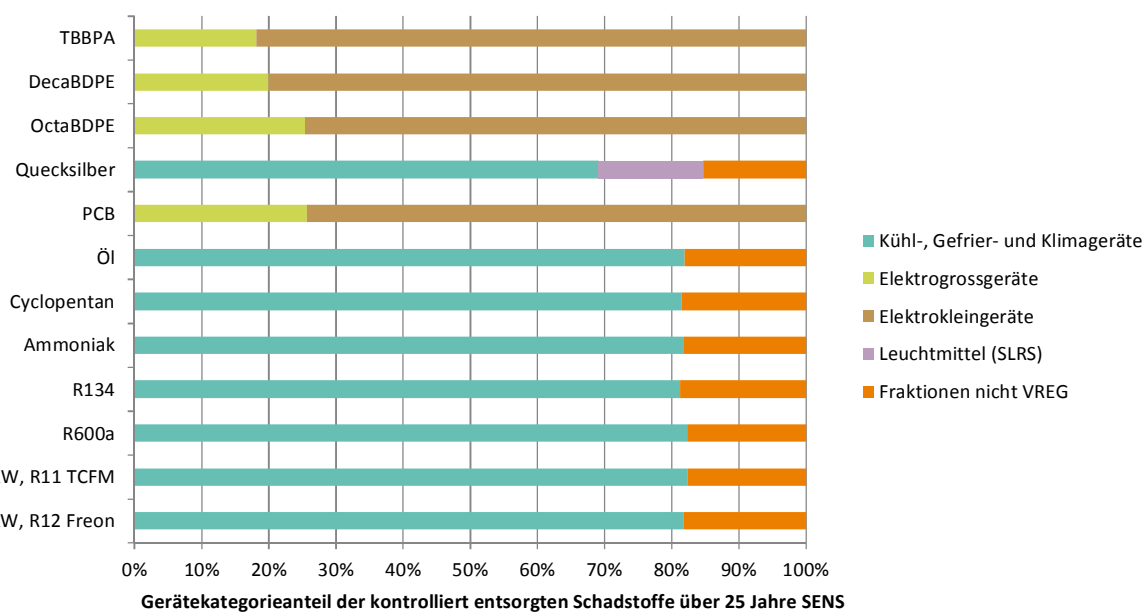


Abbildung 5: Anteil der SENS Geräteategorien für die jeweiligen separierten und kontrolliert entsorgten Schadstoffe

4.2 Umweltnutzen

Die Grundlage für die Berechnung des Umweltnutzens des SENS Elektrogeräterecyclings ist die Differenz zwischen der Wertstoff- und Schadstoffmengen der Iststandsanalyse „SENS“ und des Szenarios „ohne SENS“ (siehe Tabelle 10 und Tabelle 11). Zum einen wird der Nettonutzen des Wertstoffrecyclings bestimmt, indem der ökologische Aufwand aus den Sammeltransporten, den Sortieraufwänden, der Wiederaufbereitung der Wertstoffe gegen den ökologischen Nutzen, welcher entsteht, da weniger Primärmaterial produziert werden muss. Zum anderen ergibt sich der Nettonutzen der kontrollierten Schadstoffentsorgung, indem der ökologische Aufwand bei der Entsorgung gegen den ökologischen Nutzen von vermiedenen Schadstoffemissionen in die Umwelt verrechnet wird.

Tabelle 10: Differenz der Wertstoffmengen zum Szenario „ohne SENS“ in Tonnen

Die Differenz zum Szenario „ohne SENS“ bildet sich aus der verwerteten Menge Wertstoffe respektive korrekt entsorgten Schadstoffen im SENS-System und im Szenario „ohne SENS“. Diese Differenzmengen bilden die Grundlage für die Berechnung des erreichten Umweltnutzens.

	Eisen	Stahl, Edelmetall	Aluminium	Kupfer	Zink	Silber	Gold	Blei	Nickel	Ferro-mangan	Kunststoffe	Glas	Total
Tonnen	114'374	17'860	4'180	6'895	4'133	0.0255	0.0257	0.423	4.54	73.55	13'809	1'987	163'316

Tabelle 11: Differenz der Schadstoffmengen zum Szenario „ohne SENS“ in Tonnen

Die Differenz zum Szenario „ohne SENS“ bildet sich aus der verwerteten Menge Wertstoffe respektive korrekt entsorgten Schadstoffen im SENS-System (siehe Total) und im Szenario „ohne SENS“. Diese Differenzmengen bilden die Grundlage für die Berechnung des erreichten Umweltnutzens.

	FCKW, R12	FCKW, R11	R600a	R134	Ammoniak	Cyclopentan	Öl	PCB	Quecksilber	Octa-DBPE	Deca-DBPE	TBBPA	Total
Tonnen	179.5	995.9	153.97	33.65	5.51	177.0	960.1	8.98	0.765	0.027	0.280	0.338	2515.9

4.2.1 Umweltnutzen über 25 Jahre SENS

Insgesamt beläuft sich der Umweltnutzen von 25 Jahren SENS Elektrogeräterecyclings auf netto 155'000 Mia. vermiedene UBP⁷, wobei fast der ganze Nutzen (98.4 %) durch die Verhinderung von Schadstoffemissionen generiert wird (Abbildung 6). Der Umweltnutzen der rezyklierten Wertstoffe und der ökologische Aufwand für das Recycling (Transporte, Energieverbrauch Recyclingbetriebe, etc.) sind im Vergleich sehr klein. Um die Höhe des gesamten Umweltnutzens besser einordnen zu können, seien im Folgenden einige Vergleichswerte aufgelistet, welche auch 155'000 Milliarden UBP entsprechen:

- Umweltfussabdruck der gesamten Schweizer Bevölkerung (8 Mio. Einwohner) in 11 Monaten. Dies entspricht einer Senkung der jährlichen Umweltbelastung der Schweiz um durchschnittlich etwa 4 %.
- Umweltnutzen, welcher durch die Verwendung von bleifreiem Benzin in der Schweiz über 9 Jahre generiert wird.

⁷ In Grafiken als negative UBP dargestellt.

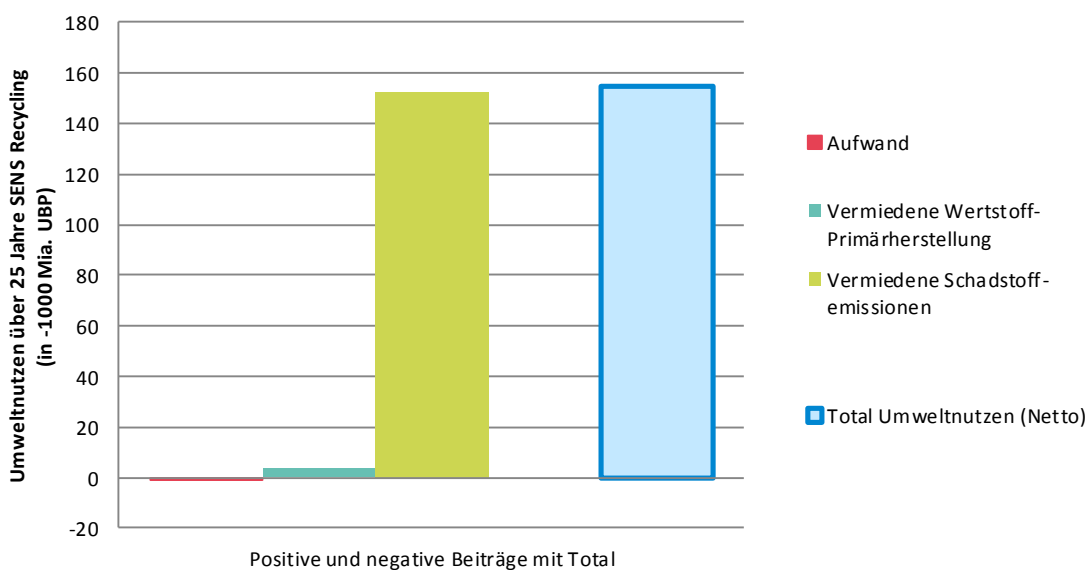


Abbildung 6: Der Umweltnutzen des SENS Elektrogeräte-Recyclings ergibt sich aus der Summe der positiven und negativen Beiträge

Unter den verhinderten Schadstoffemissionen ist die korrekte Entsorgung von PCB-haltigen Kondensatoren der wichtigste Beitrag zum Umweltnutzen (89.4 %), gefolgt von der korrekten Entsorgung von FCKW R11 (5.5 %), BFS (1.7 %) und FCKW R12 (1.0 %) (Abbildung 7).

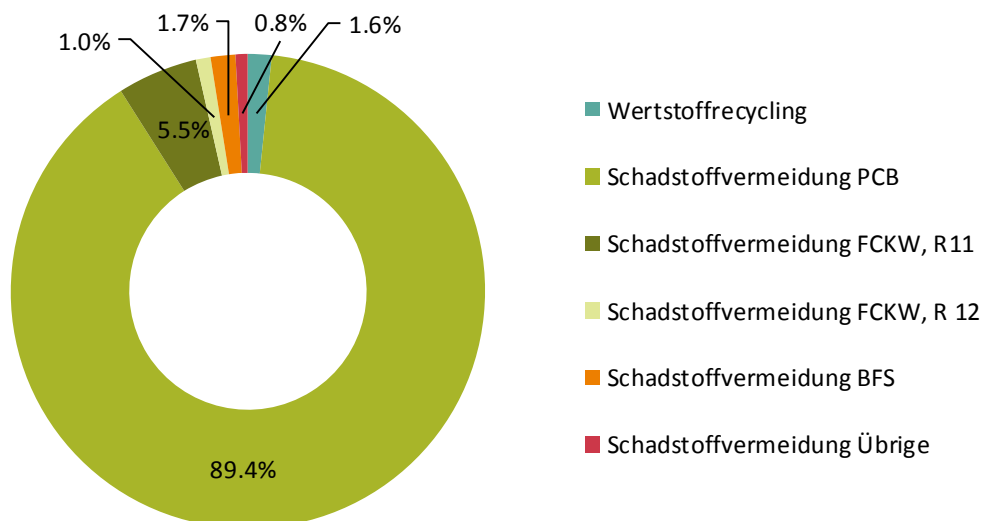


Abbildung 7: Anteil des Wertstoffrecyclings und der Schadstoffvermeidung am Umweltnutzen des SENS Elektrogeräte-Recyclings.

Die 9 t PCB, welche durch das SENS System im Vergleich zum Szenario „ohne SENS“ zusätzlich korrekt entsorgt und somit nicht in die Umwelt emittiert werden, dominieren das Resultat, weil PCB als wesentlich umweltschädlicher eingestuft wird als sämtliche anderen in Elektrogeräten vorkommenden Schadstoffe. PCB sind seit 1986 verboten und werden weltweit als eine der zwölf problematischsten Stoffgruppen gelistet.

Der Nutzen des stofflichen Recyclings ist wesentlich tiefer als der Nutzen der Schadstoffvermeidung. Trotzdem ist Recycling für die aktuell zurückgewonnen Wertstoffe sinnvoll, da der Umweltnutzen des Recyclings (Einsparung von Primärmaterial) den ökologischen Aufwand um ein Vielfaches überwiegt (ca. Faktor 2 für Kunststoffe und Eisen, mindestens Faktor 5 für die übrigen betrachteten Metalle). Von den rezyklierten Wertstoffen (Abbildung 8) trägt die Rückgewinnung von Kupfer am meisten zum Umweltnutzen des stofflichen Recyclings bei (60.1 % des Recyclingnutzens). Obwohl Eisen 70 % der Masse von allen Wertstoffen ausmacht, liegt der Umweltnutzen mit 15.8 % wesentlich tiefer als bei Kupfer. Der Grund liegt insbesondere darin, dass die Herstellung von Primärkupfer mit einer etwa zehn Mal höheren Umweltbelastung einher geht als die Herstellung von Eisen. Damit ist der Nutzen des Kupferrecyclings viel höher. Die weiteren Anteile am Recyclingnutzen sind 9.8 % für Zink, 7.9 % für Stahl und 4.9 % für Aluminium. Die restlichen Wertstoffe wie Gold, Silber, Blei, Nickel, Ferromangan und Kunststoffe tragen zusammen gerade noch 1.4 % zum Umweltnutzen des stofflichen Recyclings bei.

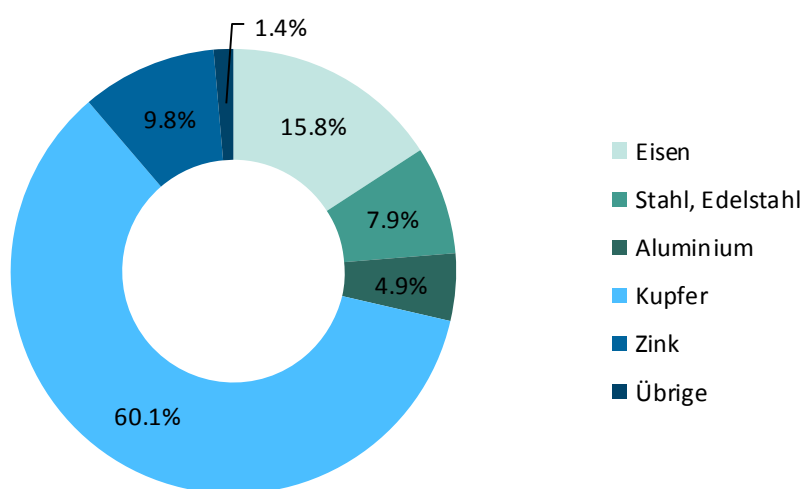


Abbildung 8: Beitrag der Wertstoffe am Umweltnutzen durch das stoffliche Recycling.

Wird nur der Umweltfussabdruck des Aufwands des SENS Elektrogeräterecyclings betrachtet (Abbildung 9), fällt der grösste Teil auf die Sekundärherstellung der Wertstoffe (77.2 %), gefolgt vom Aufwand der Recyclingbetriebe (20.1 %). Der Transport der Geräte zu den Recyclingbetrieben sowie die korrekte Entsorgung der Schadstoffe tragen nur einen sehr kleinen Teil zum Umweltfussabdruck des Aufwands bei.

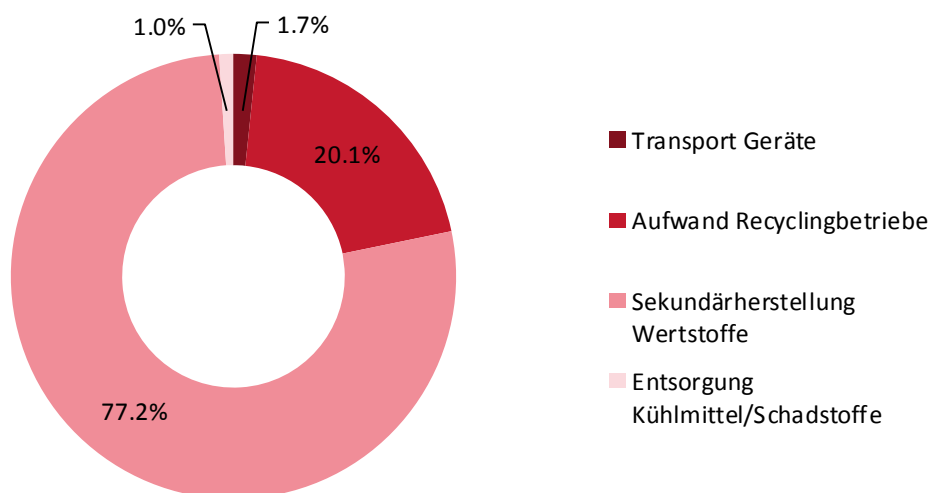


Abbildung 9: Beitrag der Prozesse am Umweltfussabdruck des Aufwands für das SENS Elektrogeräterecycling.

Eine Analyse der Umweltnutzens bezüglich Gerätekategorien (Abbildung 10) zeigt, dass über zwei Drittel von den Elektrokleingeräten stammen (68.4 %). Dies ist zu fast 100 % den in Vorschaltgeräten für Leucht- röhren verbauten PCB-haltigen Kondensatoren zuzuschreiben. Etwa ein Viertel des Umweltnutzens fällt bei den Elektrogrossgeräten an (24.4 %). Auch hier liegt die Ursache bei den PCB-haltigen Kondensatoren aus den langlebigen Grossgeräten. Die Kühlgeräte sowie die nicht VREG-Fractionen (hauptsächlich gewerbliche Kühlgeräte) tragen zusammen 7.2 % zum Umweltnutzen bei. Leuchtmittel tragen nur 0.1 % zum Gesamt- nutzen bei.

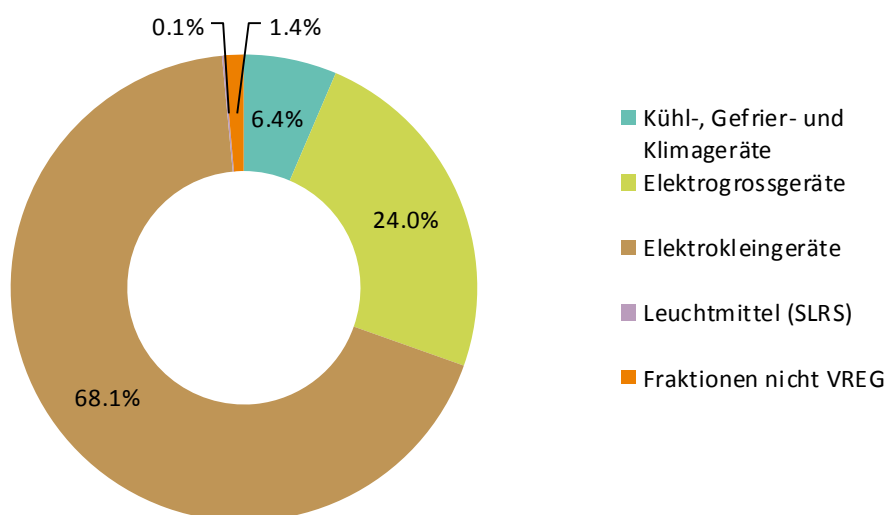


Abbildung 10: Der Nutzen des SENS Elektrogeräterecyclings aufgetrennt nach den Gerätekategorien.

4.2.2 Umweltnutzen pro Jahr

Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen die zeitliche Auflösung des generierten Umweltnutzens des SENS Elektrogeräterecyclings über die 25 Jahre auf. Ab 1993 bis 1998 wurden nur Kühl-, Gefrier-, und Klimage- räte gesammelt mit entsprechender Entsorgung der Kühl- und Treibmittel. Ab 1998 kamen dann Elektroge-

räte dazu und mit ihnen die kontrollierte Entsorgung der PCB-haltigen Kondensatoren. Dies ist der Grund für den starken Anstieg des Umweltnutzens im Jahr 1998. Ab 2001 nimmt der jährliche Umweltnutzen stetig ab aufgrund der anhaltenden Abnahme PCB-haltiger Kondensatoren in den Elektroaltgeräten.

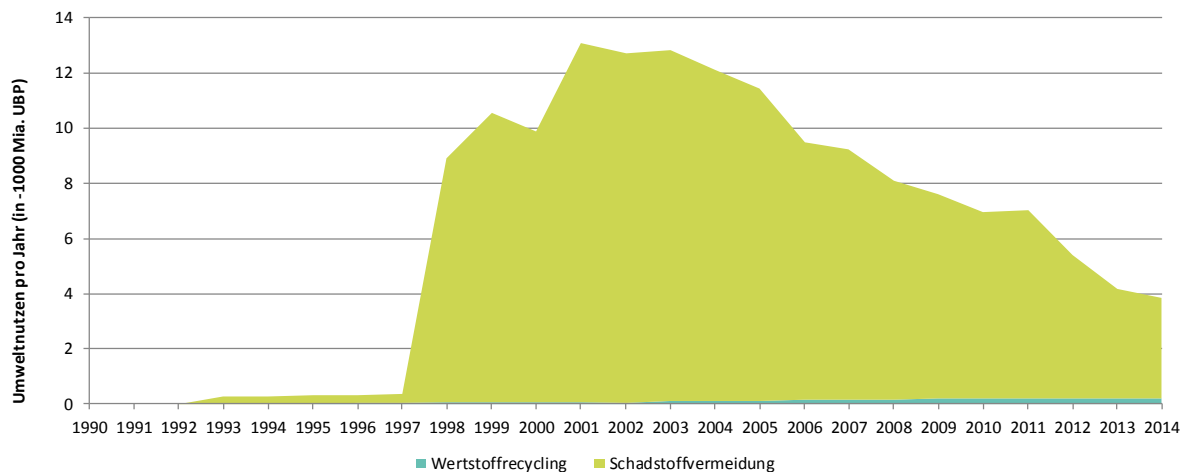


Abbildung 11: Der zeitlich aufgelöste Umweltnutzen des SENS Elektrogerätrecyclings.

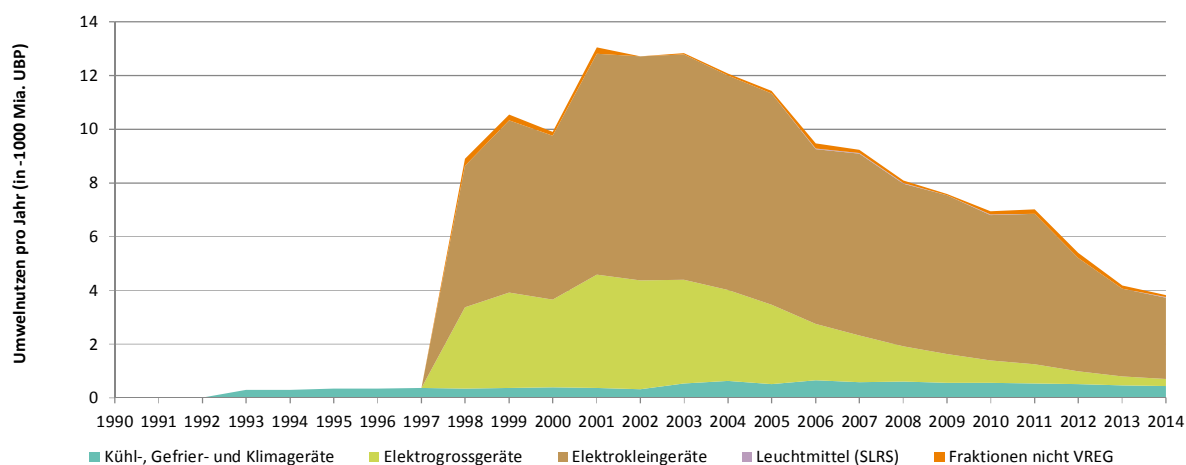


Abbildung 12: Der zeitlich aufgelöste Umweltnutzen des SENS Elektrogerätrecyclings, nach Gerätekategorien.

4.2.3 Relativer Umweltnutzen pro Tonne Gerät

Die Abbildung 13 zeigt den durchschnittlichen Umweltnutzen pro Tonne Gerät über 25 Jahre. Den weitaus grössten Nutzen weisen die Elektrokleingeräte auf (-569 Mio. UBP pro Tonne Gerät). Dies ist zu fast 100 % der korrekten Entsorgung der in Vorschaltgeräten für Leuchtströhen verbauten PCB-haltigen Kondensatoren zuzuschreiben, respektive der damit einhergehenden Vermeidung von PCB-Emissionen. Bei den Elektrogrossgeräten ist der relative Umweltnutzen tiefer (-106 Mio. UBP pro Tonne Gerät), obwohl er hauptsächlich ebenfalls durch die Vermeidung von PCB-Emissionen generiert wird. Der Umweltnutzen bei den Kühl-, Gefrier-, und Klimaanlageanlagen liegt bei -39 Mio. UBP pro Tonne Gerät. Hier liegt der Hauptgrund bei der Vermeidung von Kälte- und Treibmittelemissionen durch die korrekte Entsorgung der separierten Treibhaus-

gase. Das Abscheiden und korrekte Entsorgen von Quecksilber beim Leuchtmittelrecycling resultiert in einen Nutzen von -16 Mio. UBP pro Tonne Gerät, weil damit Quecksilberemissionen vermieden werden.

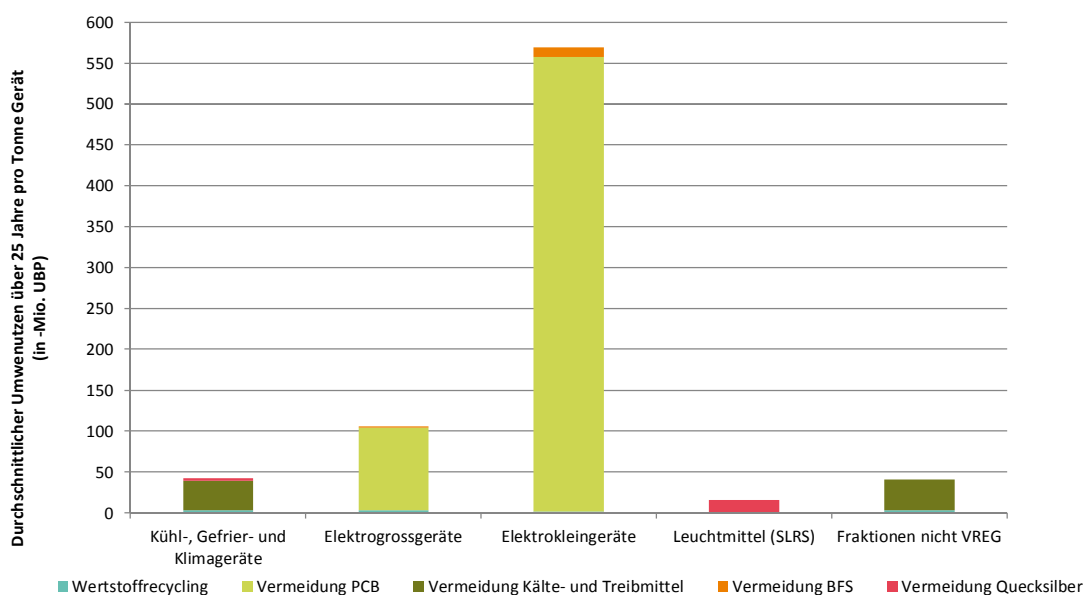


Abbildung 13: Der Umweltnutzen des SENS Elektrogerätrecyclings pro Tonne Gerät (25 Jahre Durchschnitt)

Da im Laufe der Zeit mit einer Abnahme der Menge verbauter PCB-haltiger Kondensatoren und auch anderer Schadstoffe (FCKW, Quecksilber etc.) zu rechnen ist (siehe dazu auch Kapitel 3.3.2), wird der relative Umweltnutzen heute tiefer liegen und auch anders über die Gerätekategorien verteilt sein. Trotzdem wird auch heute noch die Vermeidung von Schadstoffemissionen den weitaus grössten Anteil zum Umweltnutzen beitragen. Für eine genauere Abschätzung des aktuellen Umweltnutzens und seiner Ursachen wäre ein Update der Studie über PCB-Gehalte in Kondensatoren aus dem Jahr 2007 sehr hilfreich, wobei empfohlen wird, gleichzeitig auch PCB-Ersatzstoffe auf ihr Umweltbelastungspotenzial hin zu untersuchen.

4.3 Klimanutzen

4.3.1 Klimanutzen über 25 Jahre SENS

Insgesamt beläuft sich der Klimanutzen von 25 Jahren SENS Elektrogerätrecyclings auf netto 7.1 Mio. Tonnen CO₂-Äq (Abbildung 14). Der grosse Teil des Klimanutzens (93.4 %) stammt dabei von vermiedenen Schadstoffemissionen. Der Klimanutzen der rezyklierten Wertstoffe ist wesentlich tiefer. Der ökologische Aufwand für das Recycling (Transporte, Energieverbrauch Recyclingbetriebe, etc.) ist im Vergleich zum generierten Nutzen (Vermeidung Emissionen, weniger Primärmaterialherstellung) sehr klein. Um die Höhe des gesamten Klimanutzens besser einordnen zu können, seien im Folgenden Vergleiche aufgelistet, welche auch 7.1 Mio. Tonnen CO₂-Äq emittieren:

- Weltrundflüge für die ganze Bevölkerung des Kantons BE
- fünf Monate Strassenverkehr in der Schweiz.

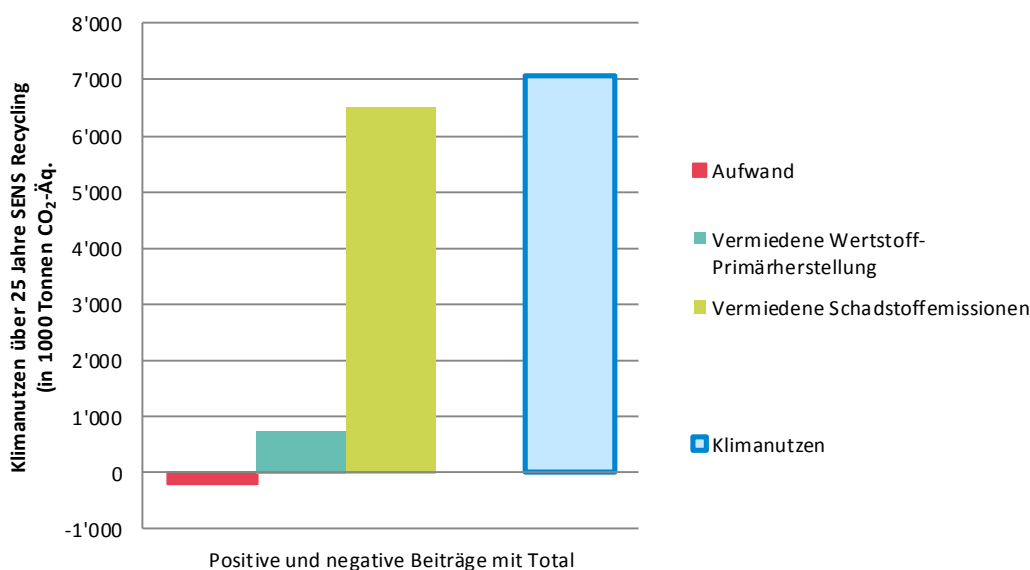


Abbildung 14: Der Klimanutzen des SENS Elektrogeräterecyclings ergibt sich aus der Summe der positiven und negativen Beiträge.

Unter den verhinderten Schadstoffemissionen trägt die korrekte Entsorgung von FCKW R11 (66.7 %) und FCKW R12 (26.4 %) am meisten zum Klimanutzen bei. (Abbildung 15).

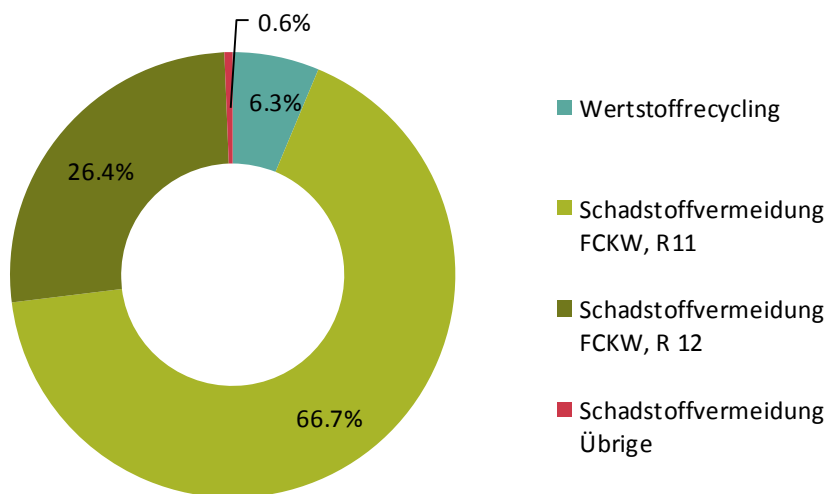


Abbildung 15: Anteil des Wertstoffrecyclings und der Schadstoffvermeidung am Klimanutzen des SENS Elektrogeräte-recyclings (Total 7.1 Mio Tonnen CO₂-Äq.).

Trotzdem ist Recycling für die aktuell zurückgewonnen Wertstoffe sinnvoll, da der Klimanutzen des Recyclings (Einsparung von Primärmaterial) den ökologischen Aufwand um ein Vielfaches überwiegt (mindestens um einen Faktor 2). Von den rezyklierten Wertstoffen (Abbildung 16) trägt die Rückgewinnung von Eisen, der massereichste Wertstoff, am meisten zum Klimanutzen des stofflichen Recyclings bei (41.7%). Die weiteren Anteile am Recyclingnutzen sind 21.9 % für Aluminium, 14.7 % für Stahl und jeweils 7.4 % für Kupfer und Zink. Die restlichen Wertstoffe wie Glas, Gold, Silber, Blei, Nickel, Ferromangan und Kunststoffe tragen zusammen noch 6.9 % zum Klimanutzen des stofflichen Recyclings bei.

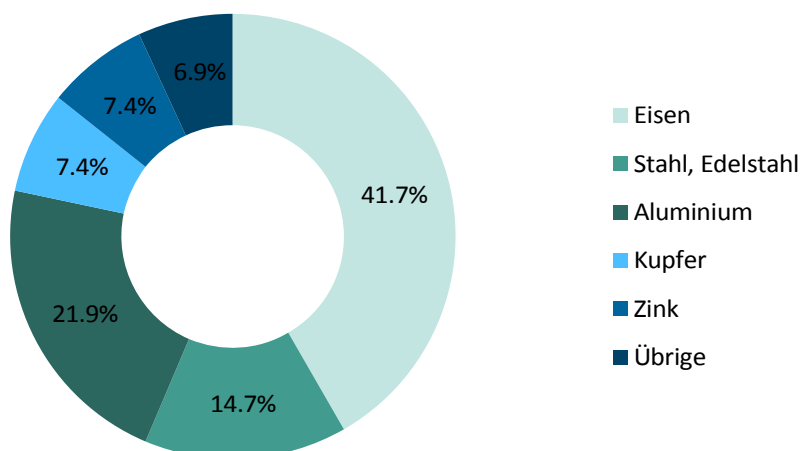


Abbildung 16: Wertstoffanteil am Klimanutzen des stofflichen Recyclings.

Zu beachten ist, dass sich die 100 % in dieser Darstellung auf die 6.3 % des gesamten Klimanutzens beziehen.

Wird nur der CO₂-Fussabdruck des Aufwands des SENS Elektrogerätecyclings betrachtet (Abbildung 17), fällt der grösste Teil auf die Sekundärherstellung der Wertstoffe (58.8 %), gefolgt vom Aufwand der Recyclingbetriebe (32.2 %). Der Transport der Geräte zu den Recyclingbetrieben sowie die korrekte Entsorgung der Schadstoffe tragen nur einen kleinen Teil zum CO₂-Fussabdruck des Aufwands bei.

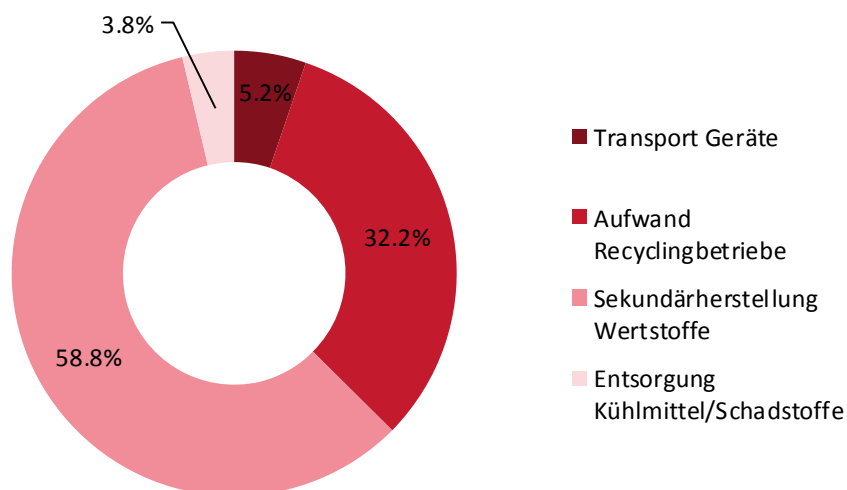


Abbildung 17: Anteil der Prozesse am CO₂-Fussabdruck des Aufwands des SENS Elektrogerätecyclings.

Eine Analyse der Klimanutzen bezüglich Gerätekategorien (Abbildung 18) zeigt, dass drei Viertel durch die fachgerechte Verarbeitung von Kühl-, Gefrier- und Klimageräten erzeugt (78 %). Nicht VREG-Fractionen, die in dieser Studie mit Kühlgeräten gleichgesetzt wurden, tragen rund 17 % zum Nutzen bei. Elektrogross- und -kleingeräte tragen zusammen nur 5 % bei. Der Anteil von Leuchtmitteln am Klimanutzen ist marginal.

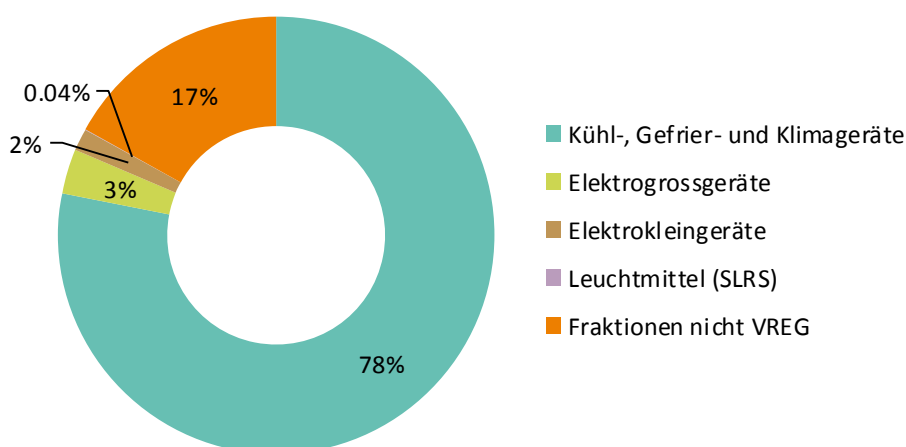


Abbildung 18: Der Klimanutzen des SENS Elektrogeräterecyclings, nach Gerätekategorien.

4.3.2 Klimanutzen pro Jahr

Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen den jährlichen Verlauf der vermiedenen Treibhausgasemissionen des SENS-Elektrogeräterecyclings. Ab 1993 bis 1998 wurden nur Kühl-, Gefrier- und Klimageräte gesammelt und rezykliert mit fachgerechter Entsorgung der Kühl- und Treibmittel. Ab 1998 kamen dann Elektrogeräte dazu sowie nicht VREG-Fraktionen (hauptsächlich gewerbliche Kühl- und Gefriergeräte). Aufgrund der stark schwankenden Anzahl verarbeiteter Geräte zum einen und teilweise uneinheitlichen Zuordnungen bei den älteren Daten zum andern ergeben sich relativ starke Schwankungen des Beitrags von nicht VREG Fraktionen.

Der grosse Einbruch des Klimanutzens im 2002 ist erklärbar mit der Einführung des neuen Finanzierungssystems der Entsorgung über die VREG. Mit der Aussicht auf eine kostenlose Entsorgung der Kühlgeräte ab 2003 wurden im Jahr zuvor unterdurchschnittlich viele Geräte noch kostenpflichtig entsorgt, weil wohl viele Geräte einfach gelagert wurden. Der unterdurchschnittliche Nutzen im 2005 und der überdurchschnittliche Nutzen im 2006 sind durch ein Unwetter im August 2005 erklärbar. Ein Betrieb, welcher damals fast die Hälfte der Kühlgeräte verarbeitete, wurde überschwemmt und musste die Verarbeitung für fast ein Jahr einstellen. Die Kühlgeräte wurden gelagert und im 2006 zusätzlich zur normal anfallenden Menge verarbeitet. Mit diesem Hintergrund lässt sich ein Plateau erkennen, welches sich von 2004 bis etwa 2012 erstreckt. In diesem Zeitraum dürfte die Zunahme der verwerteten Geräte kompensiert worden sein mit der Abnahme des Anteils an sich im Umlauf befindenden FCKW-haltigen Kühlgeräten. Ab 2012 überwiegt der letztere Effekt und der entsprechende jährliche Klimanutzen nimmt merklich ab.

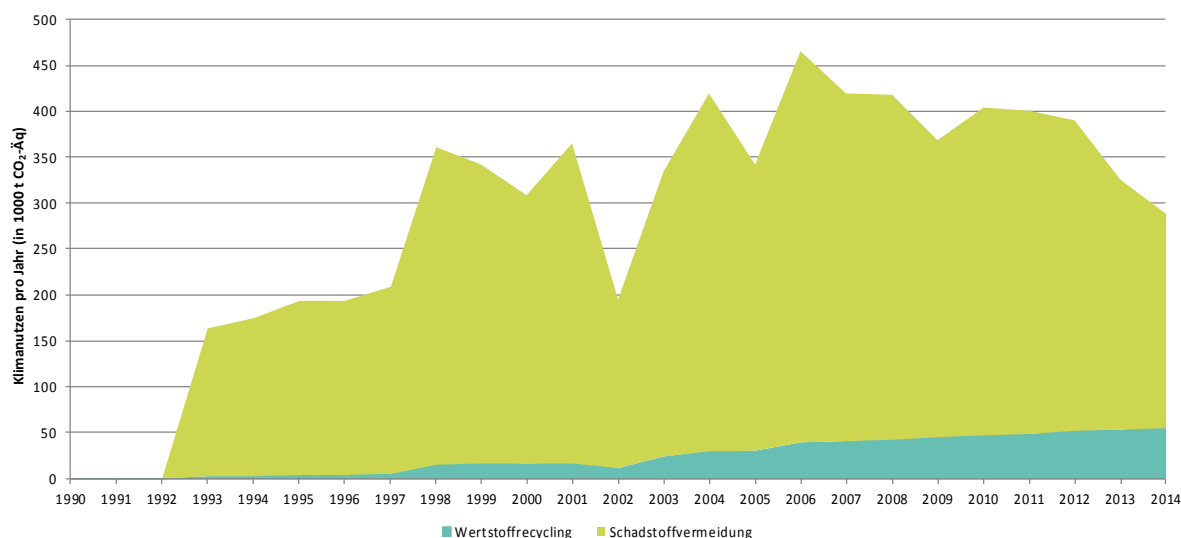


Abbildung 19: Die zeitlich aufgelöste Klimanutzen des SENS Elektrogeräterecyclings.

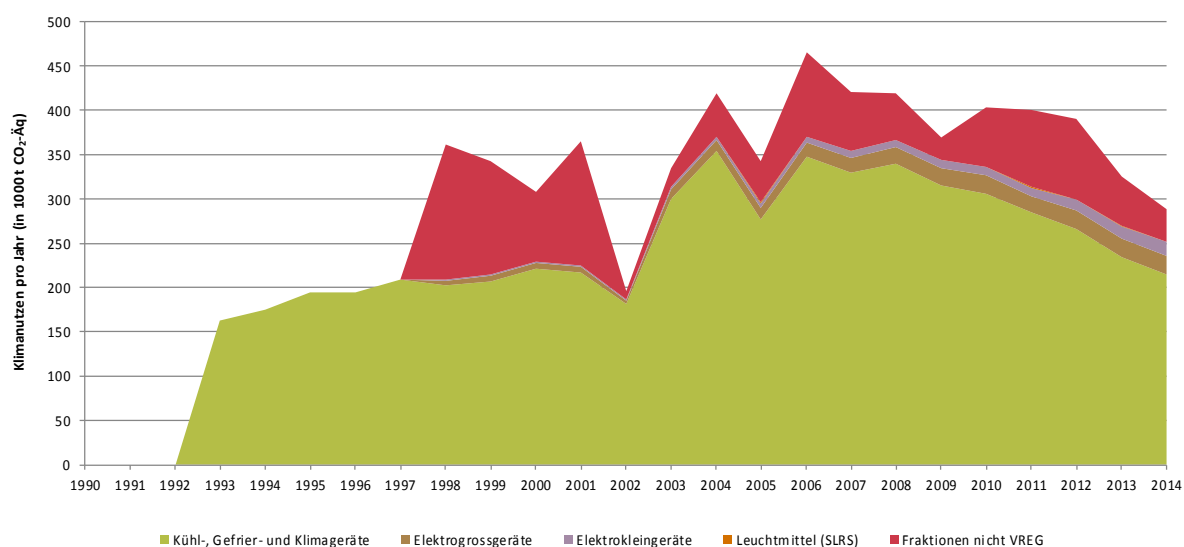


Abbildung 20: Die zeitlich aufgelöste Klimanutzen des SENS Elektrogeräterecyclings, nach Gerätekategorien.

4.3.3 Relativer Klimanutzen pro Tonne Gerät

Die Abbildung 21 zeigt den Klimanutzen pro Tonne Gerät über 25 Jahre. Den weitaus grössten Nutzen weisen die Kühl-, Gefrier- und Klimageräte auf (23.4 t CO₂-Äq pro Tonne Gerät) aufgrund der Vermeidung von FCKW-Emissionen. Da es sich bei der nicht VREG Fraktion hauptsächlich um gewerbliche Kühlgeräte handelt, ist der Klimanutzen pro Tonne Gerät ähnlich. Elektrogrossgeräte (0.7 t CO₂-Äq pro Tonne Gerät), Elektrokleingeräte (0.6 t CO₂-Äq pro Tonne Gerät) und auch Leuchtmittel (0.3 t CO₂-Äq pro Tonne Gerät) weisen einen um Grössenordnungen tieferen Klimanutzen auf.

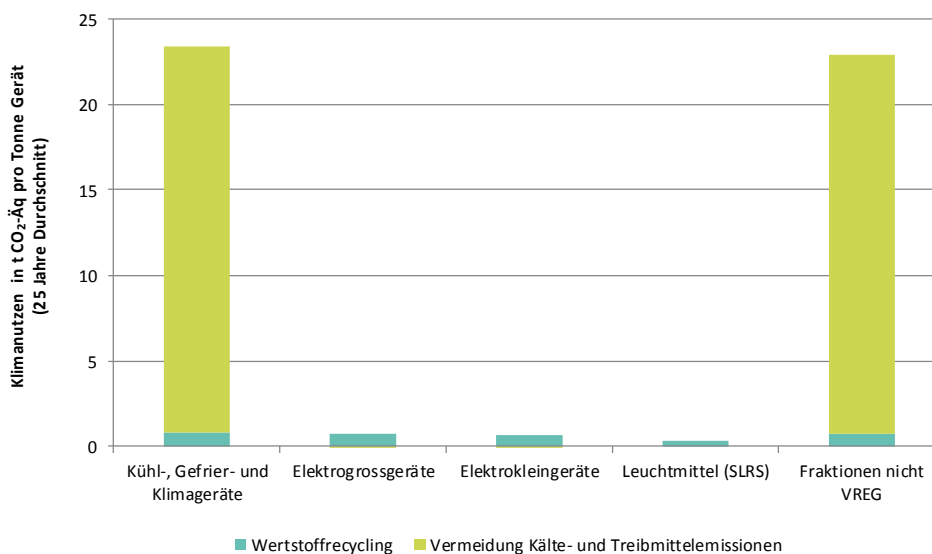


Abbildung 21: Der Nutzen des SENS Elektrogeräterecyclings pro Tonne Gerät (25 Jahre Durchschnitt)

Heute ist der Anteil der Kühlgeräte mit klimaschädlichen Stoffen wie FCKW kleiner, so dass eine Abnahme des Umweltnutzens durch die Abtrennung und fachgerechte Entsorgung dieser Schadstoffe resultiert (vgl. Abbildung 19). Diese Abbildung zeigt auch, dass im Jahr 2014 immer noch gut 80 % des Klimanutzens durch die Vermeidung von Emissionen von klimaschädlichen Gasen verantwortlich ist.

4.4 Methodvalidierung

4.4.1 Sensitivitätsanalyse Datenunsicherheit

In Abbildung 22 zeigen Fehlerbalken an, wie stark sich die verschiedenen Unsicherheitsfaktoren bei den Daten auf den Umweltnutzen auswirken. Der Umweltnutzen ist am weitesten sensitivsten auf die Unsicherheit der vermiedenen Emissionen des Schadstoffes PCB. Trotz dieser grossen Unsicherheit sind die Haupterkenntnisse der Ökobilanz robust, denn auch wenn der tiefe PCB-Extremwert zutreffen würde, bleibt der Schadstoff PCB der dominierende Beitrag zum Umweltnutzen. Aufgrund der Robustheit der Resultate bei der Variation des sensitivsten Parameters wird von einer detaillierten Diskussion der Sensitivitätsanalyse abgesehen.

Die Datenunsicherheiten der anderen Schadstoffe und des stofflichen Recyclings haben praktisch keinen Einfluss auf das Resultat.

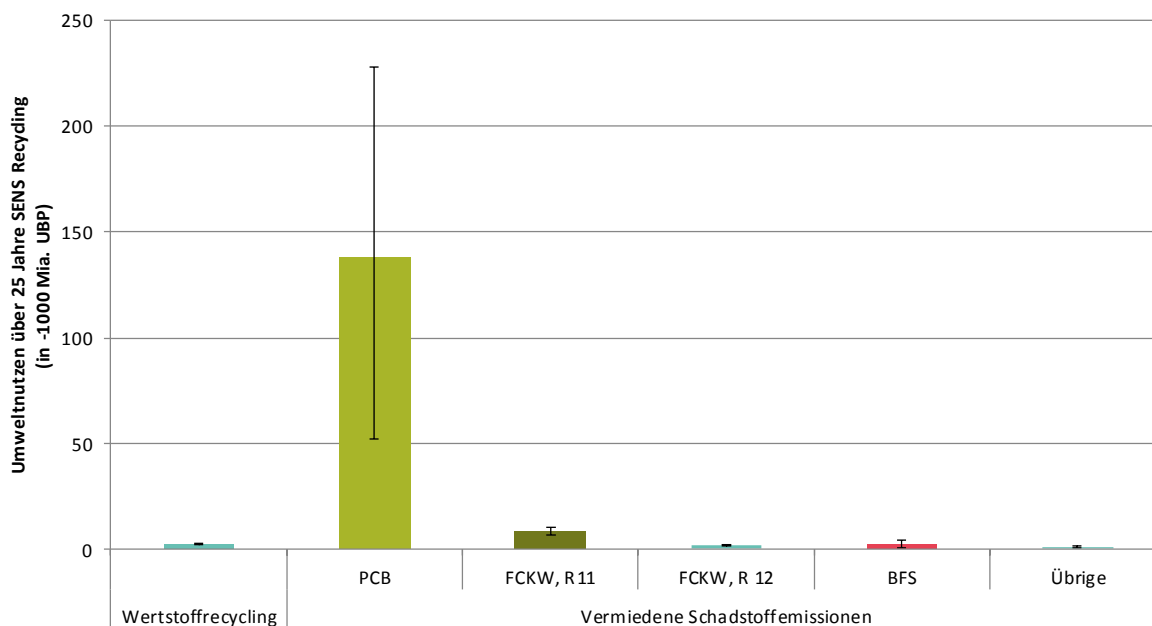


Abbildung 22: Einfluss der Datenunsicherheit auf den Umweltnutzen des SENS Elektrogeräterecyclings.

4.4.2 Second Opinion Analyse: Bewertungsmethode

Der Umweltnutzen des SENS Recyclingsystems wurde als Second Opinion Analyse auch mit der Bewertungsmethode ILCD v1.06 (European Commission-Joint Research Centre, 2011) berechnet (Hintergrund siehe Kapitel 2.4.2).

Die Resultate mit der Methode ILCD v.1.06 bestätigen die Erkenntnisse der mit der Methode der ökologischen Knappheit berechneten Ökobilanz. Vermiedene PCB-Emissionen sind auch bei der ILCD-Methode für den weitaus grössten Teil des Umweltnutzens bei (77 % im Vergleich zu 89 % mit UBP). Relativ etwas wichtiger wird die Vermeidung von Treibhausgasen aus Kühlgeräten bewertet (18 % im Vergleich zu 7 % mit UBP), während der Beitrag des Wertstoffrecycling zum Umweltnutzen auch marginal ist (1 % im Vergleich zu 1.6 % mit UBP). Insbesondere die Bestätigung der Resultate bezüglich der Bewertung der vermiedenen PCB-Emissionen als dominierende Einflussgrösse durch eine zweite, unabhängige Bewertungsmethode zeigt, dass die Berechnungen diesbezüglich als robust anzusehen sind.

4.5 Potenzialanalyse: Elektronikmetalle

Das zusätzliche Recycling von Elektronikmetallen bringt auch im betrachteten Extremfall von Elektrogeräten mit Computerleiterplatten mit einer verlustfreien Rückgewinnung der Metalle eine Steigerung des Umweltnutzens von unter 0.01 %. Betrachtet man nur den Umweltnutzen des Wertstoffrecyclings der Elektrogeräte, würde dieser um 0.2 % erhöht.

Zumindest aus Umweltsicht kann festgehalten werden, dass das zusätzliche Recycling von Elektronikmetallen nicht als prioritär angesehen werden kann, da die entsprechende Steigerung des Umweltnutzens für die SENS marginal ist.

5 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Ökobilanzstudie zeigt, dass die Stiftung SENS im Zusammenspiel mit Konsumenten, Hersteller/Importeuren, Handel, Leistungspartnern (Sammelstellen, Transporteure, Recycler) und Behörden während 25 Jahren Einsatz einen sehr hohen Umweltnutzen generiert hat. Durch die umweltfreundliche Entsorgung von Elektrogeräten wurde die jährliche Umweltbelastung der Schweiz um durchschnittlich etwa 4 % gesenkt, ein sehr beachtlicher Wert für eine einzelne Massnahme. Der mit etwa 90 % grösste Anteil an diesem Umweltnutzen ist der Vermeidung von PCB-Emissionen durch die fachgerechte Entsorgung von PCB-haltigen Kondensatoren zuzuschreiben.

Trotz der Tatsache, dass heute immer weniger PCB-haltige Kondensatoren in den Elektroaltgeräten zu finden sind, hat dieser Schadstoff gemäss unseren Berechnungen immer noch das höchste Umweltschadenpotential. Insbesondere die Kondensatoren in den Vorschaltgeräten von Leuchten, aber auch solche in Haushaltgrossgeräten müssen weiterhin mit grösster Sorgfalt entfernt und fachgerecht entsorgt werden. Für eine genauere Abschätzung des aktuellen Umweltnutzens wäre ein Update der Studie über PCB-Gehalte in Kondensatoren aus dem Jahr 2007 sehr hilfreich, wobei empfohlen wird, gleichzeitig auch PCB-Ersatzstoffe auf ihr Umweltbelastungspotenzial hin zu untersuchen.

Die Vermeidung von Emissionen von Schadstoffen wie FCKW, BFS und Quecksilber durch ihre kontrollierte fachgerechte Entsorgung wird anteilmässig immer wichtiger, weil diese Schadstoffe später als PCB verboten wurden und ihr Gehalt in den Geräten somit weit weniger schnell abnehmen wird.

Der Beitrag an den Umweltnutzen durch das Recycling von Wertstoffen wie Eisen, Kupfer, Aluminium etc. ist aufgrund der Dominanz der Schadstoffe noch sehr tief, steigt aber stetig an, insbesondere da immer weniger PCB in den Geräten vorhanden ist. Trotzdem ist das Recycling solcher Wertstoffe aus Umweltsicht sinnvoll, da der ökologische Nutzen (Ressourcenschonung, etc.) meist viel grösser ist als der Aufwand für die Aufbereitung (Energieverbrauch, etc.). Eine Potentialabschätzung für das zukünftige Recycling von in Spuren vorhandenen Elektronikmetallen hat des Weiteren ergeben, dass der dadurch generierte Umweltnutzen marginal ist, sogar wenn angenommen wird, dass die Elektrometall-Gehalte in Leiterplatten von Elektrogeräten gleich hoch wären wie in Computerleiterplatten.

Die Berechnung und Analyse des Klimanutzens, welchen die SENS in 25 Jahren erzeugte, zeigt, dass der weitaus grösste Teil durch die Vermeidung von FCKW-Emissionen durch das fachgerechte Rezyklieren von Kühlgeräten erreicht wird.

6 Literatur

Blaser, F., Castelanelli, S., Wäger, P., & Widmer, R. (2012). *Seltene Metalle in Elektro- und Elektronikaltgeräten - Vorkommen und Rückgewinnungstechnologien*. Bundesamt für Umwelt, Bern.

Böni, H., Wäger, P., Thiébaud, E., Du, X., Figi, R., Nagel, O., u. a. (2015). *Rückgewinnung von kritischen metallen aus Elektronikschrott am Beispiel von Indium und Neodym - Schlussbericht Projekt e-Recmet*. Im Auftrag des BAFU und Swico.

DIN EN 50625-1:2014-09. (2014). *Sammlung, Logistik und Behandlung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten (WEEE) Teil 1: Allgemeine Anforderungen an die Behandlung; Deutsche Fassung EN 50625-1:2014*.

Dinkel, F., & Kägi, T. (2014). *Ökobilanz Getränkeverpackungen - Gesamtbericht* (S. 133). Im Auftrag des Bundesamt für Umwelt. Abgerufen von <http://carbotech.ch/cms2/wp-content/uploads/Carbotech-LCA-Getraenkeverpackung-2014.pdf>

ECODOM. (2008). RAEE, IL CONTRIBUTO DEL RICICLO AGLI OBIETTIVI DI KYOTO - Bilancio energetico-ambientale del recupero di alcune tipologie di rifiuti elettrici ed elettronici. Abgerufen 24. September 2015, von http://www.ecodom.it/Portals/0/Documenti/studi_ricerche/Ricerca_ambienteitalia_Ecodom.pdf

ecoinvent. (2015). *ecoinvent 2015: Version 3.1*. Swiss Center for Life Cycle Inventories.

Eugster, M., Chappot, A.-C., & Kasser, U. (2007). *PCB in Kleinkondensatoren aus Elektro- und Elektronikaltgeräten, im Auftrag von SENS, SWICO und SLRS*.

European Commission-Joint Research Centre. (2011). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context*. (No. First edition November 2011. EUR 24571 EN.). Luxemburg: Publications Office of the European Union; 2011.

Friskhnecht, R., & Büsser Knöpfel, S. (2013). *Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der Ökologischen Knappheit - Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz* (No. 1330) (S. 256). Bern: Bundesamt für Umwelt.

ISO 14040. (2006). *Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines*. Geneva.

ISO 14044. (2006). *Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*. Geneva.

Morf, L., & Taverna, R. (2004). *Metallische und nichtmetallische Stoffe im Elektronikschrott - Stoffflussanalyse*. *Schriftenreihe Umwelt Nr. 374*. Im Auftrag des Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).

Morf, L., Taverna, R., Daxbeck, H., & Smutny, R. (2002). *Schriftenreihe Umwelt Nr. 338: Umweltgefährdende Stoffe - Ausgewählte polybromierte Flammschutzmittel - Stoffflussanalyse*. Bern.

PRé Consultants. (2015). *SimaPro 8 (Version 8.0.5)*. PRé Consultants.

SENS Recycling. (2015). *Aufwand und Kosten von Recyclingbetrieben*.

Starostina, T., & Ott, T. (2010). *Studie zur Transportabgeltung der SENS - Bericht zum Teil 1: Berechnung aktueller Kennzahlen*. Institut für Angewandte Simulation IAS, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW.

Anhang

A1 Resultate UBP in Tabellenform

Tabelle 12: Zusammensetzung des Umweltnutzens des SENS Recyclingsystems im Vergleich zum Szenario „ohne SENS“ in Umweltbelastungspunkten (UBP 13), pro Jahr

Jahr	Transport	Aufwand	Sekundärherstellung	Vermeidung	Vermeidung	Entsorgung	Vermeidung	Umweltnutzen
	Geräte	Recyclingbetriebe		Wertstoffentsorgung	Wertstoff-Primärherstellung	Kühlmit-tel/Schadstoffe	Emissionen (Kältemittel, Schadstoffe)	
In Mia. UBP pro Jahr								
1990	-	-	-	-	-	-	-	-
1991	-	-	-	-	-	-	-	-
1992	-	-	-	-	-	-	-	-
1993	0.05	0.58	2.4	-0.34	-13	0.09	-273	-283
1994	0.06	0.72	2.9	-0.42	-16	0.10	-285	-297
1995	0.07	0.89	3.6	-0.52	-20	0.11	-323	-339
1996	0.09	1.03	4.2	-0.60	-23	0.11	-311	-329
1997	0.09	1.12	4.6	-0.66	-25	0.12	-335	-355
1998	0.31	3.78	15.5	-1.52	-82	0.29	-8'845	-8'909
1999	0.35	4.27	17.3	-1.61	-91	0.30	-10'466	-10'537
2000	0.34	4.12	16.5	-1.51	-87	0.28	-9'827	-9'894
2001	0.36	4.35	17.5	-1.67	-93	0.31	-12'986	-13'058
2002	0.24	2.93	11.4	-1.11	-59	0.19	-12'679	-12'725
2003	0.50	6.06	24.1	-2.14	-126	0.36	-12'736	-12'833
2004	0.63	7.58	29.9	-2.65	-156	0.44	-11'956	-12'076
2005	0.65	7.88	30.5	-2.62	-159	0.41	-11'302	-11'423
2006	0.85	10.23	39.5	-3.52	-206	0.54	-9'305	-9'463
2007	0.88	10.65	40.9	-3.47	-213	0.52	-9'069	-9'232
2008	0.92	11.06	42.3	-3.58	-219	0.53	-7'914	-8'082
2009	0.97	11.77	45.1	-3.66	-234	0.55	-7'415	-7'594
2010	1.03	12.46	47.8	-4.02	-248	0.59	-6'761	-6'951
2011	1.04	12.57	47.8	-4.26	-248	0.58	-6'828	-7'019
2012	1.14	13.76	52.2	-4.66	-271	0.61	-5'181	-5'389
2013	1.16	13.97	52.1	-4.57	-269	0.56	-3'969	-4'175
2014	1.20	14.51	53.4	-4.70	-275	0.55	-3'611	-3'821
Total	13	156	601	-54	-3'132	8	-152'379	-154'785

A2 Resultate CO₂-Äq in Tabellenform

Tabelle13: Zusammensetzung des Klimanutzens des SENS Recyclingsystems im Vergleich zum Szenario „ohneSENS“ in CO₂-Äq Gemäss der Methode IPCC, GWP 100a, pro Jahr

Jahr	Transport	Aufwand	Sekundär-	Vermeidung	Vermeidung	Entsorgung	Vermeidung	Klimanutzen
	Geräte	Recycling-		Wert-	Wertstoff-	Kühlmit-	Emissionen	
		betriebe	herstellung	stoffentsor-	Primärher-	tel/Schadst	(Kältemittel,	
				gung	stellung	offe	Schadstoffe)	
	In t CO ₂ -Äq pro Jahr							
1990	-	-	-	-	-	-	-	-
1991	-	-	-	-	-	-	-	-
1992	-	-	-	-	-	-	-	-
1993	38	235	524	-676	-2'409	135	-161'211	-163'362
1994	47	290	646	-832	-2'968	144	-171'989	-174'662
1995	59	361	805	-1'037	-3'697	162	-190'844	-194'192
1996	67	416	927	-1'195	-4'261	160	-190'307	-194'192
1997	74	454	1'013	-1'305	-4'654	170	-204'519	-208'767
1998	248	1'530	2'975	-2'572	-16'385	311	-347'222	-361'115
1999	280	1'728	3'279	-2'649	-18'537	302	-326'374	-341'971
2000	270	1'664	3'117	-2'470	-17'816	274	-293'805	-308'766
2001	285	1'759	3'349	-2'778	-18'810	318	-348'845	-364'722
2002	192	1'186	2'201	-1'888	-12'479	194	-184'685	-195'279
2003	397	2'451	4'512	-3'438	-26'211	318	-312'708	-334'679
2004	496	3'063	5'602	-4'250	-32'694	397	-391'934	-419'320
2005	516	3'186	5'747	-4'115	-33'845	338	-313'731	-341'903
2006	670	4'138	7'636	-5'662	-43'807	492	-429'333	-465'866
2007	698	4'305	7'797	-5'411	-45'680	410	-382'076	-419'956
2008	725	4'473	8'053	-5'586	-47'359	420	-379'234	-418'508
2009	771	4'758	8'467	-5'548	-50'577	417	-327'196	-368'907
2010	817	5'040	9'054	-6'237	-53'455	479	-359'285	-403'587
2011	824	5'084	9'222	-6'875	-53'543	517	-356'178	-400'949
2012	902	5'564	10'028	-7'505	-58'565	538	-340'933	-389'971
2013	916	5'650	10'006	-7'292	-59'199	455	-275'983	-325'448
2014	951	5'869	10'294	-7'517	-61'246	430	-236'924	-288'143
Total	10'242	63'205	115'254	-86'838	-668'196	7'380	-6'525'313	-7'084'265

A3 Jährliche Menge Wertstoffe

Tabelle14: Menge Wertstoffe in Tonnen pro Jahr

Jahr	Eisen	Stahl, Edeldstahl	Aluminium	Kupfer	Zink	Silber	Gold	Blei	Nickel	Ferro-mangan	Kunststoffe	Glas	Total
1993	1'440	621	15	133	-	-	-	-	-	-	448	-	2'656
1994	1'775	765	18	163	-	-	-	-	-	-	552	-	3'273
1995	2'211	953	23	203	-	-	-	-	-	-	688	-	4'077
1996	2'548	1'098	26	234	-	-	-	-	-	-	793	-	4'699
1997	2'782	1'199	28	256	-	-	-	-	-	-	866	-	5'132
1998	10'886	2'450	319	758	371	0.0018	0.0018	0.029	0.15	2.4	1'655	-	16'441
1999	12'495	2'485	397	830	460	0.0023	0.0023	0.038	0.24	3.9	1'693	-	18'365
2000	12'095	2'254	400	783	447	0.0024	0.0024	0.039	0.29	4.8	1'576	-	17'559
2001	12'649	2'573	397	845	447	0.0023	0.0023	0.038	0.26	4.2	1'781	-	18'696
2002	8'494	1'558	286	536	264	0.0017	0.0017	0.028	0.33	5.4	1'215	-	12'358
2003	17'963	3'049	623	1'124	682	0.0038	0.0038	0.062	0.53	8.6	2'185	-	25'635
2004	22'483	3'686	793	1'387	847	0.0048	0.0049	0.080	0.74	11.9	2'700	-	31'908
2005	23'346	3'406	873	1'384	897	0.0054	0.0054	0.089	0.91	14.8	2'602	325	32'515
2006	29'715	4'813	1'076	1'820	1'097	0.0065	0.0065	0.107	1.05	17.0	3'599	850	42'116
2007	31'325	4'500	1'187	1'851	1'224	0.0073	0.0073	0.121	1.21	19.5	3'414	858	43'501
2008	32'577	4'527	1'250	1'901	1'260	0.0077	0.0078	0.128	1.35	21.9	3'524	873	45'041
2009	35'049	4'490	1'378	2'005	1'427	0.0086	0.0087	0.143	1.46	23.7	3'476	850	47'830
2010	36'852	5'080	1'415	2'148	1'442	0.0087	0.0088	0.145	1.51	24.5	3'931	873	50'872
2011	36'687	5'485	1'371	2'175	1'310	0.0084	0.0085	0.140	1.60	25.9	4'372	858	51'406
2012	40'319	5'883	1'517	2'368	1'430	0.0094	0.0095	0.156	1.84	29.9	4'772	742	56'303
2013	41'092	5'336	1'615	2'319	1'451	0.0102	0.0102	0.169	2.19	35.4	4'627	850	56'456
2014	42'712	5'231	1'712	2'359	1'473	0.0109	0.0110	0.180	2.49	40.4	4'771	867	58'280
Total	457'495	71'440	16'718	27'581	16'530	0.1020	0.1029	1.692	18.16	294.2	55'237	7'947	653'262
Anteil	70.0 %	10.9 %	2.6 %	4.2 %	2.5 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %	0.05 %	8.5 %	1.2 %	100 %

A4 Jährliche Mengen Schadstoffe

Tabelle15: Menge fachgerecht entsorgter Schadstoffe in Tonnen pro Jahr

Jahr	FCKW, R12	FCKW, R11	R600a	R134	Am- moniak	Cyclo- pentan	Öl	PCB	Queck- silber	Octa- DBPE	Deca- DBPE	TBBPA	Total
1993	4.51	36.20	4.77	-	0.08	-	21.94	-	0.06	-	-	-	67.50
1994	6.00	36.00	4.91	-	0.10	-	24.92	-	0.07	-	-	-	71.93
1995	5.89	41.63	5.26	-	0.12	-	27.93	-	0.09	-	-	-	80.83
1996	7.61	37.70	5.45	-	0.14	-	28.36	-	0.11	-	-	-	79.26
1997	8.14	40.62	5.89	-	0.15	0.24	29.39	-	0.12	-	-	-	84.43
1998	13.44	69.77	10.15	0.02	0.27	0.31	53.61	2.87	0.21	1.01	9.03	6.71	167.19
1999	13.04	64.68	9.78	0.03	0.27	0.75	52.85	2.66	0.20	1.22	10.93	8.09	164.3
2000	11.48	58.79	8.29	0.04	0.24	0.54	48.29	2.45	0.18	1.15	10.32	7.66	149.25
2001	13.20	70.74	9.80	0.06	0.28	1.12	54.66	3.26	0.21	1.12	10.05	7.47	171.76
2002	6.17	39.25	6.51	0.05	0.17	1.09	36.95	3.26	0.13	0.63	5.71	4.25	104.04
2003	10.40	66.53	10.00	0.16	0.32	2.28	55.70	3.20	0.24	1.60	14.46	10.79	175.44
2004	12.74	83.99	12.00	0.38	0.38	4.37	67.82	2.95	0.29	1.93	17.42	13.03	217.01
2005	9.80	68.01	10.34	0.64	0.34	7.08	55.46	2.80	0.30	1.90	17.84	13.38	187.63
2006	13.03	93.82	15.14	1.24	0.50	11.88	87.46	2.21	0.49	2.16	21.19	15.93	264.67
2007	14.19	77.67	12.39	1.47	0.44	11.97	64.07	2.17	0.45	2.23	22.90	17.26	226.87
2008	14.27	76.51	11.77	2.12	0.44	12.89	68.01	1.87	0.45	2.10	22.75	17.20	230.04
2009	13.69	62.53	11.51	3.44	0.42	16.61	71.93	1.75	0.43	2.16	24.95	18.92	228.02
2010	15.43	67.93	12.17	3.35	0.49	24.82	84.47	1.57	0.49	1.97	24.32	18.50	255.13
2011	14.54	67.88	12.40	7.32	0.56	31.04	94.44	1.59	0.54	1.58	21.24	16.21	268.91
2012	12.88	66.91	11.49	8.21	0.60	37.61	97.91	1.16	0.55	1.51	22.29	17.08	277.75
2013	10.96	52.73	8.12	7.61	0.53	35.05	80.02	0.87	0.51	1.31	21.64	16.65	235.6
2014	7.87	48.03	7.15	8.72	0.51	36.29	73.86	0.79	0.50	1.10	21.01	16.24	221.68
Total	239.28	1327.9	205.29	44.86	7.35	235.94	1280.1	37.43	6.6	26.68	298.05	225.37	3934.85
Anteil	6.1 %	33.7 %	5.2 %	1.1 %	0.2 %	6.0 %	32.5 %	1.0 %	0.2 %	0.7 %	7.6 %	5.7 %	100.0 %