

CustomLCA

# Ökobilanz 30 Jahre SENS eRecycling

**Ökologischer Nutzen des Elektrogeräte-Recyclings durch die SENS über 30 Jahre**

**Auftraggeberin**

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

**Autorenschaft**

Thomas Kägi & Flora Conte, Carbotech AG

Anzahl Seiten: 47

Basel, 15. Januar 2020

## Impressum

### **Titel**

Ökobilanz 30 Jahre Stiftung SENS

### **Auftraggeber**

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

### **Auftragnehmer**

Carbotech AG, Basel

### **Autoren**

Thomas Kägi, Flora Conte

### **Projektleitung/ Kontakt**

Thomas Kägi  
+41 44 444 20 17  
t.kaegi@carbotech.ch

### **Hinweis**

Für den Inhalt ist ausschliesslich der Auftragnehmer verantwortlich.

### **Version**

1.0 (Ökobilanz 30 Jahre SENS eRecycling v1.0.docx)

### **Datum**

15. Januar 2020

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Zusammenfassung</b>   | <b>5</b>  |
| <b>1 Ausgangslage und Zielsetzung</b>  | <b>7</b>  |
| 1.1 Einleitung   | 7         |
| 1.2 Zielsetzung  | 7         |
| <b>2 Vorgehen und Methodik</b>   | <b>9</b>  |
| 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  | 13        |
| 2.4 Methodvalidierung  | 15        |
| 2.4.1 Sensitivitätsanalyse: Datenunsicherheit  | 15        |
| 2.4.2 Second Opinion Analyse: Bewertungsmethode  | 15        |
| 2.5 Sachbilanz   | 15        |
| 2.5.1 Modellierung des Produktsystems  | 15        |
| 2.5.2 Annahmen und Berechnungsgrundlagen   | 16        |
| 2.6 Wirkbilanz   | 16        |
| 2.7 Bewertung der Umweltbelastungen  | 16        |
| <b>3 Datengrundlagen</b>   | <b>19</b> |
| 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  | 22        |
| 3.3.4 Weitere Schadstoffe  | 23        |
| <b>4 Resultate und Diskussion</b>  | <b>25</b> |
| 4.1 Stoffflüsse  | 25        |
| 4.1.1 Mengen an separierten Wertstoffen und Schadstoffen über 30 Jahre SENS eRecycling | 25        |
| 4.2 Umweltnutzen   | 28        |
| 4.2.1 Stoffflussdifferenz „SENS“ zu „ohne SENS“  | 28        |
| 4.2.2 Umweltnutzen über 30 Jahre SENS eRecycling                                       | 28        |
| 4.2.3 Umweltnutzen pro Jahr  | 31        |
| 4.2.4 Relativer Umweltnutzen pro Tonne Gerät   | 32        |
| 4.3 Klimanutzen  | 33        |
| 4.3.1 Klimanutzen über 30 Jahre SENS eRecycling  | 33        |
| 4.3.2 Klimanutzen pro Jahr   | 36        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.3.3 Relativer Klimanutzen pro Tonne Gerät     | 37        |
| 4.4 Vergleich zur früheren Studie               | 38        |
| 4.5 Methodvalidierung                           | 39        |
| 4.5.1 Sensitivitätsanalyse Datenunsicherheit    | 39        |
| 4.5.2 Second Opinion Analyse: Bewertungsmethode | 39        |
| <b>5 Schlussfolgerungen</b>                     | <b>40</b> |
| <b>6 Literatur</b>                              | <b>41</b> |

**Anhang 1 Resultate in Tabellenform**

**Anhang 2 Stoffflussmengen in Tabellenform**

# Zusammenfassung

Der Umweltnutzen von 30 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 zurückgewonnenen Materialien quantifiziert werden.

Für die Quantifizierung der Nutzen für Umwelt und Klima soll die Leistung der SENS über 30 Jahre mit einem Szenario „ohne SENS“ verglichen werden. Als funktionelle Einheit wurde die Entsorgung der Menge von Kühl-, Gefrier-, Klimageräten, Elektrogross- und Elektrokleingeräten sowie Leuchtmitteln und Photovoltaik gewählt, welche von 1990 bis 2019 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 fallen beim Szenario „ohne SENS“ gleich viele Geräte an 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 Ist-Zustandsanalyse „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.

Insgesamt beläuft sich der Umweltnutzen von 30 Jahren SENS Elektrogeräte-Recycling auf -150'000 Mio. UBP. Fast der ganze Nutzen (99.5 %) wird durch die Verhinderung von Schadstoffemissionen generiert, mit PCB als wichtigstem Schadstoff (91.4 %), gefolgt von FCKW R11 (5.2 %), FCKW R12 (1.0 %), bromierten Flammschutzmitteln (0.7 %) und dem Wertstoffrecycling (0.5 %). Das PCB stammt hauptsächlich aus den Kondensatoren von Elektrokleingeräten (insbesondere den Vorschaltgeräten von Leuchten) und Elektrogrossgeräten.

Der Klimanutzen von 30 Jahren SENS Elektrogeräte-Recycling beträgt 6.4 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. Der grosse Teil des Nutzens stammt dabei von der korrekten Entsorgung von FCKW R11 (67.7 %) und FCKW R12 (29.3 %). Diese Treibhausgase sind hauptsächlich in den verschiedenen Kühlgeräten wie Kühlschränken, Gefriertruhen und Klimageräten zu finden.

Über die betrachtete Zeitspanne wurden einerseits gut 830'000 Tonnen Wertstoffe verwertet, andererseits rund 3'700 Tonnen Schadstoffe kontrolliert entsorgt. Anteilsmässig die wichtigsten Wertstoffe waren Eisen (69.1 %), Stahl (10.3 %) und Kunststoffe (8.9 %). Wesentlich geringer waren die gesammelten Mengen an Kupfer (4.9 %), Aluminium (4.2 %), Zink (1.0 %) und Glas (1.5 %). Von den restlichen Wertstoffen fielen nur sehr geringe Mengen an (weniger als 0.1 %). Bei den Schadstoffen waren anteilmässig FCKW R11 (30.0 %) und Öl (31.9 %) die wichtigsten. Wesentlich tiefer lagen die gesammelten Mengen an FCKW R12 (5.9 %),

Cyclopentan (8.9 %), bromierten Flammschutzmitteln (5.7 %) und R600a (5.0 %). Von den restlichen Schadstoffen fallen nur geringe Mengen an (weniger als 1 %).

Die vorliegende Ökobilanzstudie zeigt, dass die Stiftung SENS im Zusammenspiel mit Konsumenten, Hersteller/Importeuren, Handel, Leistungspartnern (Sammelstellen, Transporteure, Recycler) und Behörden während 30 Jahren Einsatz einen sehr hohen Umweltnutzen generiert hat. Durch die umweltfreundliche Entsorgung von Elektrogeräten wurde die jährliche Umweltbelastung der Schweiz um durchschnittlich 3 % - 4 % gesenkt, ein sehr beachtlicher Wert für eine einzelne Massnahme.

Trotz der Tatsache, dass heute immer weniger PCB-haltige Kondensatoren in den Elektroaltgeräten zu finden sind, hat dieser Schadstoff gemäss unseren Ökobilanzberechnungen immer noch das höchste Umweltschadenpotential. Insbesondere die Kondensatoren in den Vorschaltgeräten von Leuchten, aber auch solche in Haushaltsgrossgeräten müssen weiterhin mit grösster Sorgfalt entfernt und fachgerecht entsorgt werden.

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

Der Anteil am Umweltnutzen durch das Recycling von Wertstoffen wie Eisen, Kupfer, Aluminium etc. ist aufgrund der Dominanz der Schadstoffe tief, steigt aber stetig an, insbesondere da immer weniger PCB in den Geräten vorhanden ist. Trotzdem ist das Recycling solcher Wertstoffe aus Umweltsicht sehr sinnvoll, da der ökologische Nutzen (Ressourcenschonung, etc.) für das Recycling meist viel grösser ist als der Aufwand für die Aufbereitung (Energieverbrauch, etc.).

Die Tatsache, dass der Umweltnutzen der SENS Jahr für Jahr geringer wird, hängt von der Umsetzung von strengeren Umweltnormen ab. Dies zeigt, dass SENS eRecycling zu einem Zeitpunkt, an dem viele Schadstoffe verboten wurden, aber im Elektroaltgeräten noch vorhanden waren, eine sehr wichtige Rolle wahrgenommen hat. Diese Rolle spielt SENS eRecycling weiterhin, auch wenn die besonders kritischen Schadstoffe seltener werden. Mit der Zeit schätzen wir ein, dass tendenziell mehr verschiedene Schadstoffe vorkommen werden, die relativ gesehen zu weniger Umweltbelastung führen, bei denen aber nichtsdestotrotz eine korrekte Entsorgung sehr relevant ist. Bei immer knapperen Ressourcen ist zudem das Wertstoffrecycling, das dank SENS eRecycling optimiert werden kann, immer wichtiger.

# 1 Ausgangslage und Zielsetzung

## 1.1 Einleitung

Bevor SENS eRecycling<sup>1</sup> 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 der VREG 2005 wurden schliesslich auch Leuchten und Leuchtmittel integriert. Für die Entsorgung von Elektronikgeräten existiert ein separates System (von Swico<sup>2</sup>). 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 REcyclingbetriebe, welche nach strengen Qualitätsvorgaben aus den EAG die Schadstoffe von den Wertstoffen separieren und entsorgen respektive rezyklieren.

## 1.2 Zielsetzung

Für das 30-Jahr-Jubiläum möchte SENS die im 2015 durchgeführte Ökobilanzstudie (Kägi & Franov, 2016) aktualisieren und den Umweltnutzen über die 30 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 30 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 30 Jahre mit einem Szenario „ohne SENS“ verglichen werden.

---

<sup>1</sup> Zuerst als Stiftung Entsorgung Schweiz (S.EN.S.)

<sup>2</sup> 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

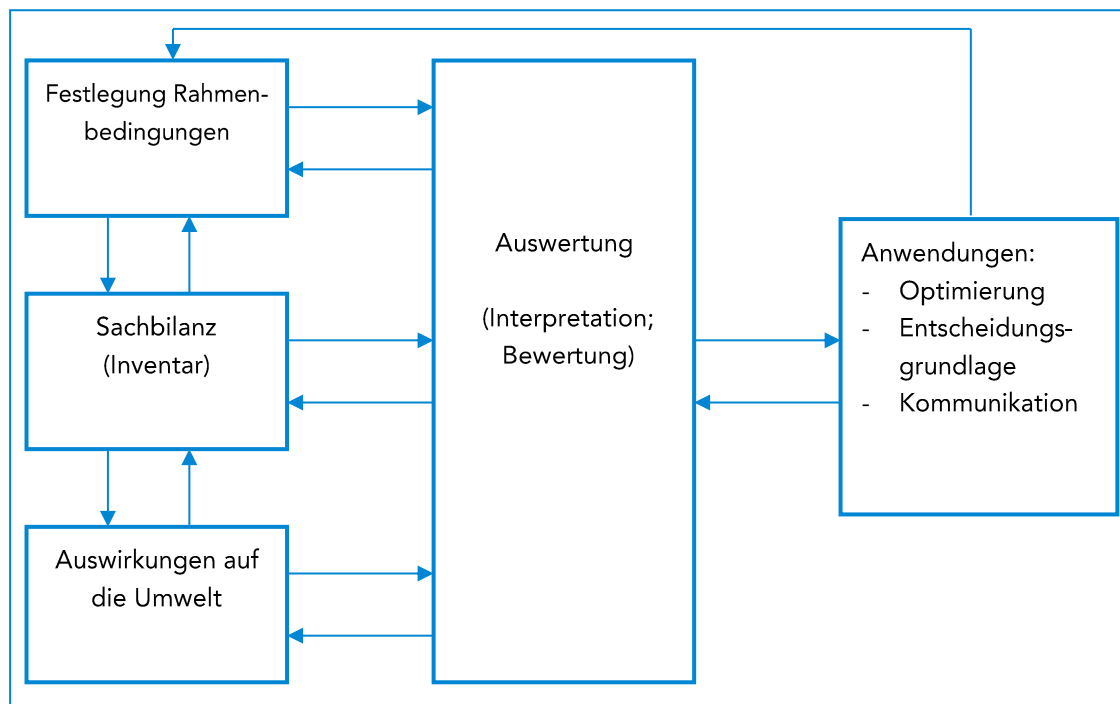
### 2.2 Vorgehen bei der Ökobilanzierung

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 30 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 30 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 2019 über SENS eRecycling 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 Ist-Zustandsanalyse „SENS“ und dem Szenario „ohne SENS“ berechnet. D. h. das Szenario „ohne SENS“ wurde als Basis (Referenzszenario) verwendet. Die Umweltleistung des SENS-Systems besteht somit aus dem über das Referenzszenario hinausgehenden Umweltnutzen.

#### Ist-Zustandsanalyse „SENS“

Das SENS Recyclingsystem beinhaltet die Sammlung, Sortierung, manuelle und mechanische Behandlung der Geräte sowie die fachgerechte Entsorgung von Schadstoffen wie Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), bromierte Flammschutzmittel (BFS) oder Polychlorierte Biphenyle (PCB) und die Wiederverwertung der Wertstoffe. Der Nutzen bei der Schadstoffvermeidung ergibt sich somit aus der Differenz zwischen dem Aufwand der fachgerechten 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. Dabei wurden folgendermassen vorgegangen:

- Die aus der Verarbeitung resultierenden Wertstoff- und Schadstofffraktionen wurden für jede Gerätekategorie mittels vorliegenden Testchargenverarbeitungen (Batchversuchen) der SENS ermittelt. Es handelt sich somit um die real verarbeiteten Mengen und nicht um das theoretisch erreichbare Potential.
- Einzig für PCB und BFS wurden weitere Studien verwendet, um die Mengen hochzurechnen. Dabei wurde davon ausgegangen, dass diese beiden Schadstoffe im SENS System praktisch vollständig fachlich korrekt entsorgt werden.

### Szenario „ohne SENS“

Für das Szenario „ohne SENS“ sind verschiedene Varianten denkbar: Von „es wird gar nichts rezykliert 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 fallen gleich viele Geräte an wie im Szenario „SENS“.
- Die eine Hälfte der Elektrogeräte wird ökonomisch optimiert, ohne Beachtung von speziellen Umweltauflagen, in unspezifischen Betrieben "verwertet". Die andere Hälfte wird von spezialisierten Fachbetrieben verwertet, jedoch – aufgrund fehlender externer Kontrollen – mit tieferen Rückgewinnungsraten bei Schadstoffen und Wertstoffen.
- Für alle gesammelten Geräte gilt: Bei der ökonomischen Optimierung werden die häufigsten Wertstoffe zu 90 % zurückgewonnen mit vollständiger Entweichung der Kältemittel, Treibmittel und Quecksilber.
- Bei der anderen Hälfte werden die häufigsten Wertstoffe 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 Verarbeitungsprozesse (Morf & Taverna, 2004) und Expertengesprächen:
  - Bei Geräten ohne Kunststoffrecycling (v.a. Elektrogrossgeräte):
    - 85 % der PCB-Inputs befinden sich nach der mechanischen Behandlung in den feinsten, nichtmetallischen Schredderfraktionen (häufig RESH und Staub) und 15 % befinden sich an metallischen Wertstoffen. Es wurde angenommen, dass PCB, verschmiert auf metallische Wertstoffe, zu 50 % in die Umwelt gelangen, sei dies während der Lagerung, der Aufbereitung zu Sekundärmaterialien oder während der darauffolgenden Nutzungsphase. Die andere Hälfte wird in der Metallschmelze vollständig zerstört. Der RESH und Staub wird in einer KVA entsorgt. Vom PCB-Anteil, welcher in eine KVA gelangt, wurde aufgrund fehlender Daten angenommen, dass 90 % vernichtet werden und 10 % in die Umwelt gelangen. Somit gelangen rund 16 % des PCB-Inputs in die Umwelt.
  - Bei Geräten mit Kunststoffrecycling (v.a. Elektrokleingeräte)
    - 85 % der PCB-Inputs befinden sich nach der mechanischen Behandlung im RESH und Staub oder Kunststofffraktionen, wobei die Annahme getroffen wurde, dass die Hälfte im RESH/Staub und die andere Hälfte an KS-Teilen haften bleibt. 15 % der PCB befinden sich zudem an metallischen Wertstoffen. Es wurde angenommen, dass PCB, verschmiert auf metallische Wertstoffe, zu 50 % in die Umwelt gelangen, sei dies während der Lagerung, der Aufbereitung zu Sekundärmaterialien oder während der darauffolgenden Nutzungsphase. Die andere Hälfte wird in der Metallschmelze vollständig zerstört. Der RESH und Staub wird in einer KVA entsorgt. Vom PCB-Anteil, welcher in eine KVA gelangt, wurde aufgrund fehlender Daten angenommen, dass 90 % vernichtet werden und 10 % in die Umwelt gelangen. Aus Batchversuchen und Stoffflussnachweisen schliessen wir, dass von der Kunststofffraktion rund 1/3 stofflich verwertet und 2/3 thermisch verwertet werden (davon wird wie beim RESH/Staub in KVA 10% in die Umwelt emittiert). Vom PCB Anteil, welcher ins Kunststoffrecycling gelangt, wird angenommen, dass die Hälfte davon über kurz oder lang in die Umwelt gelangt, sei dies während der Lagerung, der Aufbereitung oder Nutzungsphase. Somit gelangen rund 21.6 % des PCB-Inputs in die Umwelt.
  - Im Vergleich zur früheren Studie (Kägi & Franov, 2016), in der für Elektrogrossgeräte und -kleingeräte mit 24 % gerechnet wurde, liegt der Faktor nun tiefer aufgrund neueren Überlegungen.
- Hinsichtlich der bromierten Flammschutzmittel (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 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 Lebensweg 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

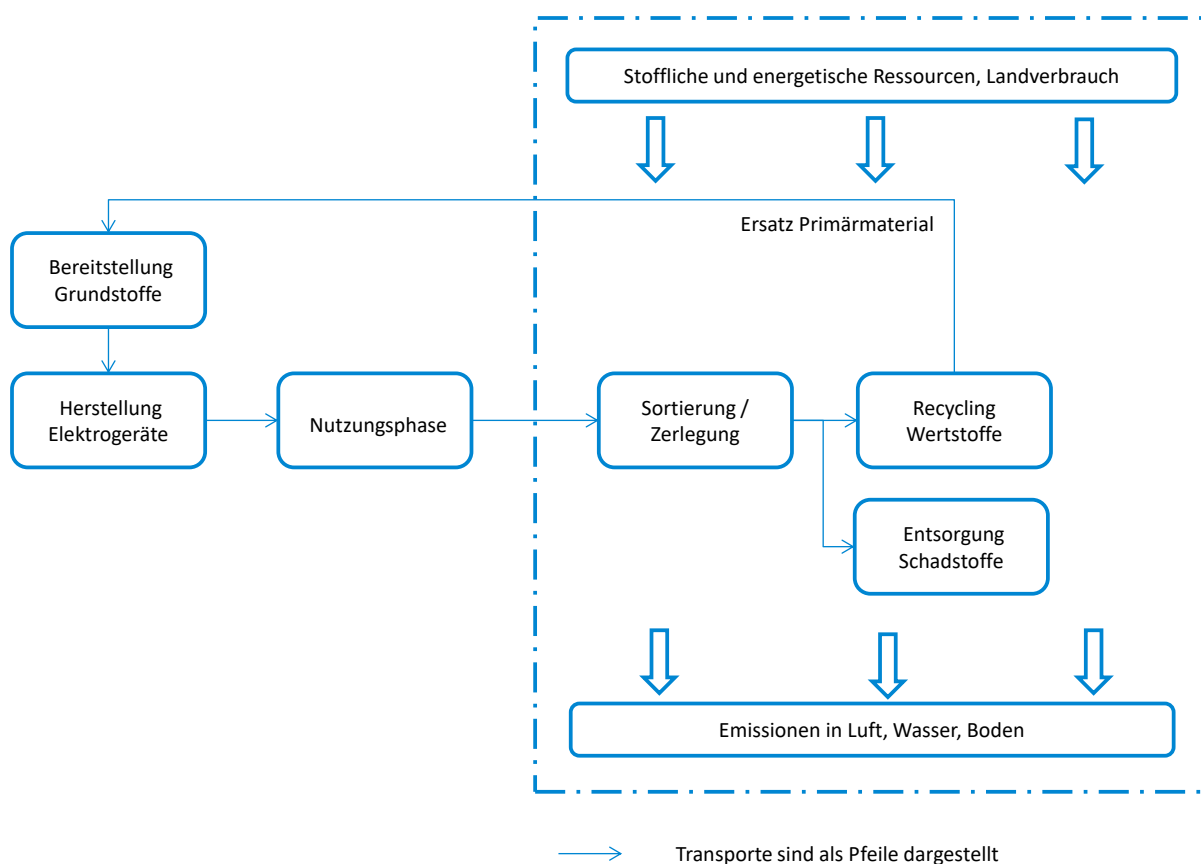
In das System der Ökobilanz eingeschlossen sind alle als relevant betrachteten Stoff- und Energieflüsse des Elektrogeräte-Recyclings ab dem Zeitpunkt, wo die Geräte von den Konsumenten entsorgt wurden.

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 30 Jahre. Für sämtliche Hintergrunddaten und Ökoinventare wurde die Ökoinventardatenbank ecoinvent v3.5 (ecoinvent, 2018) verwendet. Zeitliche Veränderungen der Inventare (ecoinvent v1.0 bis ecoinvent v3.5) 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 inklusive der (ausländischen) Aufbereitung der Wertstoffe.

## 2.4 Methodenvalidierung

Eine Methodenvalidierung 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.

### 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-haltigen Kondensatoren ausgehend von bekannten Eckwerten extrapoliert. Die ermittelten Werte variieren jedoch aufgrund analytischer Unsicherheiten stark (Eugster u.a. 2007). 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.

### 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 v1.10 (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.

## 2.5 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. CO<sub>2</sub>, FCKW, PCB u. a.

Die Sachbilanz wurde mit der Ökobilanz-Software SimaPro V9.0 (PRé Consultants, 2019) 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 V3.5 (ecoinvent, 2018) zurückgegriffen.

## 2.5.2 Annahmen und Berechnungsgrundlagen

Für sämtliche Prozesse wurden Grundlagendaten aus ecoinvent V3.5 (ecoinvent, 2018) verwendet. Dabei handelt es sich um Daten, welche einen sehr hohen Qualitätsstandard haben und auch international anerkannt sind.

### Annahmen

- Es wurde angenommen, dass die Wertstoffzusammensetzung der Geräte über die Jahre mehr oder weniger identisch blieb.
- 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.

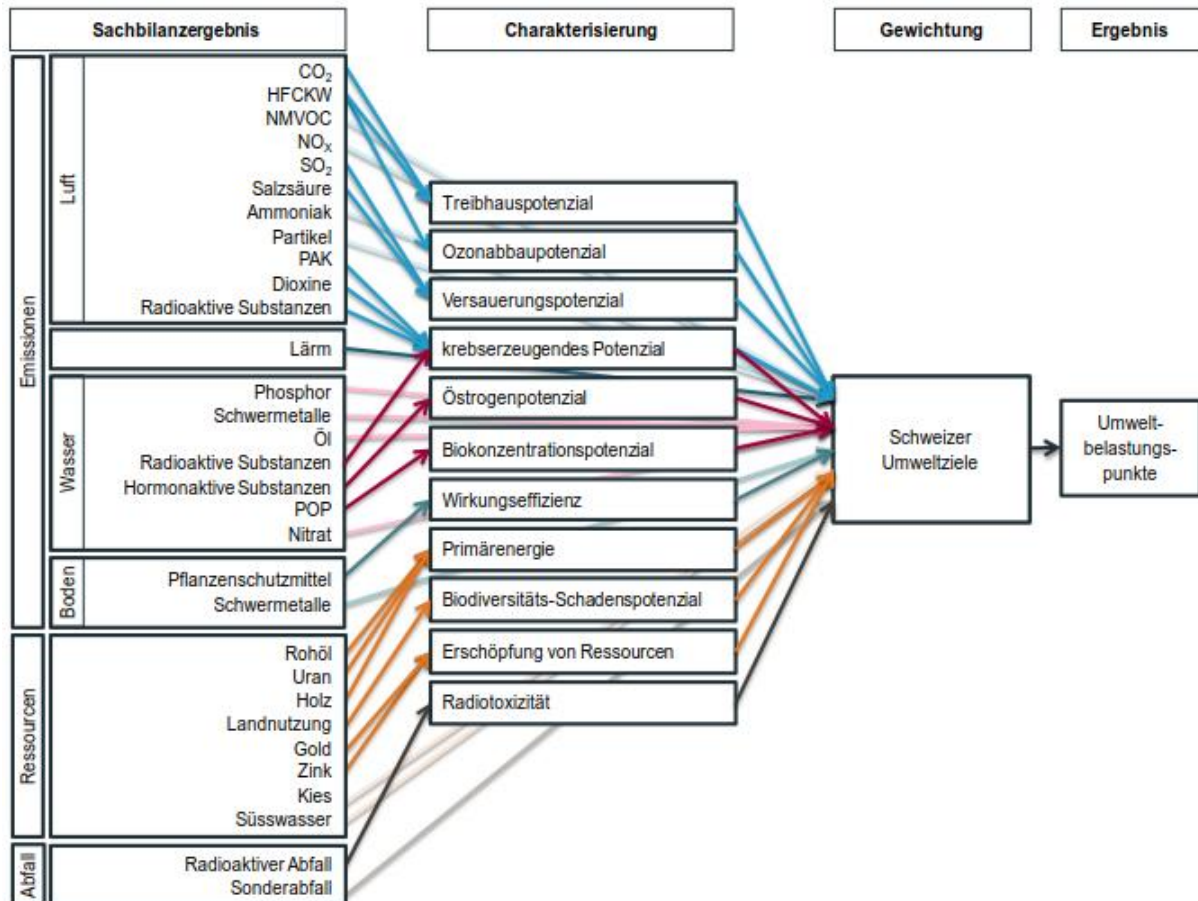


Abbildung 3: Grundschemata der Methode der ökologischen Knappheit (Grafik aus (Frischknecht & Büsser Knöpfel, 2013))

Im Rahmen einer Second Opinion Analyse wurde die Bewertungsmethode ILCD v1.10 (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 2 sind die verarbeiteten Mengen an Elektrogeräten gemäss SENS-Statistiken über 30 Jahre dargestellt. Die ersten Jahre nach der Gründung der SENS im Jahr 1990 wurde das Rücknahmesystem aufgebaut, sodass 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 in das Sammel- und Recyclingkonzept aufgenommen. Insgesamt wurden in den letzten 30 Jahren 1'186'000 Tonnen Geräte fachgerecht entsorgt. Der mengenmässig grösste Anteil machen die Elektrogrossgeräte aus (43 %) gefolgt von den Kühl-, Gefrier- und Klimageräten (28 %) und den Elektrokleingeräten (27%). Rund 1 % sind Leuchtmittel. Photovoltaik liegt bei 0.1 %

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 konservativen Transportdistanz von 73 km und mit der LKW-Kategorie 16-32 t, EURO5 gerechnet.

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

**Tabelle 2: Verarbeitete Menge Elektrogeräte in Tonnen pro Jahr**

| Jahr          | Kühl-, Gefrier- und Klimageräte | Elektrogrossgeräte | Elektrokleingeräte | Leuchtmittel (SLRS) | Photovoltaik | 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                   | 0            | 18'700           |
| 1999          | 6'500                           | 9'900              | 2'242              | 0                   | 0            | 20'400           |
| 2000          | 6'900                           | 9'600              | 3'003              | 0                   | 0            | 19'000           |
| 2001          | 6'700                           | 9'600              | 2'654              | 0                   | 0            | 20'600           |
| 2002          | 6'400                           | 5'600              | 3'383              | 0                   | 0            | 12'300           |
| 2003          | 11'600                          | 14'600             | 5'400              | 0                   | 0            | 32'400           |
| 2004          | 13'100                          | 18'100             | 7'500              | 0                   | 0            | 40'500           |
| 2005          | 11'400                          | 19'100             | 9'300              | 420                 | 0            | 42'120           |
| 2006          | 15'300                          | 23'400             | 10'700             | 1'100               | 0            | 54'700           |
| 2007          | 14'500                          | 26'100             | 12'300             | 1'110               | 0            | 56'910           |
| 2008          | 15'100                          | 26'800             | 13'800             | 1'130               | 0            | 59'130           |
| 2009          | 15'300                          | 30'400             | 14'900             | 1'100               | 0            | 62'900           |
| 2010          | 15'900                          | 30'700             | 15'400             | 1'130               | 0            | 66'630           |
| 2011          | 16'800                          | 27'800             | 16'300             | 1'110               | 0            | 67'210           |
| 2012          | 17'500                          | 30'300             | 18'800             | 960                 | 0            | 73'560           |
| 2013          | 16'700                          | 30'600             | 22'300             | 1'100               | 0            | 74'700           |
| 2014          | 17'150                          | 30'947             | 25'418             | 1'121               | 0            | 77'593           |
| 2015          | 18'100                          | 32'900             | 25'000             | 1100                | 54           | 77'100           |
| 2016          | 19'200                          | 32'500             | 27'900             | 1100                | 89           | 80'700           |
| 2017          | 19'400                          | 28'100             | 26'700             | 970                 | 305          | 75'170           |
| 2018          | 19'991                          | 34'236             | 27'550             | 1059                | 252          | 83'088           |
| 2019*         | 20'400                          | 33'800             | 33'800             | 1100                | 300          | 89'400           |
| <b>Total</b>  | <b>333'317</b>                  | <b>511'536</b>     | <b>324'565</b>     | <b>15.589</b>       | <b>1000</b>  | <b>1'186'007</b> |
| <b>Anteil</b> | <b>28 %</b>                     | <b>43 %</b>        | <b>27 %</b>        | <b>1 %</b>          | <b>0 %</b>   | <b>100 %</b>     |

\* geschätzte Mengen gemäss SENS

## 3.2 Erzeugte Fraktionen

### 3.2.1 Fraktionen pro Gerätekategorie

Die aus der Verarbeitung resultierenden Wertstoff- und Schadstofffraktionen wurden für jede Gerätekategorie mittels vorliegenden Testchargenverarbeitungen (Batchversuchen) der SENS ermittelt. Eine Übersicht über die durchschnittliche Wertstoffzusammensetzung der SENS-Geräte ist in Tabelle 3 ersichtlich.

**Tabelle 3: Durchschnittliche Fraktionsanteile der SENS-Geräte**

| Gruppierung         | Fraktionen       | Anteil in SENS-Geräten |
|---------------------|------------------|------------------------|
| Wertstofffraktionen | Eisen            | 48.3 %                 |
|                     | Stahl, Edelstahl | 7.2 %                  |
|                     | Aluminium        | 3.0 %                  |
|                     | Kupfer           | 3.4 %                  |
|                     | Zink             | 0.7 %                  |
|                     | Silber           | 0.000014 %             |
|                     | Gold             | 0.000008 %             |
|                     | Blei             | 0.00013 %              |
|                     | Nickel           | 0.00028 %              |
|                     | Ferromangan      | 0.1 %                  |
|                     | Kunststoffe      | 6.2 %                  |
|                     | Glas             | 1.1 %                  |
|                     | <b>Total</b>     | <b>69.9 %</b>          |

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 wie FCKW, FKW und dergleichen stammen aus den SENS-Statistiken und sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** 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. Kühl-, Gefrier- und Klimageräte enthalten keine PCB-haltigen Kondensatoren und sind deshalb in der Tabelle nicht aufgeführt.

Sowohl für 2017, 2006 (2008 für Leuchten) wie auch für das Jahr 1988 sind Daten zum Anteil PCB-haltiger Kondensatoren bekannt (Eugster u. a., 2007; Gasser, 2009; Savi u. a., 2019). In Kombination mit dem Gewichtsanteil von PCB-Öl in PCB-haltigen Kondensatoren, rund 15 %<sup>3</sup> (Savi u. a., 2019), und den Mengen an gesammelten Kondensatoren wurde in diesen Studien die PCB-Mengen für einzelne Gerätekategorien ermittelt. Basierend auf oben genannten Studien wurden folgende Annahmen getroffen:

- **Elektrogrossgeräte:** Die ersten 12 Jahre nach dem PCB-Verbot von 1986 stammen die gesammelten Geräte gänzlich aus der Zeit vor 1986, für welche eine PCB-Menge pro Menge Elektrogrossgeräte von 0.00414 % berechnet wurde (Berechnet aus Angaben von Eugster u. a., 2007). Ab 1998 wurde mit einer linearen Abnahme des PCB-Gewichtsanteils gerechnet bis zu 0.00113 % im Jahr 2006 (Berechnet aus Angaben von Eugster u. a., 2007). Ab 2006 wurde mit einer linearen Abnahme gerechnet bis zu einer PCB-Gewichtsanteil von 0.000765 % im Jahr 2017 (berechnet aus Angaben von Savi u. a., 2019). Die lineare Abnahme wurde für das Jahr 2018 und 2019 fortgesetzt.
- **Elektrokleingeräte (exkl. Leuchten):** Es wurde eine PCB-Menge pro Menge Elektrokleingeräten ohne Leuchten von 0.00065 % berechnet (gemäss Angabe von Eugster u. a. 2007) und eine lineare Abnahme ab 1988 (gemäss Eugster u. a., 2007) bis 2006 (0.0000096 % PCB-Gewichtsanteil im 2006 gemäss Eugster u. a., 2007) gerechnet. Ab 2006 wurde mit einer auslaufenden Abnahme nach der Formel  $x = y - y * 0.5$  gerechnet. Es wurde weiter angenommen, dass ab 2015 Elektrokleingeräte frei von PCB-haltigen Kondensatoren sind.
- **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, für welche eine PCB-Menge pro Menge Leuchten von 0.48 % (Angabe 1988 aus Eugster u. a., 2007). Ab 1998 wurde mit einer linearen Abnahme des PCB-Gewichtsanteils gerechnet bis auf 0.20% im Jahr 2008 (Berechnet aus Angabe von 2008 aus Gasser 2009 kombiniert mit dem PCB-Gehalt je Kondensator aus Savi u.a. 2019). Ab 2008 wurde mit einer linearen Abnahme gerechnet bis zur PCB-Menge von 0.011 % im Jahr 2017 (Berechnet aus Angaben von Savi u. a., 2019). Für die Jahre 2018 und 2019 wurde jeweils mit einer halb so hohen Menge wie das Vorjahr gerechnet.

Basierend auf diesen Annahmen wurden in den 30 Jahren über das SENS-System insgesamt 42.0 t PCB gesammelt und fachgerecht entsorgt. Dabei stammen 5.7 t von den Elektrogrossgeräten, und 36.2 t von den Vorschaltgeräten aus den Leuchten. Auf die übrigen Elektrokleingeräte entfallen nur 100 kg PCB.

### 3.3.3 Bromierte Flammschutzmittel

Die Hauptquelle für bromierte Flammschutzmittel (BFS) sind BFS-haltige Kunststoffe von Elektroklein- und Elektrogrossgeräten. Penta- und OctaBDPE<sup>4</sup> sind seit 2003 verboten. Andere BFS wie das TBBPA<sup>5</sup> oder DecaBDPE sind weiterhin im Einsatz. In der Schriftenreihe Umwelt Nr. 338 des BAFU über ausgewählte 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). Für Haushaltskleingeräte liegen der SENS für 2019 Analysen der BFS-Gehalte in BFS-haltigen KS-Fractionen vor. Kombiniert mit den ausgewiesenen Mengen an BFS-haltigen Kunststofffraktionen konnten so die BFS-Gehalte pro Tonne Geräte ermittelt werden. Aus der DIN-Norm über die Behandlung von Elektro- und

<sup>3</sup> In der Studie von (Savi u. a., 2019) wurde ein Flüssigkeitsanteil von rund 15 % des Gesamtgewichts der Kondensatoren ermittelt. Dies ist wesentlich weniger als frühere Schätzungen, welche von 30 % - 40 % ausgegangen sind.

<sup>4</sup> BDPE steht für Bromdiphenylether

<sup>5</sup> TBBPA steht für Tetrabrombisphenol A

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 pro Gerät mit den verarbeiteten Gerätemengen. Folgende Annahmen wurden dazu getroffen:

- Elektrokleingeräte:
  - Für OctaBDPE, DecaBDPE und TBBPA wurden bis und mit 1998 dieselben Konzentrationen verwendet wie in der Schriftenreihe Umwelt Nr. 338 (Morf u. a., 2002) angegeben (0.0074 % für OctaBDPE, 0.068 % für Deca BDPE und 0.053 % für TBBPA). Für 2019 wurden die ermittelten Mengen aus den Analysen verwendet (0.0000005 % für OctaBDPE, 0.0000007 % für DecaBDPE und 0.0000005 % für TBBPA). Für die Jahre dazwischen wurde eine lineare Extrapolation durchgeführt.
- Elektrogrossgeräte:
  - Aufgrund der BFS-Gehalte (0.0052 % für OctaBDPE, 0.045 % für Deca BDPE und 0.031 % für TBBPA) 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 234 t (in Kunststoffen enthaltene) BFS gesammelt und entsorgt. Der grösste Anteil macht das DecaBDPE mit 126 t aus, gefolgt vom TBBPA mit 93 t. 14 t fallen auf das seit 2003 verbotene OctaBDPE.

### 3.3.4 Weitere Schadstoffe

Zusätzlich wurde auch Quecksilber basierend auf den SENS-Statistiken über quecksilberhaltige Fraktionen berücksichtigt. Sowohl bei Leuchtmitteln wie auch bei Kühlschränken (Quecksilberschalter) wurde mit einer Durchschnittskonzentration gerechnet.

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 Cadmium, Asbest und Selen, da diese in SENS-Geräten nur in sehr geringen Mengen vorkommen.





## 4 Resultate und Diskussion

Kapitel 4.1 zeigt eine Übersicht über die Mengen an Wert- und Schadstoffen, welche durch das SENS-System in 30 Jahren rezykliert 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 über 30 Jahre SENS eRecycling

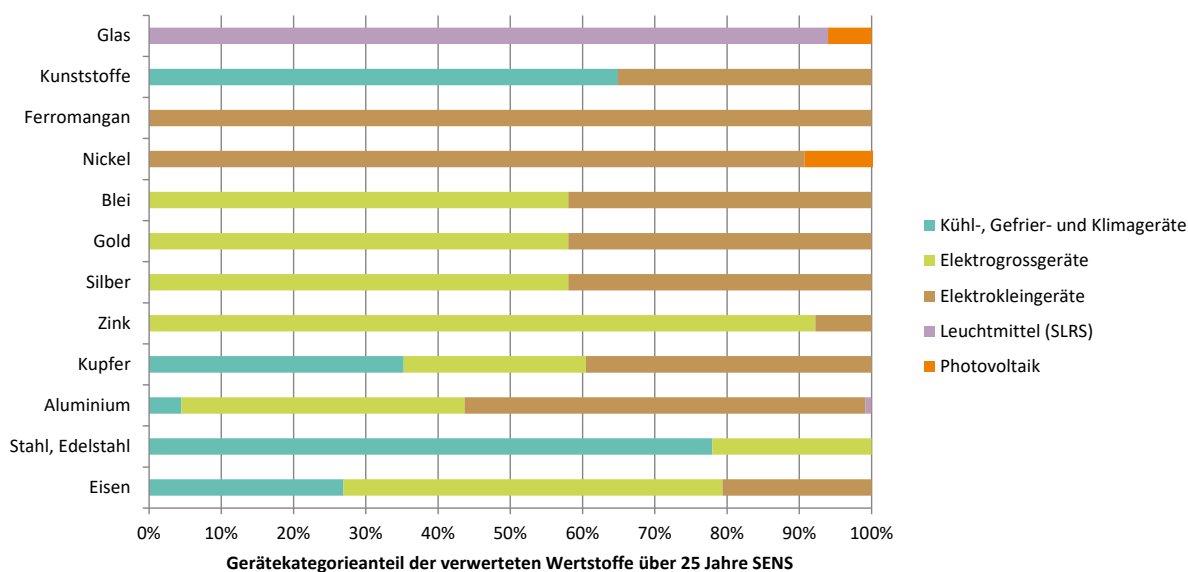
Die Menge an separierten Wertstoffen ist in Tabelle 4 dargestellt (eine jährliche Auflistung ist in Anhang **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu finden). Insgesamt wurden gut 837'000 Tonnen Wertstoffe verwertet. Mengenmässig am relevantesten sind die Wertstoffe Eisen (69.1%), Stahl (10.3%) und Kunststoffe (8.9%). Wesentlich geringer sind die gesammelten Mengen an Kupfer (4.9%), Aluminium (4.2%), Zink (1.0%) und Glas (1.5%). Von den restlichen Wertstoffen fallen nur sehr geringe Mengen an (weniger als 0.1%).

**Tabelle 4: In 30 Jahren verwertete Mengen Wertstoffe**

| Wertstoffe       | Mengen           | Anteil      |
|------------------|------------------|-------------|
| Eisen            | 573'070 t        | 69.1%       |
| Stahl, Edelstahl | 85'298 t         | 10.3%       |
| Aluminium        | 35'113 t         | 4.2%        |
| Kupfer           | 40'287 t         | 4.9%        |
| Zink             | 8'061 t          | 1.0%        |
| Silber           | 0.16 t           | 0.000019%   |
| Gold             | 0.16 t           | 0.000019%   |
| Blei             | 2.7 t            | 0.00032%    |
| Nickel           | 35 t             | 0.0042%     |
| Ferromangan      | 516 t            | 0.06%       |
| Kunststoffe      | 73'993 t         | 8.9%        |
| Glas             | 12'823 t         | 1.5%        |
| <b>Total</b>     | <b>829'199 t</b> | <b>100%</b> |

Die Menge von 670'000 Tonnen verwertetem Eisen und Stahl über 30 Jahre würde reichen, um neun Golden Gate Brücken zu bauen. Die 40'000 Tonnen Kupfer ergäben ein Starkstromleitungskabel, welches 2 Mal die Erde umspannt. Die 35'000 Tonnen Aluminium reichen aus, um 200 Stück des grössten Passagierflugzeugs der Welt (Airbus A380) zu bauen.

Die Herkunft der Wertstoffe ist in Abbildung 4 illustriert. Das Glas stammt grösstenteils von den Leuchtmit- teln. Kunststoffe werden zum grossen Teil aus Kühl, Gefrier- und Klimageräten zurückgewonnen sowie aus Elektrokleingeräten. Ferromangan stammt ausschliesslich aus den Batterien in den Elektrokleingeräten. Nickel stammt zum grössten Teil aus Elektrokleingeräten und teilweise aus Photovoltaikpanels. Gold und Silber werden aus den Leiterplatten der Elektrogross- und Elektrokleingeräten zurückgewonnen. Zink stammt fast ausschliesslich aus den Elektrogrossgeräten. Kupfer, Stahl und Eisen stammt von allen Geräte- kategorien ausgenommen den Leuchtmitteln. Aluminium stammt v.a. aus Elektrogross- und Elektroklein- geräten.



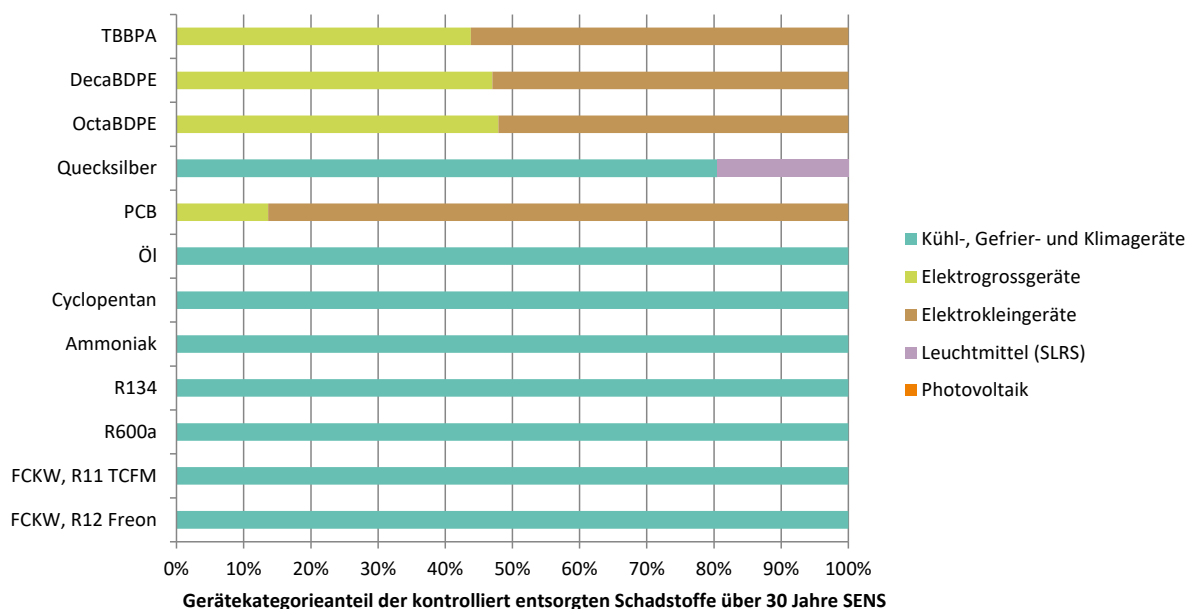
**Abbildung 4: Anteil der SENS Gerätekategorien für die jeweiligen verwerteten Wertstoffe**

Die Mengen an separierten und kontrolliert entsorgten Schadstoffen sind in Tabelle 5 dargestellt (eine jähr- liche Auflistung ist in Anhang **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu finden). Insgesamt wurden rund 3'700 Tonnen Schadstoffe kontrolliert entsorgt. Mengenmässig am relevantesten sind die Schadstoffe FCKW R11 (30.0 %) und Öl (31.9 %). Wesentlich tiefer liegen die gesammelten Mengen an Cyclopentan (8.9 %), FCKW R12 (5.9 %), bromierten Flammenschutzmitteln (5.7 %) und R600a (5.0 %). Von den restlichen Schadstoffen fallen nur geringe Mengen an (weniger als 1 %).

**Tabelle 5: In den letzten 30 Jahren kontrolliert entsorgte Schadstoffe**

| Jahr                            | Total         | Anteil        |
|---------------------------------|---------------|---------------|
| FCKW, R12                       | 244 t         | 5.9%          |
| FCKW, R11                       | 1'236 t       | 30.0%         |
| R600a                           | 206 t         | 5.0%          |
| R134                            | 38 t          | 0.9%          |
| Ammoniak                        | 8.5 t         | 0.2%          |
| Cyclopentan                     | 366 t         | 8.9%          |
| Öl (aus Klima- und Kühlgeräten) | 1'318 t       | 31.9%         |
| PCB                             | 42.0 t        | 1.0%          |
| Quecksilber                     | 8.0 t         | 0.2%          |
| OctaBDPE                        | 14 t          | 0.3%          |
| DecaBDPE                        | 126 t         | 3.1%          |
| TBBPA                           | 93 t          | 2.3%          |
| <b>Total</b>                    | <b>3'700t</b> | <b>100.0%</b> |

Die Herkunft der Schadstoffe ist in Abbildung 5 illustriert. BFS stammen vor allem aus Elektrokleingeräten und –grossgeräten. PCB stammt aus den Vorschaltgeräten von Leuchten, welche der Kategorie Elektrokleingeräte zugeordnet sind und von Elektrogrossgeräten. Quecksilber stammt zu einem grossen Teil aus den Quecksilberschaltern der Kategorie Kühl-, Gefrier- und Klimageräte und zu einem geringeren Teil aus Leuchtkörpern (Kategorie Leuchtmittel. Die Kühl- und Treibmittel kommen aus der Kategorie der Kategorie Kühl-, Gefrier- und Klimageräte.



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

## 4.2 Umweltnutzen

### 4.2.1 Stoffflussdifferenz „SENS“ zu „ohne SENS“

Die Grundlage für die Berechnung des Umweltnutzens des SENS Elektrogeräterecyclings ist die Differenz zwischen der Wertstoff- und Schadstoffmengen der Ist-Zustandsanalyse „SENS“ und des Szenarios „ohne SENS“ (siehe Tabelle 6 und Tabelle 7). Zum einen wird der Nettonutzen des Wertstoffrecyclings bestimmt, indem der ökologische Aufwand aus den Sammeltransporten, den Sortieraufwänden und der Wiederaufbereitung der Wertstoffe dem ökologischen Nutzen, welcher entsteht, da weniger Primärmaterial produziert werden muss, gegenübergestellt. 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 gegenübergestellt wird.

**Tabelle 6: 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, Edelstahl | Aluminium | Kupfer | Zink | Silber | Gold  | Blei | Nickel | Ferro-mangan | Kunststoffe | Glas  |
|---------------|--------|------------------|-----------|--------|------|--------|-------|------|--------|--------------|-------------|-------|
| <b>Tonnen</b> | 57'307 | 8'530            | 3'511     | 4'029  | 806  | 0.016  | 0.016 | 0.27 | 3.5    | 51.6         | 7'399       | 1'282 |

**Tabelle 7: 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.

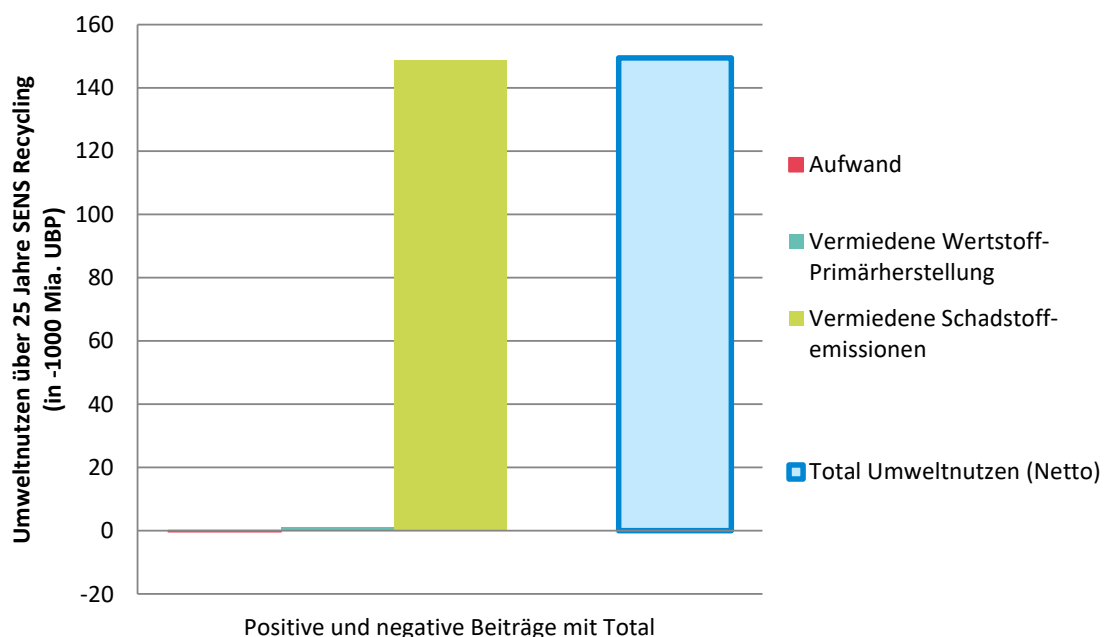
|               | FCKW, R12 | FCKW, R11 | R600a | R134 | Ammoniak | Cyclopentan | Öl  | PCB | Quecksilber | Octa-DBPE | Deca-DBPE | TBBPA |
|---------------|-----------|-----------|-------|------|----------|-------------|-----|-----|-------------|-----------|-----------|-------|
| <b>Tonnen</b> | 184       | 926       | 155   | 28.1 | 6.37     | 276         | 994 | 8.8 | 5.99        | 0.014     | 0.12      | 0.14  |

### 4.2.2 Umweltnutzen über 30 Jahre SENS eRecycling

Insgesamt beläuft sich der Umweltnutzen von 30 Jahren SENS Elektrogeräterecyclings auf netto 150'000 Mia. vermiedene UBP<sup>6</sup>, wobei fast der ganze Nutzen (99.5 %) 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 150'000 Milliarden UBP entsprechen:

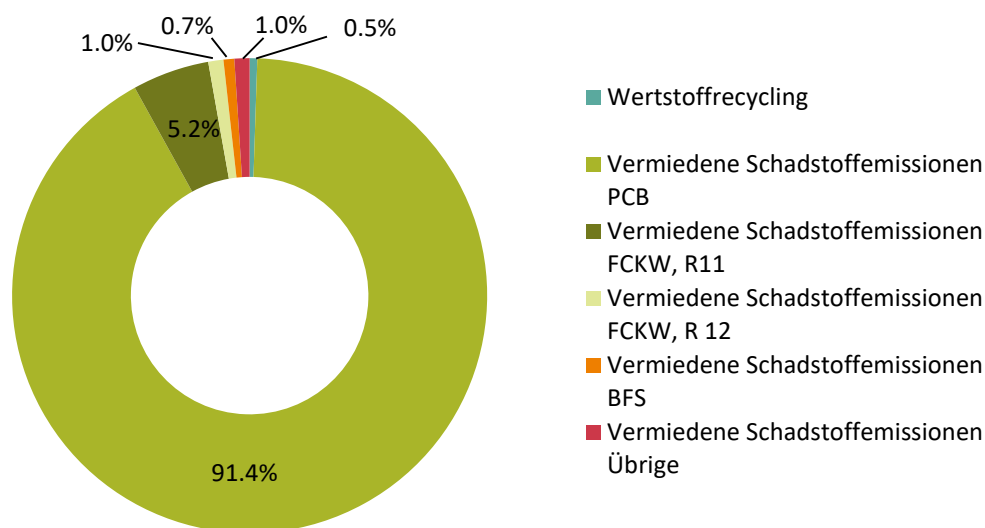
- Umweltfussabdruck der gesamten Schweizer Bevölkerung (8 Mio. Einwohner) in 11 Monaten. Dies entspricht einer Senkung der jährlichen Umweltbelastung der Schweiz um durchschnittlich 3 % - 4 %.
- Umweltnutzen, welcher durch die Verwendung von bleifreiem Benzin in der Schweiz über 9 Jahre generiert wird.

<sup>6</sup> In Grafiken als negative UBP dargestellt.



**Abbildung 6: Der Umweltnutzen des SENS Elektrogeräterecyclings 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 (91.4%), gefolgt von der korrekten Entsorgung von FCKW R11 (5.2%), FCKW R12 (1.0%) und BFS (0.7%) (Abbildung 7).

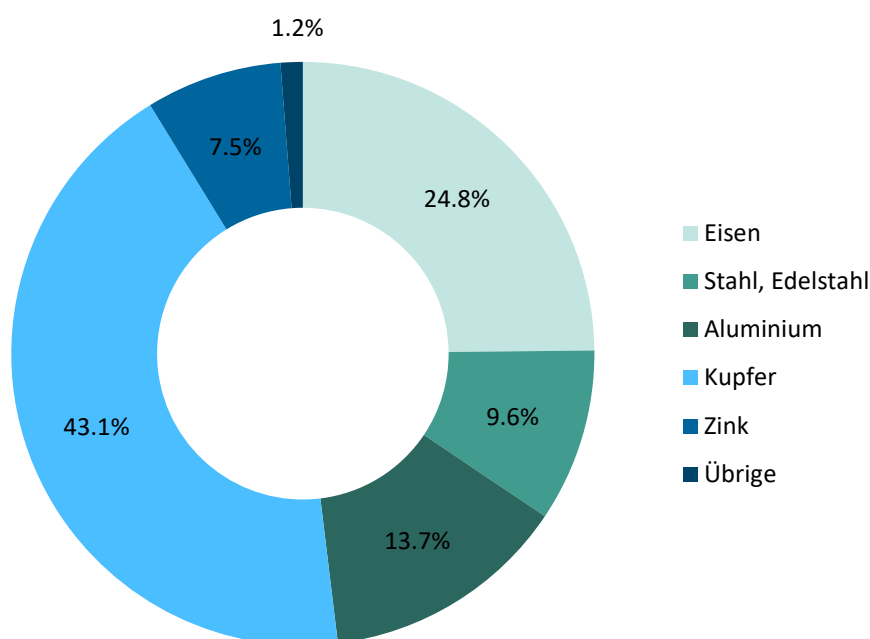


**Abbildung 7: Anteil des Wertstoffrecyclings und der Schadstoffvermeidung am Umweltnutzen des SENS Elektrogeräterecyclings.**

Die 8.8 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.

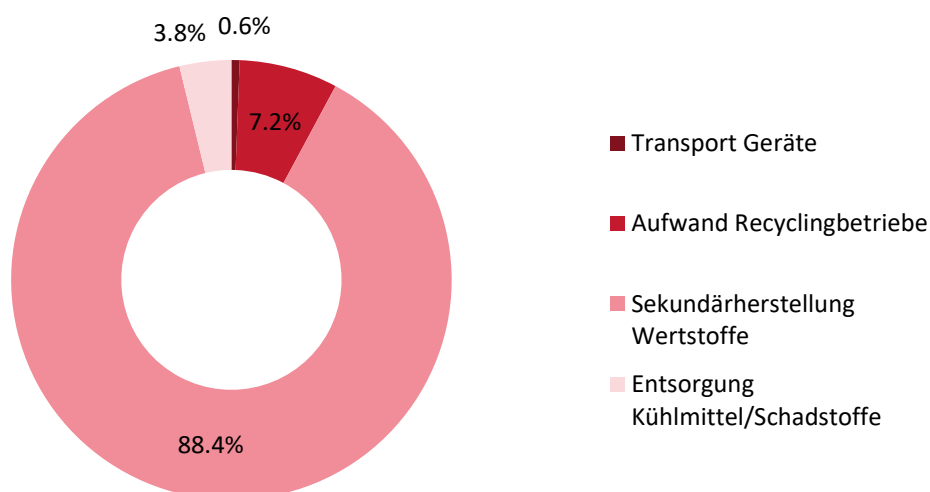
PCB sind seit 1986 verboten und werden weltweit als eine der zwölf problematischsten Stoffgruppen gelistet.

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 (43.1 % des Recyclingnutzens), gefolgt vom Eisen (24.8 %). Die weiteren Anteile am Recyclingnutzen sind 13.7 % für Aluminium, 9.6 % für Stahl und 7.5 % für Zink. Die restlichen Wertstoffe wie Gold, Silber, Blei, Nickel, Ferromangan und Kunststoffe tragen zusammen gerade noch 1.2 % zum Umweltnutzen des stofflichen Recyclings bei.



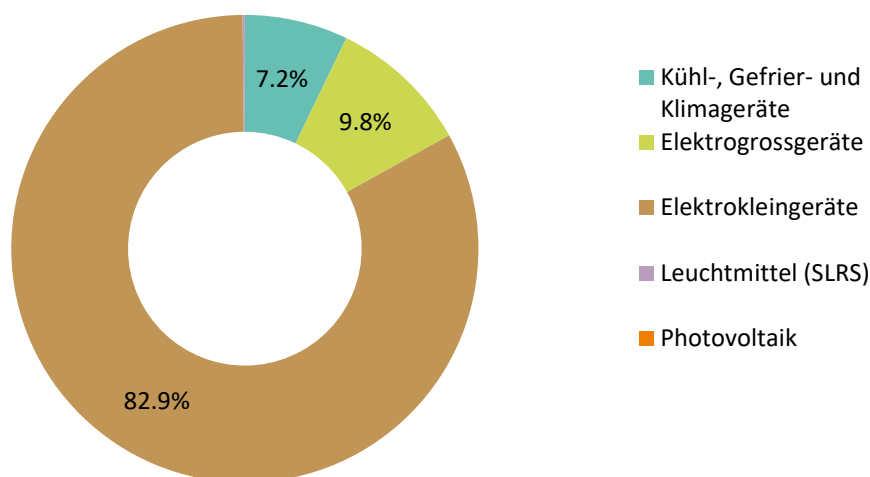
**Abbildung 8: Beitrag der Wertstoffe am Umweltnutzen durch das stoffliche Recycling.**

Wird nur der Umweltfussabdruck des Aufwands des SENS Elektrogeräte Recyclings betrachtet (Abbildung 9), fällt der grösste Teil auf die Sekundärherstellung der Wertstoffe (88.4%), gefolgt vom Aufwand der Recyclingbetriebe (7.2 %). Der Transport der Geräte zu den Recyclingbetrieben sowie die korrekte Entsorgung der Schadstoffe tragen nur einen 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 82.9 % von den Elektrokleingeräten stammen. Dies ist zu fast 100 % den in Vorschaltgeräten aus Leuchten verbauten PCB-haltigen Kondensatoren zuzuschreiben. 9.8 % des Umweltnutzens fällt bei den Elektrogrossgeräten an. Auch hier liegt die Ursache bei den PCB-haltigen Kondensatoren aus den langlebigen Grossgeräten. Die Kühlgeräte tragen 7.2 % zum Umweltnutzen bei. Leuchtmittel und Photovoltaik tragen weniger als 0.1 % zum Gesamtnutzen bei.

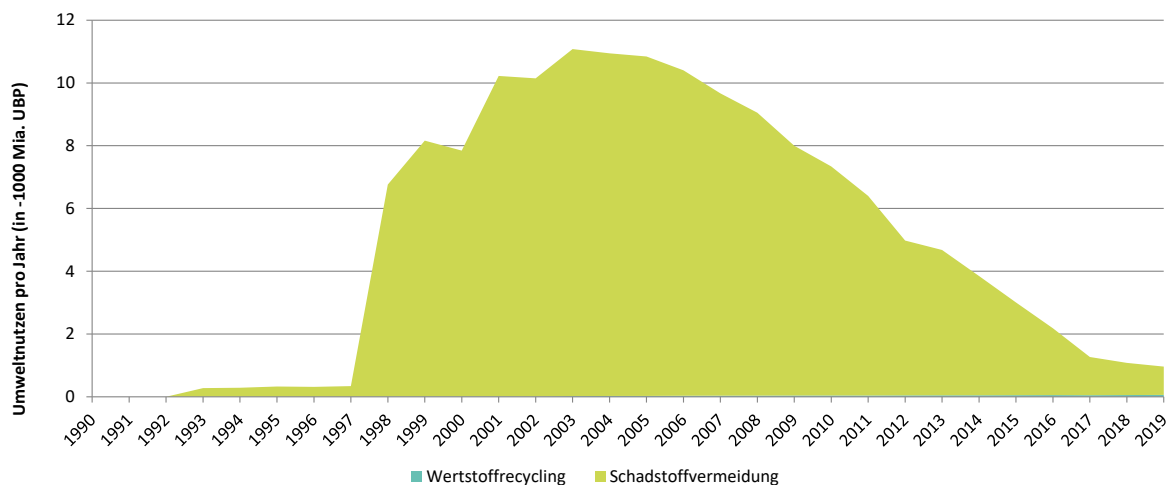


**Abbildung 10: Der Nutzen des SENS Elektrogeräterecyclings aufgetrennt nach den Gerätekategorien.**

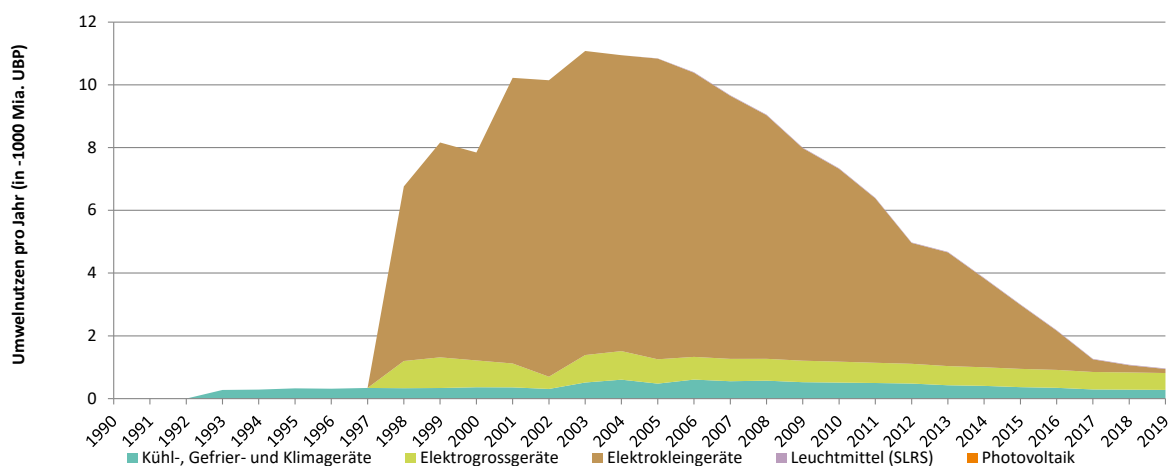
### 4.2.3 Umweltnutzen pro Jahr

Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen die zeitliche Auflösung des generierten Umweltnutzens des SENS Elektrogeräterecyclings über die 30 Jahre auf. Ab 1993 bis 1998 wurden nur Kühl-, Gefrier-, und Klimageräte gesammelt mit entsprechender Entsorgung der Kühl- und Treibmittel. Ab 1998 traten Elektrogeräte zum SENS System bei und mit ihnen die kontrollierte Entsorgung der PCB-haltigen Kondensatoren. Dies ist

der Grund für den starken Anstieg des Umweltnutzens im Jahr 1998. Ab 2003 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.**



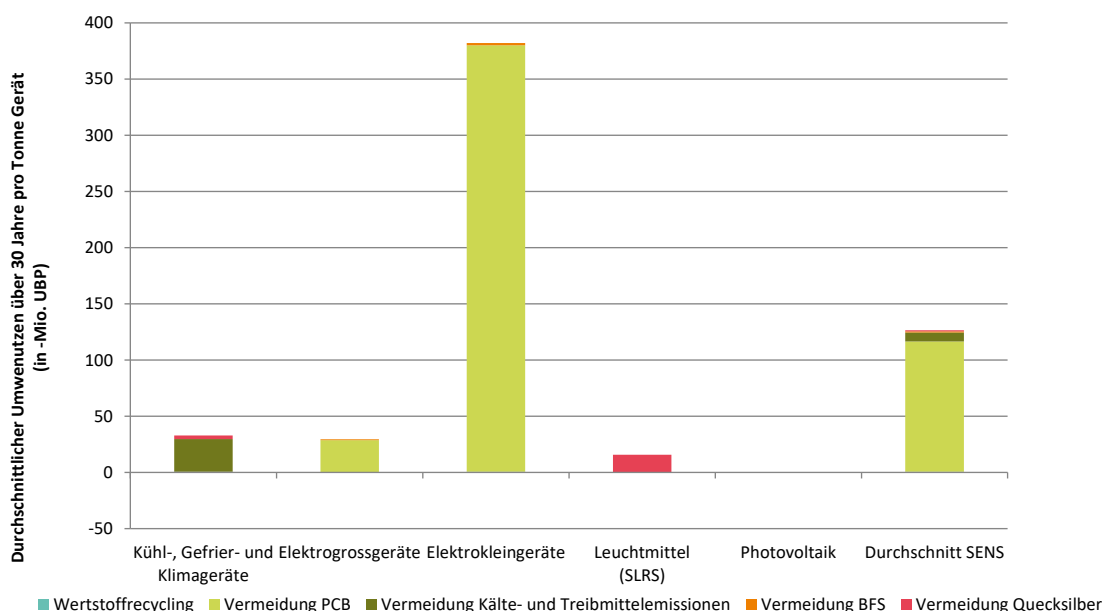
**Abbildung 12: Der zeitlich aufgelöste Umweltnutzen des SENS Elektrogerätrecyclings, nach Gerätekategorien.**

#### 4.2.4 Relativer Umweltnutzen pro Tonne Gerät

Die Abbildung 13 zeigt den durchschnittlichen Umweltnutzen pro Tonne Gerät je Kategorie über 30 Jahre. Den grössten Umweltnutzen pro Tonne weisen die Elektrokleingeräte auf (-382 Mio. UBP pro Tonne Gerät), hauptsächlich durch die korrekte Entsorgung der in Vorschaltgeräten aus Leuchten verbauten PCB-haltigen Kondensatoren zuzuschreiben, respektive der damit einhergehenden Vermeidung von PCB-Emissionen, gefolgt von der Vermeidung von BFS. Die Elektrogrossgeräte weisen einen tieferen Umweltnutzen auf (-30 Mio. UBP pro Tonne Gerät), auch hier hauptsächlich durch die Vermeidung von PCB-Emissionen. Der Umweltnutzen bei den Kühl-, Gefrier-, und Klimaanlageanlagen liegt bei -33 Mio. UBP pro Tonne Gerät. Hier liegt der Hauptgrund bei der Vermeidung von Kälte- und Treibmittelemissionen durch die korrekte Entsorgung der



separierten Treibhausgase. Das Abscheiden und korrekte Entsorgen von Quecksilber beim Leuchtmitteleycling resultiert in einen Nutzen von -16 Mio. UBP pro Tonne Gerät, weil damit Quecksilberemissionen vermieden werden. Der Nutzen pro Tonne Photovoltaikpanels liegt dagegen bei -0.14 Mio UBP.



**Abbildung 13: Der Umweltnutzen des SENS Elektrogeräterecyclings pro Tonne Gerät (30 Jahre Durchschnitt)**

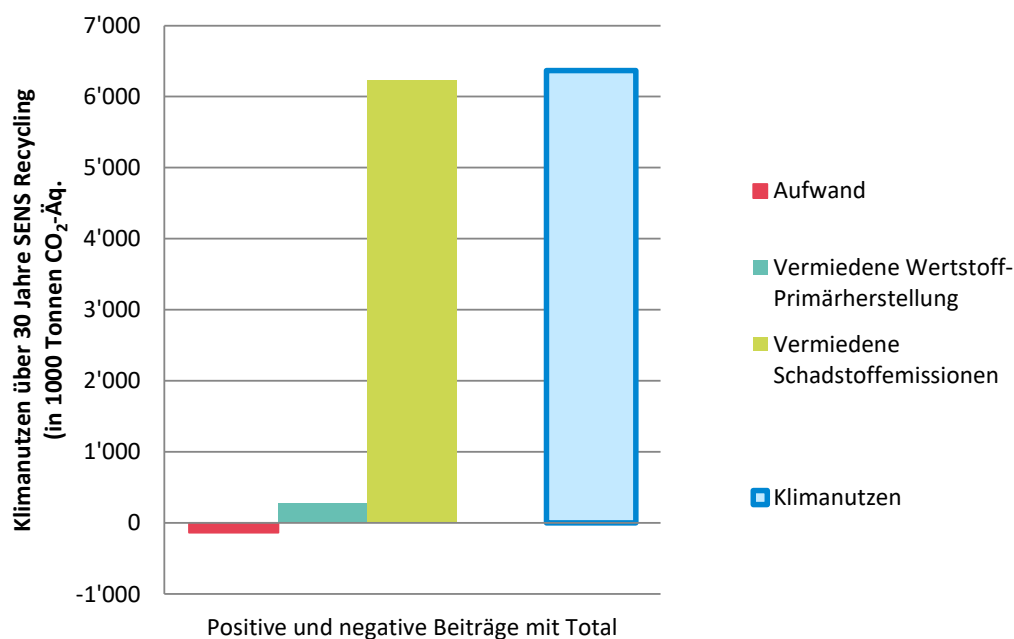
Da im Laufe der Zeit die Menge verbauter PCB-haltiger Kondensatoren und auch anderer Schadstoffe (FCKW, Quecksilber etc.) abnimmt (siehe dazu auch Kapitel 3.3.2), liegt der relative Umweltnutzen heute wesentlich tiefer und ist auch anders über die Gerätekategorien verteilt sein. Trotzdem wird auch heute noch die Vermeidung von Schadstoffemissionen den weitaus grössten Anteil zum Umweltnutzen beitragen. In dieser Studie nicht berücksichtigt wurden PCB-Ersatzstoffe und deren Entsorgung. Es wird empfohlen, künftig PCB-Ersatzstoffe auf ihr Umweltbelastungspotenzial hin zu untersuchen und mitzuberücksichtigen.

## 4.3 Klimanutzen

### 4.3.1 Klimanutzen über 30 Jahre SENS eRecycling

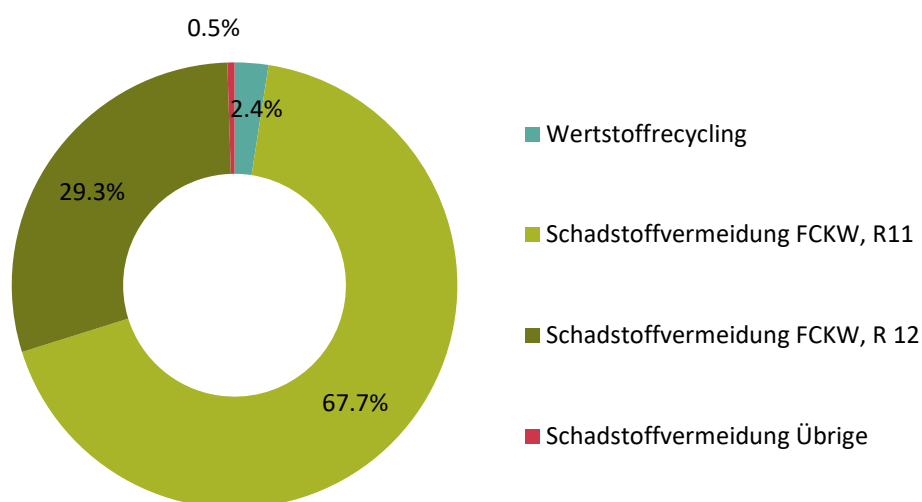
Insgesamt beläuft sich der Klimanutzen von 30 Jahren SENS Elektrogeräterecyclings auf netto 6.4 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq. (Abbildung 14). Der grosse Teil des Klimanutzens (93.4%) stammt dabei von vermiedenen Schadstoffemissionen. Der Klimanutzen der rezyklierten Wertstoffe ist wesentlich tiefer. Der ökologische Aufwand für das Recycling (Transporte, Energieverbrauch Recyclingbetriebe, etc.) ist im Vergleich zum generierten Nutzen (Vermeidung Emissionen, weniger Primärmaterialherstellung) sehr gering. Um die Höhe des gesamten Klimanutzens besser einordnen zu können, seien im Folgenden Vergleiche aufgelistet, welche auch 6.4 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq emittieren:

- Weltrundflug für die ganze Bevölkerung des Kantons BE
- vier Monate Strassenverkehr in der Schweiz.



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

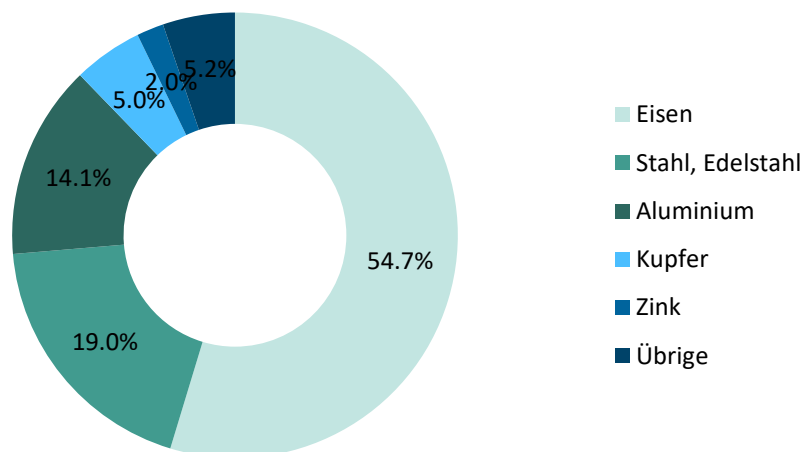
Unter den verhinderten Schadstoffemissionen trägt die korrekte Entsorgung von FCKW R11 (67.7 %) und FCKW R12 (29.3 %) am meisten zum Klimanutzen bei. (Abbildung 15).



**Abbildung 15: Anteil des Wertstoffrecyclings und der Schadstoffvermeidung am Klimanutzen des SENS Elektrogeräte-recyclings (Total 7.1 Mio Tonnen CO<sub>2</sub>-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 (54.7 %). Die wei-

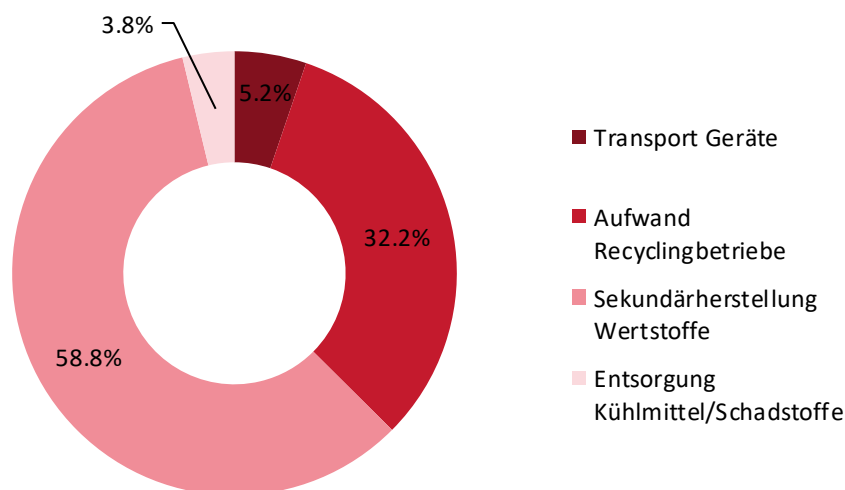
teren Anteile am Recyclingnutzen sind 19.0 % für Stahl, 14.1 % für Aluminium, und 5 % resp. 2.0 % für Kupfer- und Zink. Die restlichen Wertstoffe wie Glas, Gold, Silber, Blei, Nickel, Ferromangan und Kunststoffe tragen zusammen noch 5.2 % zum Klimanutzen des stofflichen Recyclings bei.



**Abbildung 16: Wertstoffanteil am Klimanutzen des stofflichen Recyclings.**

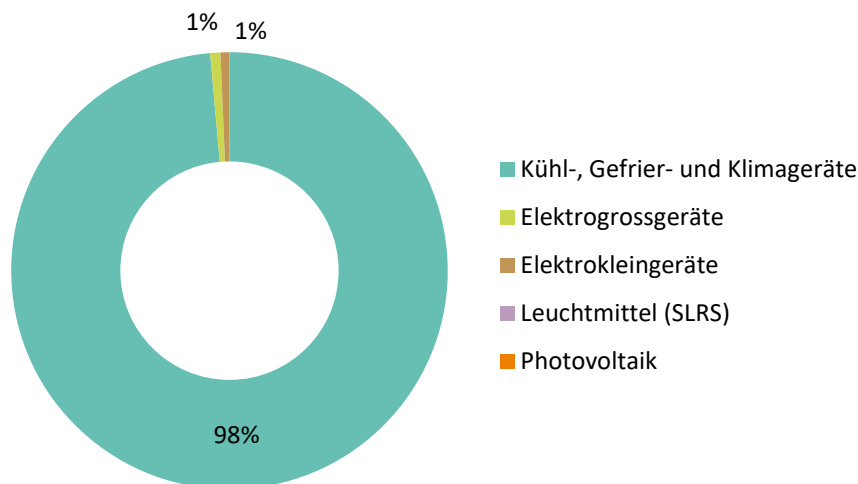
Zu beachten ist, dass sich die 100 % in dieser Darstellung auf die 6.3 % des gesamten Klimanutzens beziehen.

Wird nur der CO<sub>2</sub>-Fussabdruck des Aufwands des SENS Elektrogeräterecyclings 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 CO<sub>2</sub>-Fussabdruck des Aufwands bei.



**Abbildung 17: Anteil der Prozesse am CO<sub>2</sub>-Fussabdruck des Aufwands des SENS Elektrogeräterecyclings.**

Eine Analyse der Klimanutzen bezüglich Gerätekategorien (Abbildung 18) zeigt, dass 98 % durch die fachgerechte Verarbeitung von Kühl-, Gefrier- und Klimageräten erzeugt wird. Elektrogross- und -kleingeräte tragen zusammen nur 5 % bei. Der Anteil von Leuchtmitteln am Klimanutzen ist marginal.

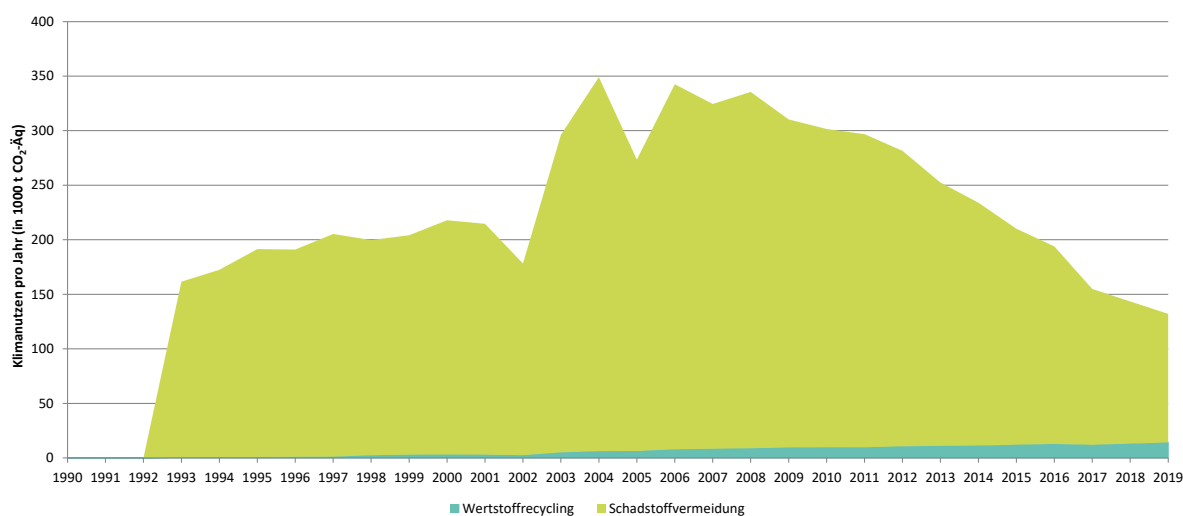


**Abbildung 18: Der Klimanutzen des SENS Elektrogeräterecyclings, nach Gerätekategorien.**

### 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.

Der grosse Einbruch des Klimanutzens im 2002 ist erklärbar durch die 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 2003 bis etwa 2011 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.



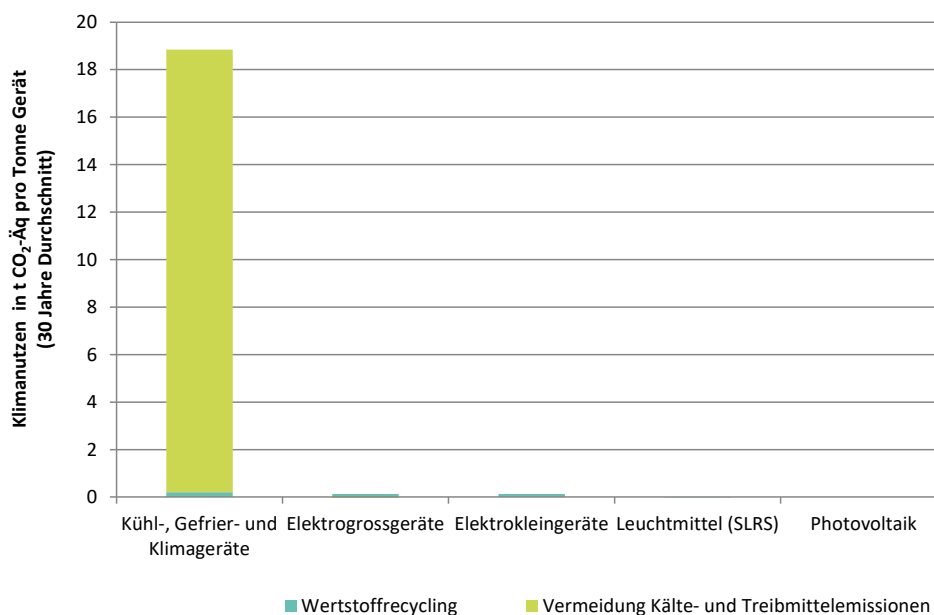
**Abbildung 19: Die zeitlich aufgelöste Klimanutzen des SENS Elektrogeräterecyclings.**



**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 je Kategorie über 30 Jahre. Den weitaus grössten Nutzen weisen die Kühl-, Gefrier- und Klimageräte auf (knapp 19 t CO<sub>2</sub>-Äq pro Tonne Gerät) aufgrund der Vermeidung von FCKW-Emissionen. Elektrogrossgeräte, Elektrokleingeräte und auch Leuchtmittel weisen einen um Größenordnungen tieferen Klimanutzen auf.



**Abbildung 21: Der Nutzen des SENS Elektrogeräterecyclings pro Tonne Gerät (30 Jahre Durchschnitt)**

Heute ist der Anteil der Kühlgeräte mit klimaschädlichen Stoffen wie FCKW geringer, sodass eine Abnahme des Umweltnutzens durch die Abtrennung und fachgerechte Entsorgung dieser Schadstoffe resultiert (vgl. Abbildung 19). Diese Abbildung zeigt auch, dass im Jahr 2019 immer noch mehr als 80 % des Klimanutzens durch die Vermeidung von Emissionen von klimaschädlichen Gasen verantwortlich ist, da die Vermeidung der FCKW-Ersatzstoffe immer noch einen vergleichsweise hohen Klimanutzen aufweist.

## 4.4 Vergleich zur früheren Studie

### Umweltnutzen

Im Vergleich zur früheren Studie (Kägi & Franov, 2016) liegt der Umweltnutzen in derselben Grössenordnung, obwohl neuere Erkenntnisse zu PCB-Gehalten verwendet wurden. Die wesentlichste Änderung beruht dabei auf der Erkenntnis, dass der (PCB-)Öl-Anteil von Kondensatoren bei 15 % liegt statt bei 30 % - 40 % wie in der früheren Studie angenommen. Des Weiteren wurde der Anteil an PCB, welche im Szenario „Ohne SENS“ zusätzlich in die Umwelt gelangen würden, leicht nach unten korrigiert. Auf der anderen Seite wurde die Menge PCB in Leuchten v.a. in den ersten 15 Jahren in der früheren Studie gemäss neueren Erkenntnissen unterschätzt. Weniger ausschlaggebend ist die Tatsache, dass neu angenommen wurde, dass 90 % der Wertstoffe auch „Ohne SENS“ recycelt würden.

### Klimanutzen

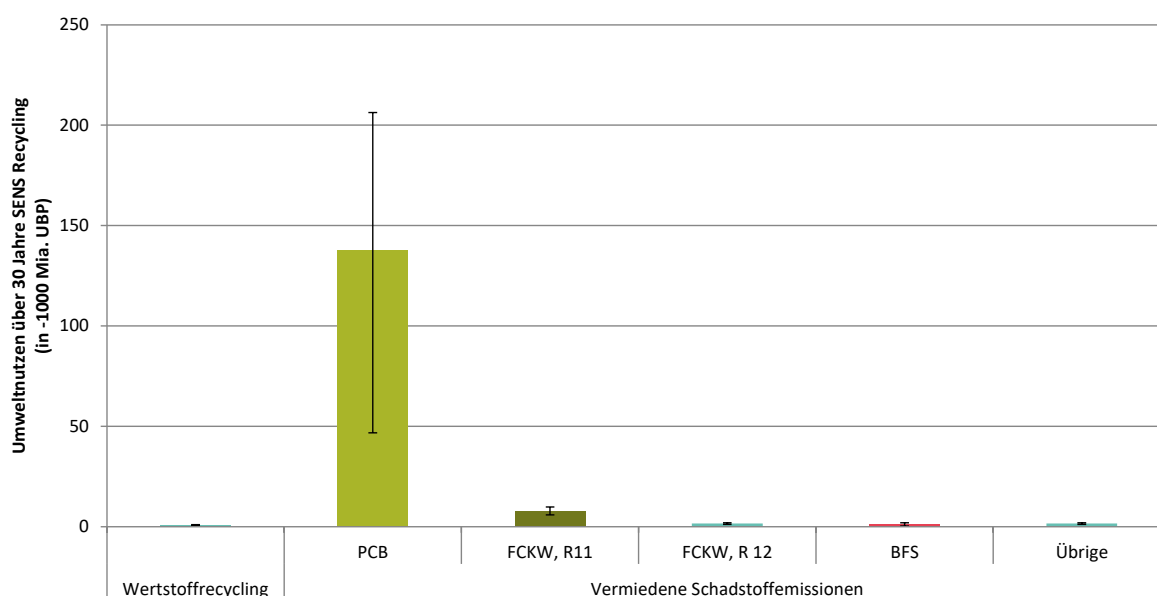
Der Klimanutzen ist tiefer als in der früheren Studie (Kägi & Franov, 2016). Der Grund hierfür liegt darin, dass in dieser Studie die nicht VREG Geräte, bei welchen es sich v.a. um Klima- und Kühlgeräte handelt, nicht berücksichtigt wurden für die Nutzenberechnung. Und die nicht-VREG Mengen machen rund 20 % der Klima- und Kühlgerätemengen aus.

## 4.5 Methodenvalidierung

### 4.5.1 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 weitaus 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.**

### 4.5.2 Second Opinion Analyse: Bewertungsmethode

Der Umweltnutzen des SENS Recyclingsystems wurde als Second Opinion Analyse auch mit der Bewertungsmethode ILCD v1.10 (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. Relativ etwas wichtiger wird die Vermeidung von Treibhausgasen aus Kühlgeräten bewertet, während der Beitrag des Wertstoffrecycling zum Umweltnutzen auch marginal ist. 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.

## 5 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Ökobilanzstudie zeigt, dass SENS eRecycling im Zusammenspiel mit Konsumenten, Hersteller/Importeuren, Handel, Leistungspartnern (Sammelstellen, Transporteure, Recycler) und Behörden während 30 Jahren Einsatz einen sehr hohen Umweltnutzen generiert hat. Durch die umweltfreundliche Entsorgung von Elektrogeräten wurde die jährliche Umweltbelastung der Schweiz um durchschnittlich 3 % - 4 % gesenkt, ein sehr beachtlicher Wert für eine einzelne Massnahme. Der mit über 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 Haushaltsgrossgeräten müssen weiterhin mit grösster Sorgfalt entfernt und fachgerecht entsorgt werden.

Die Vermeidung von Emissionen von Schadstoffen wie FCKW, BFS und Quecksilber durch ihre kontrollierte fachgerechte Entsorgung ist ebenfalls aus Umweltsicht sehr relevant. Zudem wird der Anteil 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. Trotz des tiefen Beitrags ist das Recycling solcher Wertstoffe absolut gesehen aus Umweltsicht sehr sinnvoll, da der ökologische Nutzen (Ressourcenschonung, etc.) meist viel grösser ist als der Aufwand für die Aufbereitung (Energieverbrauch, etc.).

Die Berechnung und Analyse des Klimanutzens, welchen die SENS in 30 Jahren erzeugte, zeigt, dass der weitaus grösste Teil durch die Vermeidung von FCKW-Emissionen durch das fachgerechte Rezyklieren von Kühlgeräten erreicht wird.

Die Tatsache, dass der Umweltnutzen Jahr für Jahr geringer wird, hängt von der Umsetzung von strengeren Umweltnormen ab. Dies zeigt, dass SENS eRecycling zu einem Zeitpunkt, an dem viele Schadstoffe verboten wurden, aber im Elektroaltgeräten noch vorhanden waren, eine sehr wichtige Rolle wahrgenommen hat. Diese Rolle spielt SENS eRecycling weiterhin, auch wenn die besonders kritischen Schadstoffe seltener werden. Mit der Zeit schätzen wir ein, dass tendenziell mehr verschiedene Schadstoffe vorkommen werden, die relativ gesehen zu weniger Umweltbelastung führen, bei denen aber nichtsdestotrotz eine korrekte Entsorgung sehr relevant ist. Bei immer knapperen Ressourcen ist zudem das Wertstoffrecycling, das dank SENS eRecycling optimiert werden kann, immer wichtiger.



## 6 Literatur

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](http://www.ecodom.it/Portals/0/Documenti/studi_ricerche/Ricerca_ambienteitalia_Ecodom.pdf)

ecoinvent. (2018). ecoinvent 2018: Version 3.5. Swiss Center for Life Cycle Inventories.

Eugster, M., Chappot, A.-C., & Kasser, U. (2007). PCB in Kleinkondensatoren aus Elektro- und Elektronikgeräten, 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.

Frischknecht, 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.

Gasser, D. (2009). Pilotzerlegung Fluoreszenz-Leuchten. Kennzahlen aus der Zerlegung von Geräten zur Entsorgung 2009. Im Auftrag von Stiftung SENS und Stiftung SLRS.

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

ISO/TC. (2006). Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

Kägi, T., & Franov, E. (2016). Ökobilanz Stiftung SENS - Ökologischer Nutzen des Elektrogeräte-Recyclings durch die SENS über 25 Jahre. Zürich: Im Auftrag der Stiftung SENS. Abgerufen von [https://carbotech.ch/cms2/wp-content/uploads/oekobilanz\\_stiftung\\_sens\\_v1.04.pdf](https://carbotech.ch/cms2/wp-content/uploads/oekobilanz_stiftung_sens_v1.04.pdf)

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. (2019). SimaPro 9 (Version 9.0). PRé Consultants.

Savi, D., Kasser, U., & Widmer, R. (2019). Flüssigkeiten in Kondensatoren Bestimmung von Flüssigkeiten in elektrischen Kondensatoren mit Definition und Zuordnung von bedenklichen Stoffen Schlussbericht. Im Auftrag von Stiftung SENS und Swico Recycling.

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 1 Resultate in Tabellenform

| Gerätemengen                    |                   | 1990 | 1991 | 1992 | 1993    | 1994    | 1995    | 1996    | 1997    | 1998     | 1999     | 2000     | 2001     | 2002     | 2003     | 2004     | 2005     | 2006    | 2007    | 2008    | 2009    | 2010    | 2011    | 2012    | 2013    | 2014    | 2015    | 2016    | 2017    | 2018    | 2019    | Total     |       |
|---------------------------------|-------------------|------|------|------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|-------|
| <b>Total</b>                    | t                 | -    | -    | -    | 3'110   | 3'832   | 4'774   | 5'501   | 6'009   | 15'632   | 18'842   | 19'503   | 18'954   | 15'383   | 31'600   | 38'700   | 40'220   | 50'500  | 54'010  | 56'830  | 61'700  | 63'130  | 62'010  | 67'560  | 70'700  | 71'600  | 77'100  | 80'700  | 75'170  | 83'088  | 89'400  | 1'185'559 |       |
| Kühl-, Gefrier- und Klimageräte | t                 | -    | -    | -    | 3'110   | 3'832   | 4'774   | 5'501   | 6'009   | 6'100    | 6'500    | 6'700    | 6'400    | 11'600   | 13'100   | 11'400   | 15'300   | 14'500  | 15'100  | 15'900  | 16'800  | 17'500  | 16'700  | 17'200  | 18'100  | 19'200  | 19'400  | 19'991  | 20'400  | 20'400  | 333'317 |           |       |
| Elektrogrossgeräte              | t                 | -    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | 8'000    | 9'900    | 9'600    | 9'600    | 5'600    | 14'600   | 18'100   | 19'100   | 23'400  | 26'100  | 26'800  | 30'400  | 30'700  | 27'800  | 30'300  | 30'600  | 29'400  | 32'900  | 32'500  | 28'100  | 34'236  | 33'800  | 511'536   |       |
| Elektrokleingeräte              | t                 | -    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | 15'32    | 2'442    | 3'003    | 2'654    | 3'383    | 5'400    | 7'500    | 9'300    | 10'700  | 12'300  | 13'800  | 14'900  | 15'400  | 16'300  | 18'800  | 22'300  | 23'900  | 25'000  | 27'900  | 26'700  | 27'550  | 33'800  | 324'565   |       |
| Leuchtmittel (SLRS)             | t                 | -    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -        | 420      | 1'100   | 1'100   | 1'100   | 1'100   | 1'100   | 960     | 1'100   | 1'100   | 1'100   | 1'100   | 970     | 1'059   | 1'100   | 1'100   | 1'589     |       |
| PV                              | t                 | -    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | 54      | 89      | 305     | 252     | 300     | 1'000     |       |
| <b>Umweltnutzen</b>             |                   | 1990 | 1991 | 1992 | 1993    | 1994    | 1995    | 1996    | 1997    | 1998     | 1999     | 2000     | 2001     | 2002     | 2003     | 2004     | 2005     | 2006    | 2007    | 2008    | 2009    | 2010    | 2011    | 2012    | 2013    | 2014    | 2015    | 2016    | 2017    | 2018    | 2019    | Total     |       |
| <b>Total</b>                    | Mia UBP           | -    | -    | -    | 276     | 288     | 327     | 316     | 340     | 6'763    | 8'163    | 7'845    | 10'224   | 10'147   | 11'081   | 10'946   | 10'844   | 10'403  | 9'668   | 9'052   | 7'999   | 7'340   | 6'400   | 4'978   | 4'678   | 3'848   | 3'005   | 2'182   | 1'267   | 1'080   | 962     | 150'422   |       |
| Kühl-, Gefrier- und Klimageräte | Mia UBP           | -    | -    | -    | 276     | 288     | 327     | 316     | 340     | 332      | 339      | 363      | 359      | 309      | 515      | 605      | 477      | 606     | 553     | 571     | 523     | 510     | 497     | 479     | 425     | 406     | 365     | 343     | 291     | 284     | 277     | 10'976    |       |
| Elektrogrossgeräte              | Mia UBP           | -    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | 867      | 977      | 854      | 761      | 390      | 875      | 910      | 776      | 724     | 713     | 697     | 686     | 668     | 645     | 630     | 612     | 593     | 583     | 572     | 558     | 550     | 538     | 1'180     |       |
| Elektrokleingeräte              | Mia UBP           | -    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | 5'564    | 6'847    | 6'628    | 9'104    | 9'449    | 9'691    | 9'431    | 9'584    | 9'056   | 8'384   | 7'765   | 6'773   | 6'144   | 5'240   | 3'853   | 3'623   | 2'832   | 2'040   | 1'249   | 403     | 229     | 129     | 124'018   |       |
| Leuchtmittel (SLRS)             | Mia UBP           | -    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -        | 7        | 17      | 18      | 18      | 17      | 18      | 18      | 15      | 17      | 17      | 17      | 15      | 17      | 17      | 17      | 248       |       |
| PV                              | Mia UBP           | -    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | 0.01    | 0.02    | 0.06    | 0.05    | 0.06      | 0     |
| <b>Umweltnutzen</b>             |                   | 1990 | 1991 | 1992 | 1993    | 1994    | 1995    | 1996    | 1997    | 1998     | 1999     | 2000     | 2001     | 2002     | 2003     | 2004     | 2005     | 2006    | 2007    | 2008    | 2009    | 2010    | 2011    | 2012    | 2013    | 2014    | 2015    | 2016    | 2017    | 2018    | 2019    | Total     |       |
| <b>Recycling Wertstoffe</b>     | Mia UBP           | -    | -    | -    | 3       | 3       | 4       | 5       | 5       | 11       | 13       | 14       | 13       | 11       | 22       | 27       | 26       | 32      | 34      | 36      | 39      | 40      | 40      | 44      | 46      | 47      | 50      | 53      | 49      | 54      | 59      | 781       |       |
| Vermeidung Kühl-, Kältemittel   | Mia UBP           | -    | -    | -    | 264     | 273     | 309     | 295     | 317     | 309      | 313      | 336      | 333      | 284      | 469      | 554      | 435      | 549     | 499     | 515     | 466     | 451     | 434     | 414     | 363     | 342     | 297     | 272     | 219     | 210     | 201     | 9'722     |       |
| Vermeidung PCB                  | Mia UBP           | -    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | 6'386    | 7'768    | 7'426    | 9'815    | 9'800    | 10'491   | 10'250   | 10'263   | 9'674   | 8'987   | 8'355   | 7'351   | 6'713   | 5'799   | 4'399   | 4'154   | 3'355   | 2'556   | 1'756   | 908     | 730     | 622     | 137'558   |       |
| Vermeidung Quecksilber          | Mia UBP           | -    | -    | -    | 9       | 12      | 15      | 17      | 18      | 19       | 20       | 21       | 20       | 19       | 35       | 40       | 41       | 64      | 62      | 64      | 66      | 69      | 68      | 68      | 70      | 72      | 76      | 74      | 77      | 79      | 72      | 1'259     |       |
| Vermeidung BFS                  | Mia UBP           | -    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | 39       | 49       | 48       | 43       | 33       | 63       | 75       | 78       | 84      | 86      | 82      | 79      | 69      | 58      | 53      | 47      | 36      | 30      | 25      | 16      | 9       | 1       | 1102      |       |
| <b>Umweltnutzen pro t Gerät</b> |                   | 1990 | 1991 | 1992 | 1993    | 1994    | 1995    | 1996    | 1997    | 1998     | 1999     | 2000     | 2001     | 2002     | 2003     | 2004     | 2005     | 2006    | 2007    | 2008    | 2009    | 2010    | 2011    | 2012    | 2013    | 2014    | 2015    | 2016    | 2017    | 2018    | 2019    | Total     |       |
| Durchschnitt SENS               | Mio UBP / t Gerät | -    | -    | -    | 88.75   | 75.07   | 68.53   | 57.44   | 56.61   | 432.65   | 433.22   | 402.23   | 539.40   | 659.67   | 350.66   | 282.85   | 269.61   | 206.00  | 179.01  | 159.28  | 129.64  | 116.27  | 103.20  | 73.68   | 66.16   | 53.75   | 38.98   | 27.04   | 16.85   | 13.00   | 10.76   | 126.88    |       |
| Kühl-, Gefrier- und Klimageräte | Mio UBP / t Gerät | -    | -    | -    | 88.75   | 75.07   | 68.53   | 57.44   | 56.61   | 54.48    | 52.10    | 52.59    | 53.55    | 48.23    | 44.36    | 46.21    | 41.88    | 39.59   | 38.17   | 37.83   | 34.16   | 32.08   | 29.57   | 27.39   | 25.44   | 23.58   | 20.14   | 17.89   | 15.01   | 14.23   | 13.57   | 32.93     |       |
| Elektrogrossgeräte              | Mio UBP / t Gerät | -    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | 108.36   | 98.68    | 89.00    | 79.32    | 69.64    | 59.96    | 50.27    | 40.62    | 30.94   | 27.33   | 26.01   | 22.56   | 21.75   | 23.22   | 20.80   | 20.00   | 20.16   | 17.73   | 17.59   | 19.85   | 16.06   | 15.92   | 29.68     |       |
| Elektrokleingeräte              | Mio UBP / t Gerät | -    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | 3'631.76 | 2'803.78 | 2'206.70 | 3'429.56 | 2'793.36 | 1'794.63 | 1'257.44 | 1'030.49 | 846.34  | 681.63  | 562.72  | 454.57  | 398.98  | 321.46  | 204.97  | 162.47  | 118.51  | 81.59   | 44.78   | 15.08   | 8.31    | 3.82    | 382.10    |       |
| Leuchtmittel (SLRS)             | Mio UBP / t Gerät | -    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -        | 15.88    | 15.88   | 15.88   | 15.88   | 15.88   | 15.88   | 15.88   | 15.88   | 15.88   | 15.88   | 15.88   | 15.88   | 15.88   | 15.88   | 15.88   | 15.88     |       |
| PV                              | Mio UBP / t Gerät | -    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | 0.19    | 0.19    | 0.19    | 0.19    | 0.19      | 0.19  |
| <b>Klimanutzen</b>              |                   | 1990 | 1991 | 1992 | 1993    | 1994    | 1995    | 1996    | 1997    | 1998     | 1999     | 2000     | 2001     | 2002     | 2003     | 2004     | 2005     | 2006    | 2007    | 2008    | 2009    | 2010    | 2011    | 2012    | 2013    | 2014    | 2015    | 2016    | 2017    | 2018    | 2019    | Total     |       |
| <b>Total</b>                    | t CO2eq           | -    | -    | -    | 16'174  | 17'632  | 19'162  | 19'127  | 20'583  | 200'663  | 205'267  | 218'956  | 215'701  | 178'904  | 297'852  | 351'009  | 274'982  | 344'504 | 326'530 | 337'586 | 312'612 | 303'881 | 298'875 | 283'702 | 254'466 | 235'929 | 212'301 | 196'002 | 156'655 | 145'705 | 134'057 | 6'409'008 |       |
| Kühl-, Gefrier- und Klimageräte | t CO2eq           | -    | -    | -    | 16'174  | 17'632  | 19'162  | 19'127  | 20'583  | 199'032  | 203'199  | 216'894  | 213'670  | 177'554  | 294'640  | 346'954  | 270'891  | 339'513 | 320'939 | 331'746 | 306'063 | 297'236 | 292'652 | 276'847 | 247'252 | 228'784 | 204'460 | 187'979 | 149'484 | 137'408 | 125'296 | 6'219'136 |       |
| Elektrogrossgeräte              | t CO2eq           | -    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | 1493     | 1848     | 1792     | 1792     | 1045     | 2'725    | 3'378    | 3'273    | 4'010   | 4'473   | 4'593   | 5'210   | 5'261   | 4'764   | 5'193   | 5'244   | 5'039   | 5'638   | 5'570   | 4'816   | 5'867   | 5'793   | 88'815    |       |
| Elektrokleingeräte              | t CO2eq           | -    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | 138      | 220      | 271      | 239      | 305      | 487      | 677      | 791      | 910     | 1046    | 1174    | 1'268   | 1'310   | 1'387   | 1'600   | 1'898   | 2'035   | 2'128   | 2'376   | 2'273   | 2'346   | 2'878   | 27'758    |       |
| Leuchtmittel (SLRS)             | t CO2eq           | -    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -        | 27       | 71      | 72      | 73      | 71      | 73      | 72      | 62      | 71      | 71      | 71      | 63      | 69      | 71      | 1011    |           |       |
| PV                              | t CO2eq           | -    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | 3       | 6       | 19      | 16      | 63      | 63        |       |
| <b>Klimanutzen</b>              |                   | 1990 | 1991 | 1992 | 1993    | 1994    | 1995    | 1996    | 1997    | 1998     | 1999     | 2000     | 2001     | 2002     | 2003     | 2004     | 2005     | 2006    | 2007    | 2008    | 2009    | 2010    | 2011    | 2012    | 2013    | 2014    | 2015    | 2016    | 2017    | 2018    | 2019    | Total     |       |
| <b>Recycling Wertstoffe</b>     | t CO2eq           | -    | -    | -    | 639     | 787     | 981     | 1'130   | 1'234   | 2'885    | 3'404    | 3'481    | 3'408    | 2'666    | 5'596    | 6'748    | 6'323    | 7'987   | 8'430   | 8'796   | 9'544   | 9'757   | 9'512   | 10'280  | 10'482  | 10'511  | 11'384  | 11'779  | 10'967  | 12'209  | 12'753  | 183'672   |       |
| Vermeidung Kühl-, Kältemittel   | t CO2eq           | -    | -    | -    | 16'1076 | 17'1844 | 19'0682 | 19'0147 | 204'349 | 197'779  | 201'864  | 215'476  | 212'294  | 176'240  | 292'257  | 344'263  | 268'660  | 336'519 | 318'102 | 328'791 | 303'069 | 294'124 | 289'364 | 273'423 | 243'984 | 225'419 | 200'918 | 184'222 | 145'688 | 133'496 | 121'304 | 6'225'356 |       |
| Vermeidung PCB                  | t CO2eq           | -    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | -10      | -12      | -11      | -15      | -15      | -16      | -15      | -14      | -13     | -12     | -11     | -10     | -9      | -8      | -7      | -6      | -5      | -4      | -3      | -2      | -1      | -1      | -1        | -1945 |
| Vermeidung Quecksilber          | t CO2eq           | -    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -0.0     | -0.0    | -0.0    | -0.0    | -0.0    | -0.0    | -0.0    | -0.0    | -0.0    | -0.0    | -0.0    | -0.0    | -0.0    | -0.0    | -0.0    | -0.0      | -0.0  |
| Vermeidung BFS                  | t CO2eq           | -    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -         | -0.02 |
| <b>Klimanutzen pro t Gerät</b>  |                   | 1990 | 1991 | 1992 | 1993    | 1994    | 1995    | 1996    | 1997    | 1998     | 1999     | 2000     | 2001     | 2002     | 2003     | 2004     | 2005     | 2006    | 2007    | 2008    | 2009    | 2010    | 2011    | 2012    | 2013    | 2014    | 2015    | 2016    | 2017    | 2018    | 2019    | Total     |       |
| Durchschnitt SENS               | t CO2eq / t Gerät | -    | -    | -    | 52.00   | 45.05   | 40.15   | 34.77   | 34.21   | 2.84     | 10.89    | 11.23    | 11.38    | 11.63    | 9.43     | 9.07     | 6.84     | 6.82    | 6.05    | 5.94    | 5.07    | 4.81    | 4.82    | 4.20    | 3.60    | 3.30    | 2.75    | 2.43    | 2.08    | 1.75    | 1.50    | 5.41      |       |
| Kühl-, Gefrier- und Klimageräte | t CO2eq / t Gerät | -    | -    | -    | 52.00   | 45.05   | 40.15   | 34.77   | 34.21   | 32.63    | 31.26    | 31.43    | 31.89    | 27.74    | 25.40    | 26.49    | 23.76    | 22.19   | 22.13   | 21.97   | 20.00   | 18.69   | 17.42   | 15.82   | 14.81   | 13.30   | 11.90   | 9.79    | 7.71    | 6.87    | 6.14    | 18.87     |       |
| Elektrogrossgeräte              | t CO2             |      |      |      |         |         |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |           |       |

# Anhang 2 Stoffflussmengen in Tabellenform

| Gesammelte Mengen an Wert- und Schadstoffen des SENS Systems |      |      |      |         |         |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |         |     |
|--|------|------|------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|-----|
| Wertstoffe   | 1990 | 1991 | 1992 | 1993    | 1994    | 1995    | 1996    | 1997    | 1998     | 1999     | 2000     | 2001     | 2002     | 2003     | 2004     | 2005     | 2006     | 2007     | 2008     | 2009     | 2010     | 2011     | 2012     | 2013     | 2014     | 2015     | 2016     | 2017     | 2018     | 2019     | Total   |     |
| Eisen  | t    | -    | -    | 1440.3  | 1774.7  | 2'210.7 | 2'547.6 | 2'782.5 | 8'081.9  | 9'714.7  | 9'928.2  | 9'708.5  | 7'485.4  | 15'914.8 | 19'430.3 | 19'886.3 | 24'728.1 | 26'526.5 | 27'762.0 | 30'370.0 | 31'006.2 | 30'047.6 | 32'751.0 | 33'832.1 | 33'941.8 | 36'815.1 | 38'146.2 | 35'217.2 | 39'404.6 | 41615.3  | 573'070 |     |
| Stahl, Edelstahl   | t    | -    | -    | 620.7   | 764.8   | 952.7   | 1097.9  | 1199.1  | 1511.0   | 1660.6   | 1729.4   | 1689.5   | 1482.8   | 2'850.9  | 3'278.8  | 2'976.2  | 3'924.4  | 3'851.9  | 3'997.3  | 4'169.4  | 4'300.1  | 4'373.3  | 4'604.7  | 4'456.1  | 4'511.8  | 4'819.9  | 5'024.8  | 4'903.2  | 5'246.3  | 5'312.0  | 85'298  |     |
| Aluminium  | t    | -    | -    | 14.7    | 18.1    | 22.6    | 26.0    | 28.4    | 335.9    | 443.5    | 471.0    | 449.1    | 383.8    | 771.5    | 998.7    | 1133.6   | 1364.6   | 1529.6   | 1641.6   | 1804.8   | 1846.3   | 1826.2   | 2'043.9  | 2'260.9  | 2'327.0  | 2'491.4  | 2'659.8  | 2'468.0  | 2'692.4  | 3'059.1  | 35'113  |     |
| Kupfer   | t    | -    | -    | 132.5   | 163.3   | 203.4   | 234.4   | 256.0   | 494.0    | 593.4    | 632.0    | 606.4    | 549.9    | 1049.2   | 1285.7   | 1321.4   | 1641.7   | 1739.7   | 1852.8   | 1986.8   | 2'042.9  | 2'067.8  | 2'269.9  | 2'413.5  | 2'489.5  | 2'651.3  | 2'832.5  | 2'694.8  | 2'883.5  | 3'199.0  | 40'287  |     |
| Zink   | t    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | 119.2    | 148.6    | 145.3    | 144.7    | 87.9     | 222.6    | 277.5    | 295.5    | 360.7    | 403.1    | 416.1    | 470.6    | 475.9    | 435.5    | 476.7    | 487.8    | 473.4    | 526.4    | 526.2    | 459.9    | 550.7    | 556.4    | 8'061   |     |
| Silber   | t    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0       |     |
| Gold   | t    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0       |     |
| Blei   | t    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.1      | 0.1      | 0.1      | 0.1      | 0.1      | 0.1      | 0.1      | 0.1      | 0.1      | 0.2      | 0.2      | 0.2      | 0.2      | 0.2      | 0.2      | 0.2      | 0.2      | 0.2     | 3   |
| Nickel   | t    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | 0.2      | 0.2      | 0.3      | 0.3      | 0.3      | 0.5      | 0.7      | 0.9      | 1.0      | 1.2      | 1.4      | 1.5      | 1.5      | 1.6      | 1.8      | 2.2      | 2.3      | 2.5      | 2.7      | 2.6      | 4.2      | 5.1      | 35      |     |
| Ferromangan  | t    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | 2.4      | 3.9      | 4.8      | 4.2      | 5.4      | 8.6      | 11.9     | 14.8     | 17.0     | 19.5     | 21.9     | 23.7     | 24.5     | 25.9     | 29.9     | 35.4     | 38.0     | 39.7     | 44.3     | 42.4     | 43.8     | 53.7     | 516     |     |
| Kunststoffe  | t    | -    | -    | 448.2   | 552.2   | 687.9   | 792.7   | 865.8   | 1001.5   | 1132.0   | 1234.5   | 1177.8   | 1192.8   | 2'103.5  | 2'487.6  | 2'386.7  | 3'060.6  | 3'073.3  | 3'279.8  | 3'396.6  | 3'523.1  | 3'724.7  | 4'025.6  | 4'180.3  | 4'390.3  | 4'608.0  | 4'998.5  | 4'931.3  | 5'084.5  | 5'643.4  | 73'993  |     |
| Glas   | t    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | -        | -        | -        | -        | -        | -        | -        | 324.7    | 850.3    | 858.0    | 873.5    | 850.3    | 873.5    | 858.0    | 742.1    | 850.3    | 850.3    | 892.0    | 919.1    | 985.6    | 1013.2   | 1082.2   | 12'823  |     |
| Total Wertstoffe   | t    | -    | -    | 2'656.4 | 3'273.2 | 4'077.4 | 4'698.7 | 5'131.9 | 11'546.2 | 13'697.0 | 14'145.7 | 13'780.5 | 11'188.5 | 22'921.7 | 27'771.4 | 28'340.2 | 35'936.6 | 38'003.0 | 39'846.6 | 43'073.7 | 44'094.1 | 43'360.7 | 46'945.8 | 48'528.7 | 49'024.6 | 52'846.6 | 55'154.4 | 51'705.2 | 56'923.4 | 60'526.4 | 829'199 |     |
| Schadstoffe  |      |      |      |         |         |         |         |         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |         |     |
| FCKW, R12 Freon  | t    | -    | -    | 4.5     | 6.0     | 5.9     | 7.6     | 8.1     | 7.7      | 8.1      | 8.4      | 8.0      | 5.9      | 9.7      | 11.2     | 8.4      | 10.2     | 11.8     | 12.4     | 12.7     | 12.6     | 13.7     | 12.6     | 12.1     | 10.4     | 10.4     | 9.7      | 7.3      | 5.2      | 3.2      | 243.8   |     |
| FCKW, R11TCFM  | t    | -    | -    | 36.2    | 36.0    | 41.6    | 37.7    | 40.6    | 39.8     | 40.0     | 43.2     | 43.1     | 37.5     | 62.2     | 73.8     | 58.3     | 73.6     | 64.7     | 66.4     | 58.0     | 55.7     | 51.8     | 49.8     | 42.5     | 41.0     | 33.9     | 30.8     | 25.1     | 25.9     | 26.7     | 1236.1  |     |
| R600a  | t    | -    | -    | 4.8     | 4.9     | 5.3     | 5.5     | 5.9     | 5.8      | 6.1      | 6.1      | 6.0      | 6.2      | 9.4      | 10.5     | 8.9      | 11.9     | 10.3     | 10.2     | 10.7     | 10.0     | 9.2      | 8.6      | 6.5      | 7.0      | 7.5      | 7.5      | 8.1      | 7.1      | 6.0      | 205.6   |     |
| R134   | t    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.0      | 0.2      | 0.3      | 0.5      | 1.0      | 1.2      | 1.8      | 3.2      | 2.7      | 3.2      | 3.1      | 3.0      | 2.9      | 2.8      | 2.4      | 2.4      | 3.2      | 4.0      | 38.2    |     |
| Ammoniak   | t    | -    | -    | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.2     | 0.2      | 0.2      | 0.2      | 0.2      | 0.2      | 0.3      | 0.3      | 0.3      | 0.4      | 0.4      | 0.4      | 0.4      | 0.4      | 0.4      | 0.4      | 0.4      | 0.4      | 0.4      | 0.5      | 0.5      | 0.5      | 0.5      | 0.5     | 8.5 |
| Cyclopentan  | t    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | 0.2     | 0.2      | 0.5      | 0.4      | 0.7      | 1.0      | 2.1      | 3.8      | 6.1      | 9.3      | 10.0     | 11.2     | 15.4     | 20.3     | 23.7     | 28.0     | 28.3     | 31.0     | 33.6     | 33.5     | 37.6     | 35.6     | 33.5     | 36.0    |     |
| Öl   | t    | -    | -    | 21.9    | 24.9    | 27.9    | 28.4    | 29.4    | 30.6     | 32.7     | 35.5     | 33.3     | 35.3     | 52.1     | 59.6     | 47.5     | 68.6     | 53.4     | 59.0     | 66.7     | 69.2     | 72.1     | 72.9     | 64.6     | 63.0     | 64.2     | 60.9     | 55.2     | 48.1     | 41.0     | 1318.0  |     |
| PCB  | t    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | 2.0      | 2.4      | 2.3      | 3.0      | 2.9      | 3.2      | 3.1      | 3.1      | 2.9      | 2.7      | 2.5      | 2.2      | 2.0      | 1.8      | 1.4      | 1.3      | 1.0      | 0.8      | 0.6      | 0.3      | 0.3      | 0.2      | 42.0    |     |
| Quecksilber  | t    | -    | -    | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1     | 0.1      | 0.1      | 0.1      | 0.1      | 0.1      | 0.2      | 0.3      | 0.3      | 0.4      | 0.4      | 0.4      | 0.4      | 0.4      | 0.4      | 0.4      | 0.4      | 0.4      | 0.4      | 0.5      | 0.5      | 0.5      | 0.5      | 0.5     | 8.0 |
| OctaBDPE   | t    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | 0.5      | 0.7      | 0.6      | 0.6      | 0.4      | 0.8      | 1.0      | 1.0      | 1.1      | 1.1      | 1.1      | 1.0      | 0.9      | 0.7      | 0.6      | 0.4      | 0.4      | 0.3      | 0.2      | 0.1      | 0.0      | 0.0      | 14.1    |     |
| DecaBDPE   | t    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | 4.7      | 5.8      | 5.6      | 5.1      | 3.8      | 7.3      | 8.7      | 9.1      | 9.8      | 9.9      | 9.4      | 9.1      | 7.9      | 6.6      | 6.0      | 5.2      | 3.8      | 3.2      | 2.7      | 1.7      | 0.9      | 0.0      | 126.3   |     |
| TBBPA  | t    | -    | -    | -       | -       | -       | -       | -       | 3.3      | 4.1      | 4.1      | 3.6      | 2.8      | 5.3      | 6.4      | 6.6      | 7.1      | 7.3      | 7.0      | 6.7      | 5.9      | 4.9      | 4.5      | 4.0      | 3.0      | 2.5      | 2.1      | 1.4      | 0.7      | 0.1      | 93.4    |     |
| Total Schadstoffe  | t    | -    | -    | 67.6    | 72.0    | 80.9    | 79.4    | 84.5    | 94.7     | 100.6    | 106.5    | 103.6    | 96.1     | 152.9    | 179.2    | 150.1    | 196.4    | 173.3    | 181.8    | 186.5    | 188.2    | 188.7    | 188.4    | 188.8    | 164.4    | 160.3    | 151.5    | 140.2    | 128.0    | 115.7    | 3'700.0 |     |