

CustomLCA

Ökobilanz 33 Jahre SENS eRecycling

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

Auftraggeberin

SENS eRecycling, Obstgartenstrasse 28, 8006 Zürich

Autor*in

Thomas Kägi & Stefanie Conrad, Carbotech AG

Anzahl Seiten: 47

Basel, 15. Oktober 2023

Impressum

Titel

Ökobilanz 33 Jahre Stiftung SENS

Auftraggeberin

Stiftung SENS,
Obstgartenstrasse 28,
8006 Zürich

Auftragnehmerin

Carbotech AG, Basel

Autor*in

Thomas Kägi, Stefanie Conrad

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 33 Jahre SENS eRecycling v1.0.docx)

Datum

15. Oktober 2023

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
1 Ausgangslage und Zielsetzung	7
1.1 Einleitung	7
1.2 Zielsetzung	7
2 Vorgehen und Methodik	9
2.1 Allgemeine Beschreibung der Ökobilanzierung	9
2.2 Vorgehen bei der Ökobilanzierung	9
2.3 Zielsetzung und Rahmenbedingungen	10
2.3.1 Zielsetzung	11
2.3.2 Funktionelle Einheit (Vergleichsgrösse)	11
2.3.3 Anwendung und Zielgruppe der Studie	11
2.3.4 Betrachtete Verwertungsszenarien	11
2.3.5 Systemgrenzen	13
2.4 Sachbilanz	15
2.4.1 Modellierung des Produktsystems	15
2.4.2 Annahmen und Berechnungsgrundlagen	15
2.5 Wirkbilanz	15
2.6 Bewertung der Umweltbelastungen	16
2.7 Sensitivitäten	17
2.7.1 Referenzszenario 0% Recycling	17
2.7.2 IPCC 2021 vs. IPCC 2013	17
2.7.3 MöK 2021 vs. MöK 2013	18
3 Datengrundlagen	19
3.1 Verarbeitete Mengen an Geräten und Energiebedarf Recyclingbetriebe	19
3.2 Erzeugte Fraktionen	21
3.2.1 Fraktionen pro Gerätekategorie	21
3.3 Relevante Schadstoffe	21
3.3.1 Kälte- und Treibmittel	21
3.3.2 PCB	22
3.3.3 Bromierte Flammschutzmittel	22
3.3.4 Weitere Schadstoffe	23
4 Resultate und Diskussion	25
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 33 Jahre SENS eRecycling	28
4.2.3 Umweltnutzen pro Jahr	31
4.2.4 Umweltnutzen Jahr 2022	32
4.3 Klimanutzen	33
4.3.1 Klimanutzen über 33 Jahre SENS eRecycling	33

4.3.2 Klimanutzen pro Jahr	36
4.3.3 Klimanutzen Jahr 2022	37
4.4 Vergleich IPCC 2021 vs. 2013	38
4.5 Vergleich MöK 2021 vs. MöK 2013	38
4.6 Referenzszenario 0 % Recycling	39
5 Schlussfolgerungen	40
6 Literatur	43

Anhang 1 Resultate in Tabellenform

I

Anhang 2 Stoffflussmengen in Tabellenform

II

Zusammenfassung

Der Umweltnutzen von 33 Jahren Elektrogeräte-Recycling durch die SENS und ihre Partner (Konsument*innen, Hersteller/Importeure, Handel, Leistungspartner (Sammelstellen, Transporteure, Recyclingbetriebe) und 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 33 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 2022 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 33 Jahren SENS Elektrogeräte-Recycling auf -230'000 Mia. UBP. Fast der ganze Nutzen (99.7 %) wird durch die Verhinderung von Schadstoffemissionen generiert, mit PCB als wichtigstem Schadstoff (84.3 %), gefolgt von FCKW R11 und FCKW R12 (zusammen 12.6 %) und Quecksilber (2.2 %) sowie bromierten Flammschutzmitteln (0.5 %) und dem Wertstoffrecycling (0.3 %). Das PCB stammt hauptsächlich aus den Kondensatoren von Elektrokleingeräten (insbesondere den Vorschaltgeräten von Leuchten und Mikrowellen) und Elektrogrossgeräten.

Der Klimanutzen von 33 Jahren SENS Elektrogeräte-Recycling beträgt 8.1 Mio. Tonnen CO₂-Äq. Der grosse Teil des Nutzens stammt dabei von der korrekten Entsorgung von FCKW R11 (68 %) und FCKW R12 (28 %). Diese Treibhausgase sind hauptsächlich in den verschiedenen Kühlgeräten wie Kühlschränken, Gefriertruhen und Klimageräten zu finden.

Über die betrachtete Zeitspanne wurden einerseits rund 1 Mio. Tonnen Wertstoffe verwertet, andererseits rund 4'100 Tonnen Schadstoffe kontrolliert entsorgt. Anteilsmässig die wichtigsten Wertstoffe waren Eisen (68.8 %), Stahl (9.9 %) und Kunststoffe (9.3 %). Wesentlich geringer waren die gesammelten Mengen an Kupfer (5.1 %), Aluminium (4.3 %), Zink (0.9 %) und Glas (1.6 %). Von den restlichen Wertstoffen fielen nur sehr geringe Mengen an (weniger als 0.1 %). Bei den Schadstoffen waren anteilmässig FCKW R11 (31.5 %) und Öl (36.2 %) die wichtigsten. Wesentlich tiefer lagen die gesammelten Mengen an FCKW R12 (6.4 %), Cyclopentan (11.9 %), bromierten Flammschutzmitteln (5.7 %) und R600a (5.7 %). Von den restlichen Schadstoffen fallen nur geringe Mengen an (weniger als 2 %).

Die vorliegende Ökobilanzstudie zeigt, dass die Stiftung SENS im Zusammenspiel mit Konsument*innen, Hersteller/Importeuren, Handel, Leistungspartnern (Sammelstellen, Transporteure, Recyclingbetriebe) und Behörden während 33 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 und Mikrowellen, aber auch solche in Haushaltgrossgeräten 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.

Ausgangslage und Zielsetzung

1.1 Einleitung

Bevor SENS eRecycling¹ 1990 gegründet wurde und ihre Tätigkeit aufnahm, wurden kleine Elektro- und Elektronikaltgeräte (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 EAG. 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 Swico²). Die VREG schreibt den Händlern die kostenlose Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung vor, wobei insbesondere die problematischen Stoffe fachgerecht entsorgt werden müssen. Die Stiftung SENS bietet diese Dienstleistung an.

Damit EAG tatsächlich umweltgerecht entsorgt werden, sind für die SENS neben den Herstellern/Importeuren von Elektrogeräten als Auftraggeberin weitere wichtige Partner beteiligt: zum einen die Konsument*innen, 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

SENS möchte die im 2020 durchgeführte Ökobilanzstudie (Kägi & Conte, 2020) aktualisieren und den Umweltnutzen mit der aktuellen Methode der ökologischen Knappheit 2021 berechnen lassen, welcher zusammen mit Konsument*innen, Hersteller/Importeuren, Handel, Leistungspartnern (Sammelstellen, Transporteure, Recyclingbetriebe) und Behörden realisiert wurde. Die detaillierten Zielsetzungen dieser Studie sind die folgenden:

1. Es soll der Umweltnutzen des Recyclings von Elektrogeräten über 33 Jahre durch die SENS und ihre Partner mittels der Methode der Ökobilanzierung ermittelt werden.
2. Nebst der Ermittlung des Umweltnutzens sollen 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 33 Jahre mit einem Szenario „ohne SENS“ verglichen werden.

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

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

Vorgehen und Methodik

Heute besteht ein breiter 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.

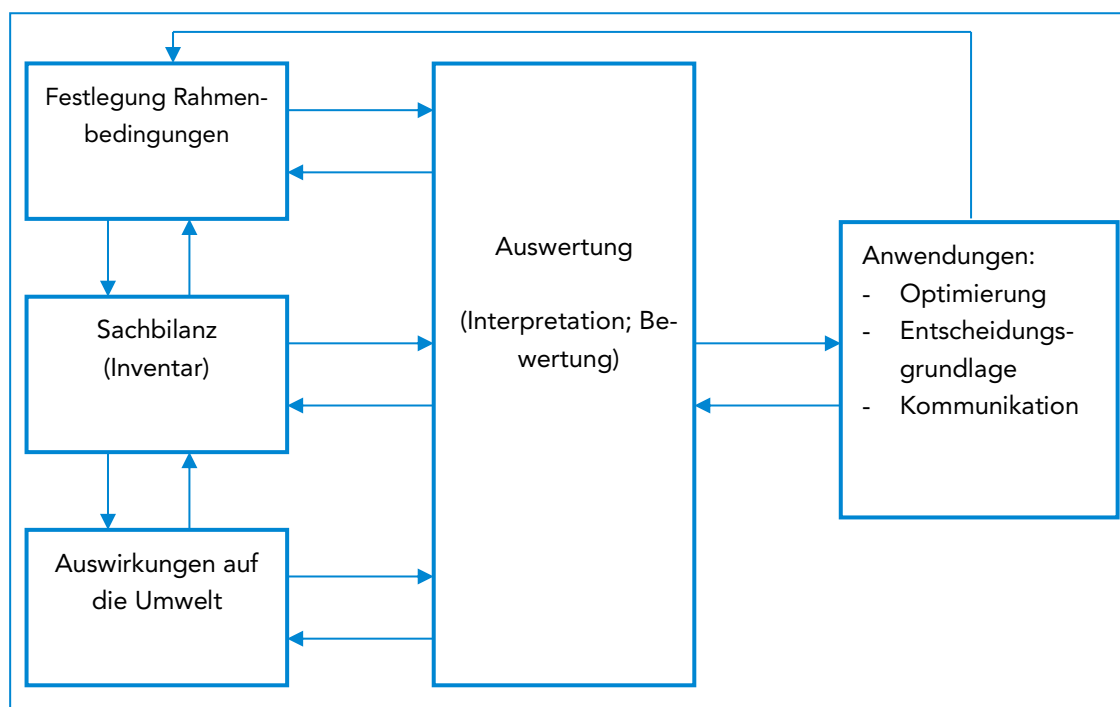


Abbildung 1: Schritte einer Ökobilanz nach ISO 14'040/44

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 0 schon dargelegt, verfolgt diese Studie folgende Ziele:

1. Es soll der Umweltnutzen des Recyclings von Elektrogeräten über 33 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 33 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 und Photovoltaik gewählt, welche von 1990 bis 2022 über SENS eRecycling gesammelt wurden.

2.3.3 Anwendung und Zielgruppe der Studie

Die Studie richtet sich primär an die Auftraggeberin. 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 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 rezykliert 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 Ist-standsanalyse „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

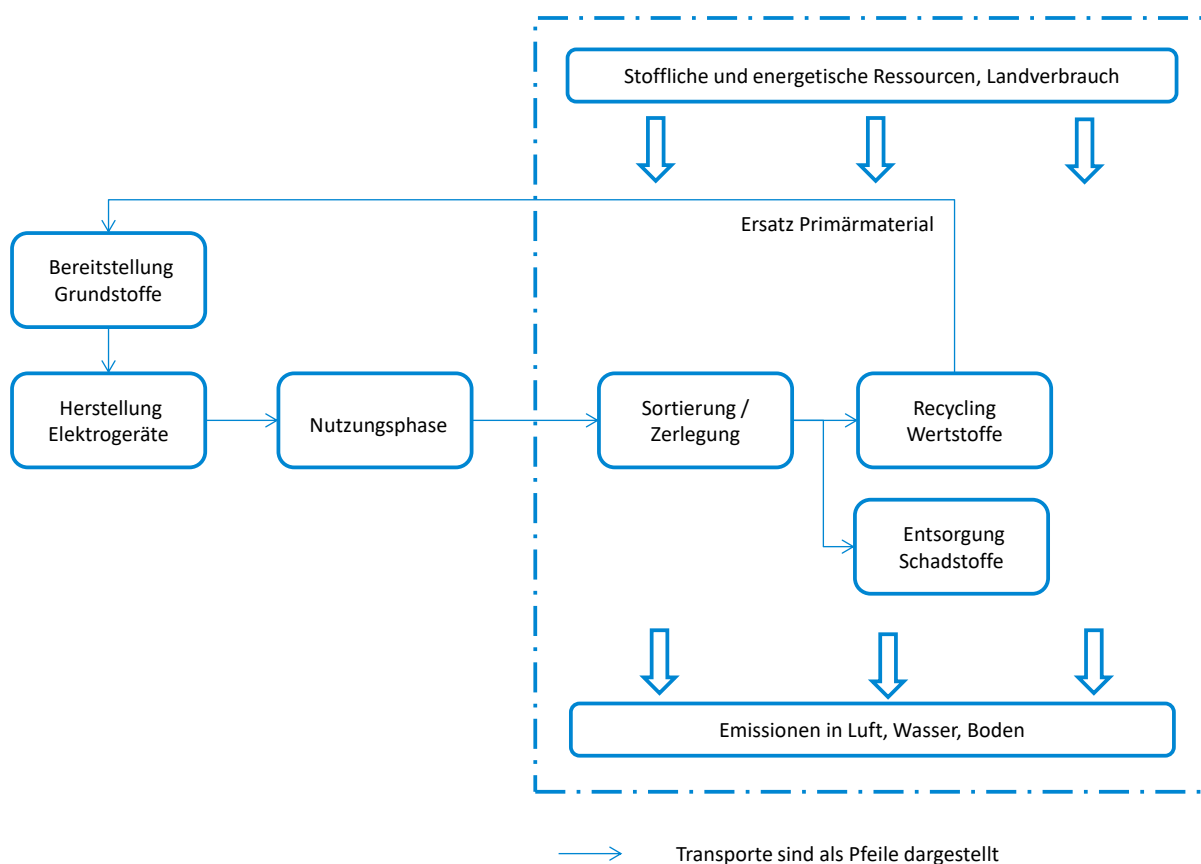


Abbildung 2: Schematische Darstellung der berücksichtigten Prozesse

Zeitliche Systemgrenze

Die Daten über die gesammelten und rezyklierten Mengen beziehen sich auf 33 Jahre. Für sämtliche Hintergrunddaten und Ökoinventare bis 2020 wurde die Ökoinventardatenbank ecoinvent v3.5 (ecoinvent, 2018) verwendet. Zeitliche Veränderungen der Inventare (ecoinvent v1.0 bis ecoinvent v3.5) können nicht berücksichtigt werden. Zudem sind die Resultate v.a. in früheren Jahren sehr stark von den direkten Emissionen dominiert und somit die involvierten Ökoinventare wenig relevant. Für die Jahre 2021 und 2022 wurden die aktuellsten Inventare aus der ecoinvent v3.9 verwendet (ecoinvent, 2023), da sich diverse Hintergrundinventare zur Herstellung der involvierten Wertstoffe aktualisiert wurden. Da die direkten Emissionen in der Tendenz weiter abnehmen werden und somit das wertstoffliche Recycling immer wichtiger wird für die Resultate, ist angedacht, dass ab 2022 für jedes neue berechnete Jahr jeweils die aktuellste ecoinvent Datenbank verwendet wird, um der laufenden Entwicklung bei den Wertstoffen Rechnung zu tragen.

Zeitliche Veränderungen der Bewertungsmethode (Ökologische Knappheit 1997, 2006, 2013, 2021) 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 sind die neuen UBP Faktoren der Version 2021 nicht mehr wirklich vergleichbar mit den älteren Versionen. Darum haben wir sämtliche Jahre mit der Version von 2021 durchgerechnet.

Geografische Systemgrenze

Es wurde das Elektrogeräte-Recyclingsystem in der Schweiz betrachtet inklusive der (ausländischen) Aufbereitung der Wertstoffe.

2.4 Sachbilanz

2.4.1 Modellierung des Produktsystems

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

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

Die Sachbilanz wurde mit der Ökobilanz-Software SimaPro v9.5 (PRé Consultants, 2023) 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 (siehe auch Kap. 2.3.5) zurückgegriffen.

2.4.2 Annahmen und Berechnungsgrundlagen

Für sämtliche Prozesse wurden Grundlagendaten aus ecoinvent 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 1990 bis 2018 mehr oder weniger identisch blieb. Ab 2018 wird die Wertstoffzusammensetzung der Geräte mittels Auswertung der Batchversuche für Haushaltsgrossgeräte und Haushaltskleingeräte jährlich neu ermittelt.
- Für eine Auswahl der diversen PCBs bestehen Ökofaktoren, die teilweise um den Faktor 200 unterschiedlich sind (Frischknecht u. a., 2021) 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 u. a., 2021) 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).

2.5 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. Dabei wurde neu die IPCC 2021, GWP 100a verwendet.

2.6 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 2021 (Frischknecht u. a., 2021) 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.

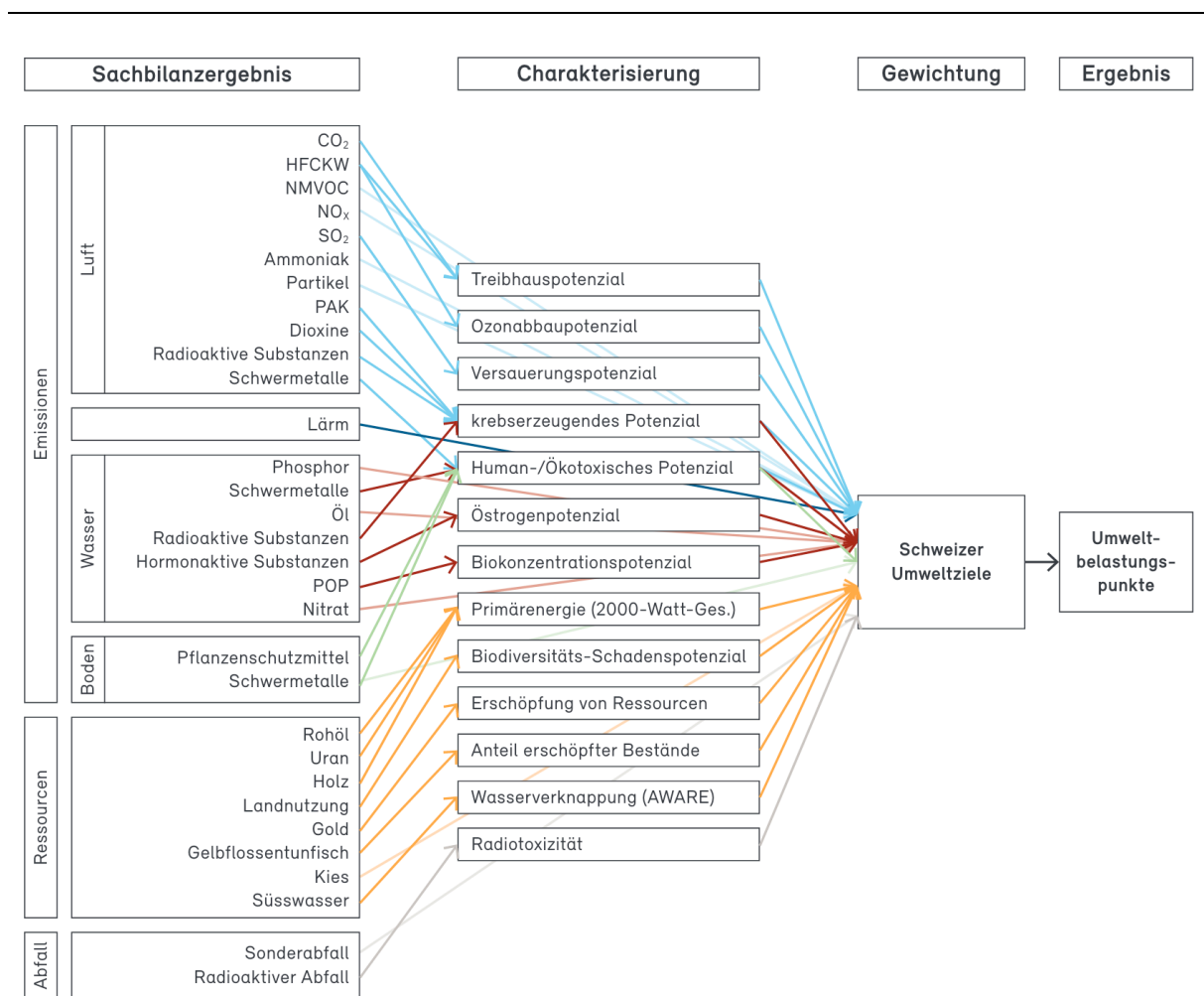


Abbildung 3: Grundschemata der Methode der ökologischen Knappheit. Grafik aus (Frischknecht u. a., 2021)

2.7 Sensitivitäten

2.7.1 Referenzszenario 0% Recycling

In dieser wie auch in den vorherigen SENS-LCA Studien wurde auch im Referenzszenario angenommen, dass Wertstoffe zu einem gewissen Grad rezykliert werden. Dies steht im Gegensatz zu anderen Recyclingsystemen, bei denen als Referenz 0% Recycling (resp. 100% in KVA) angenommen wird. Obwohl wir weiterhin der Meinung sind, dass die in der SENS-LCA Studie gewählten Referenzszenarien sinnvoll und realistisch sind, soll in einer Sensitivitätsanalyse dargestellt werden, welchen Nutzen das Wertstoffrecycling erfährt, wenn gegenüber 0% Recycling gerechnet wird.

2.7.2 IPCC 2021 vs. IPCC 2013

Die neue Version IPCC 2021 weist für die involvierten Kältemittel R11 und R12 höhere Emissionsfaktoren auf als die Vorgängermethode. Das hat einen entscheidenden Einfluss auf den absoluten ausgewiesenen Klimanutzen. Um aufzuzeigen, wie sich die Resultate aufgrund des Wechsels von der alten Version IPCC 2013 auf die aktuelle Version IPCC 2021 verändern, werden die Resultate des aktuellsten Jahres mit den zwei Methoden einander gegenübergestellt und diskutiert.

2.7.3 MöK 2021 vs. MöK 2013

Die Gründe für die Wahl der Methode der ökologischen Knappheit als Bewertungsmethode für die Berechnung des Umweltnutzens ist in Kapitel 2.6 beschrieben. Die neue Version MöK 21 weist für viele Emissionen und Ressourcenverbräuche höhere UBP-Faktoren auf. Um aufzuzeigen, wie sich die Resultate aufgrund des Wechsels von der alten Version MöK 13 auf die aktuelle Version MöK 21 verändern, werden die Resultate des aktuellsten Jahres mit den zwei Methoden einander gegenübergestellt und diskutiert.

Datengrundlagen

3.1 Verarbeitete Mengen an Geräten und Energiebedarf Recyclingbetriebe

In Tabelle 2 sind die verarbeiteten Mengen an Elektrogeräten gemäss SENS-Statistiken über 33 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 recycelt 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. Ab 2015 wurden Photovoltaik-Module in das Sammel- und Recyclingkonzept aufgenommen. Insgesamt wurden in den letzten 33 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 % machen Leuchtmittel aus und Photovoltaik-Module machen mit 0.1 % den kleinsten Anteil aus.

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	1'100	54	77'100
2016	19'200	32'500	27'900	1'100	89	80'700
2017	19'400	28'100	26'700	970	305	75'170
2018	19'991	34'236	27'550	1'059	252	83'088
2019	20'400	33'800	33'800	1'100	300	89'400
2020	20'100	37'100	29'800	1'000	200	88'200
2021	20'419	38'448	31'207	990	587	91'651
2022	20'508	37'167	30'386	955	936	89'952
Total	393'844	626'251	410'858	18'434	2'723	145'2110
Anteil	27%	43%	28%	1%	0%	100%

3.2 Erzeugte Fraktionen

3.2.1 Fraktionen pro Gerätekategorie

Die aus der Verarbeitung resultierenden Wertstoff- und Schadstofffraktionen wurden für jede Gerätekategorie mittels vorliegenden Testchargenverarbeitungen (Batchversuchen) der SENS ermittelt. Für die Jahre vor 2018 wurden mit den Fraktionsanteilen von 2018 gerechnet. Ab 2019 wurde mit den Fraktionsanteilen je Gerätekategorie des entsprechenden Jahres gerechnet, welche aus den jährlichen Batchversuchen ermittelt wurden.

Aus vertraulichen Gründen können die detaillierten Fraktionsanteile nicht dargestellt werden. 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 %
	Total	69.9 %

Die Aufbereitung der Wertstoffe zu Sekundärrohstoffen mit Produktqualität wurde mit den entsprechenden ecoinvent Inventaren abgebildet (siehe dazu auch Kap. 2.3.5).

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 Tabelle 5 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 %³ (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 die Jahre ab 2018 weitergeführt.
- 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 linearer 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 ab 2018 wurde jeweils mit einer halb so hohen Menge wie das Vorjahr gerechnet.

Basierend auf diesen Annahmen wurden in den 33 Jahren über das SENS-System insgesamt 42.6 t PCB gesammelt und fachgerecht entsorgt. Dabei stammen 6.2 t von den Elektrogrossgeräten, und 36.3 t von den Vorschaltgeräten aus 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 OctaBDPE⁴ sind seit 2003 verboten. Andere BFS wie das TBBPA⁵ oder

³ 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.

⁴ BDPE steht für Bromdiphenylether

⁵ TBBPA steht für Tetrabrombisphenol A

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 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 DecaBDPE 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 und danach wurde eine lineare Extrapolation durchgeführt.
- Elektrogrossgeräte:
 - Aufgrund der BFS-Gehalte (0.0052 % für OctaBDPE, 0.045 % für DecaBDPE 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.

Resultate und Diskussion

Kapitel 4.1 zeigt eine Übersicht über die Mengen an Wert- und Schadstoffen, welche durch das SENS-System in 33 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. Insgesamt wurden gut 837'000 Tonnen Wertstoffe verwertet. Mengenmässig am relevantesten sind die Wertstoffe Eisen (68.8%), Stahl (9.9%) und Kunststoffe (9.3%). Wesentlich geringer sind die gesammelten Mengen an Kupfer (5.1%), Aluminium (4.3%), Zink (0.9%) und Glas (1.6%). Von den restlichen Wertstoffen fallen nur sehr geringe Mengen an (weniger als 0.1%).

Tabelle 4: In 33 Jahren verwertete Mengen Wertstoffe

Wertstoffe	Mengen in t	Anteil
Eisen	703'778	68.8%
Stahl, Edelstahl	101'642	9.9%
Aluminium	43'857	4.3%
Kupfer	51'982	5.1%
Zink	9'012	0.9%
Silber	0.1985	0.000019%
Gold	0.2002	0.000020%
Blei	'3.3	0.00032%
Nickel	'53.7	0.0053%
Ferromangan	653	0.06%
Kunststoffe	95'028	9.3%
Glas	16'354	1.6%
Total	1'022'365	100 %

Die Menge von 700'000 Tonnen verwertetem Eisen und Stahl über 33 Jahre würde reichen, um 12 Golden Gate Brücken zu bauen. Die 52'000 Tonnen Kupfer ergäben ein Starkstromleitungskabel, welches 2.5 Mal die Erde umspannt. Die 44'000 Tonnen Aluminium reichen aus, um 260 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 Leuchtmitteln. 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 Gerätekategorien ausgenommen den Leuchtmitteln. Aluminium stammt v.a. aus Elektrogross- und Elektrokleingeräten.

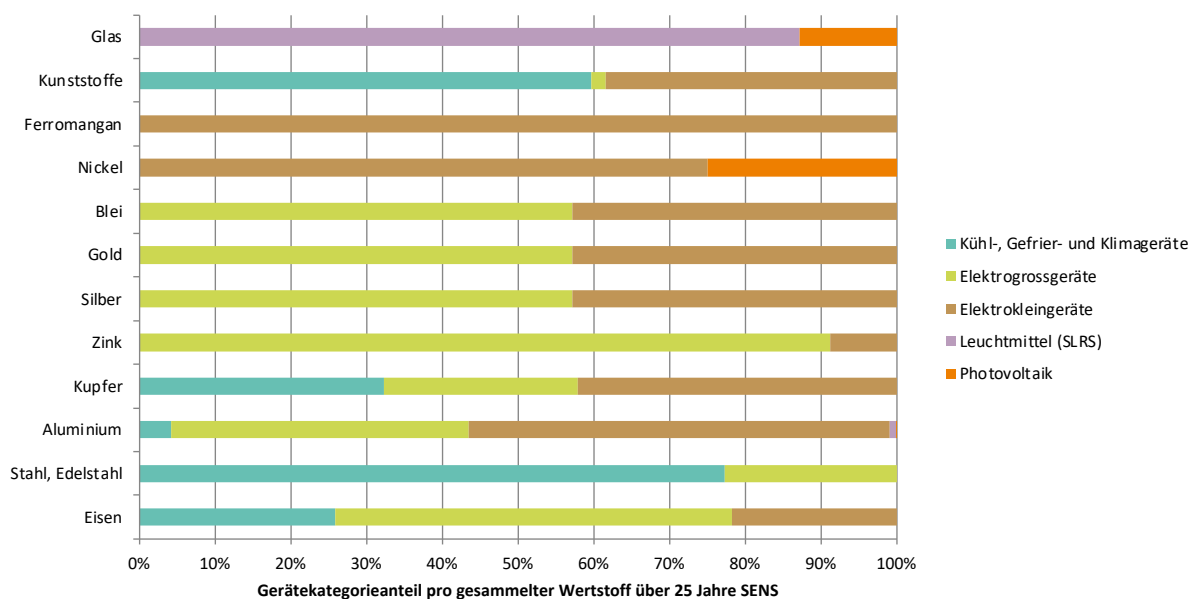


Abbildung 4: Anteil der SENS Gerätekategorien für die jeweiligen verwerteten Wertstoffe

Die Mengen an separierten und kontrolliert entsorgten Schadstoffen sind in Tabelle 5 dargestellt. Insgesamt wurden rund 4'090 Tonnen Schadstoffe kontrolliert entsorgt. Mengenmässig am relevantesten sind die Schadstoffe FCKW R11 (31.5 %) und Öl (36.3 %). Wesentlich tiefer liegen die gesammelten Mengen an Cyclopentan (11.9 %), FCKW R12 (6.4 %), bromierten Flammenschutzmitteln (5.7 %) und R600a (5.7 %). Von den restlichen Schadstoffen fallen nur geringe Mengen an (weniger als 2 %).

Tabelle 5: In den letzten 30 Jahren kontrolliert entsorgte Schadstoffe

Jahr	Total	Anteil
FCKW, R12	260	6.4%
FCKW, R11	1'287	31.5%
R600a	235	5.7%
R134	45	1.1%
Ammoniak	10	0.2%
Cyclopentan	486	11.9%
Öl (aus Klima- und Kühlgeräten)	1'480	36.2%
PCB	42.6	1.0%
Quecksilber	9	0.2%
OctaBDPE	14	0.3%
DecaBDPE	126	3.1%
TBBPA	94	2.3%
Total	4'090	100.0 %

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 Elektroklein- geräte 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 Leucht- körpern (Kategorie Leuchtmittel). Die Kühl- und Treibmittel kommen aus der Kategorie der Kategorie Kühl-, Gefrier- und Klimageräte.

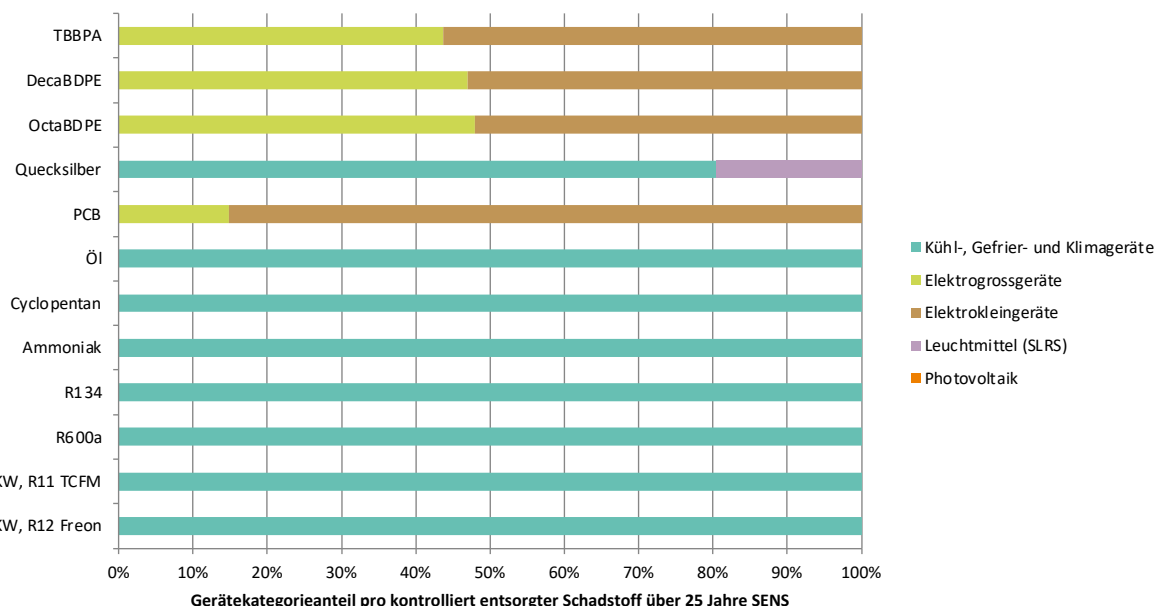


Abbildung 5: Anteil der SENS Gerätekategorien für die jeweiligen separierten und kontrolliert entsorgten Schadstoffe

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	Ferromangan	Kunststoffe	Glas
Tonnen	70'378	10'164	4'386	5'198	901	0.020	0.020	0.33	5.37	65.3	9'205	1'635

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
Tonnen	195	966	176	33.9	7.52	365	1'110	8.84	7.08	0.014	0.12	0.14

4.2.2 Umweltnutzen über 33 Jahre SENS eRecycling

Insgesamt beläuft sich der Umweltnutzen von 33 Jahren SENS Elektrogeräterecyclings auf netto 230'000 Mia. vermiedene UBP⁶, wobei fast der ganze Nutzen (99.7 %) 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. Die 230'000 Milliarden UBP entsprechen ungefähr dem Umweltfussabdruck der gesamten Schweizer Bevölkerung (9 Mio. Einwohner) in 7 Monaten. Dies entspricht einer Senkung der jährlichen Umweltbelastung der Schweiz um durchschnittlich 2 %.

Unter den verhinderten Schadstoffemissionen ist die korrekte Entsorgung von PCB-haltigen Kondensatoren der wichtigste Beitrag zum Umweltnutzen (84.3 %), gefolgt von der korrekten Entsorgung von FCKW R11 (8 %), FCKW R12 (4.4 %), Quecksilber (2.2 %) und BFS (0.5%) (Abbildung 6).

⁶ In Grafiken als negative UBP dargestellt.

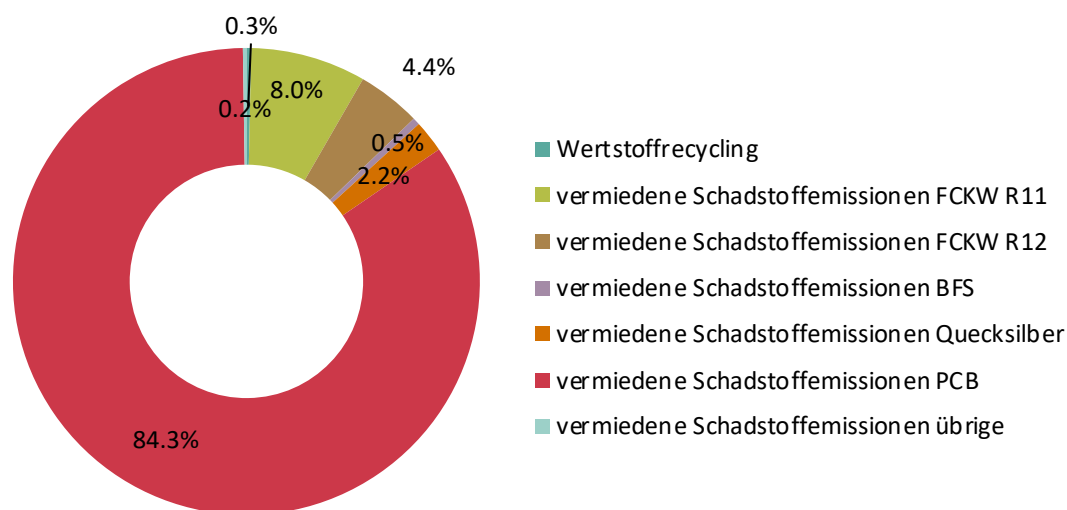


Abbildung 6: Anteil des Wertstoffrecyclings und der Schadstoffvermeidung am Umweltnutzen des SENS Elektrogeräte-recyclings.

Die 8.84 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 7) trägt die Rückgewinnung von Eisen am meisten zum Umweltnutzen des stofflichen Recyclings bei (54.1% des Recyclingnutzens), gefolgt vom Stahl (18.3 %). Die weiteren Anteile am Recyclingnutzen sind 14.7 % für Aluminium, 6.1 % für Kupfer und 5.1 % für Kunststoffe. Die restlichen Wertstoffe wie Zink, Gold, Silber, Blei, Nickel, Ferromangan und Glas tragen zusammen gerade noch 1.7 % zum Umweltnutzen des stofflichen Recyclings bei.

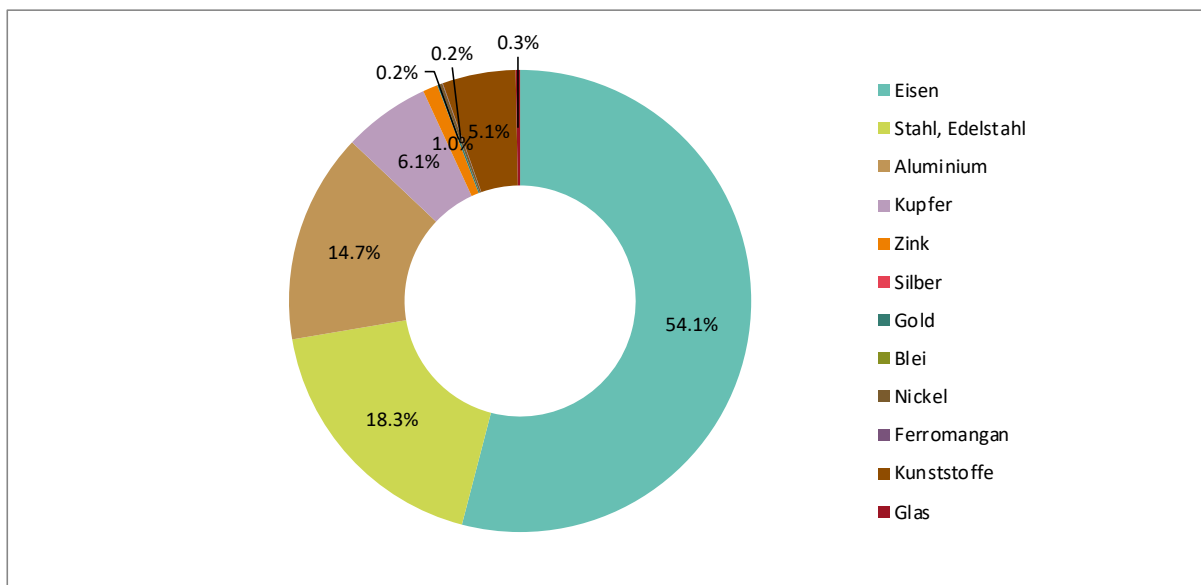


Abbildung 7: Beitrag der Wertstoffe am Umweltnutzen durch das stoffliche Recycling.

Wird nur der Umweltfussabdruck des Aufwands des SENS Elektrogeräterecyclings betrachtet (Abbildung 8), 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.

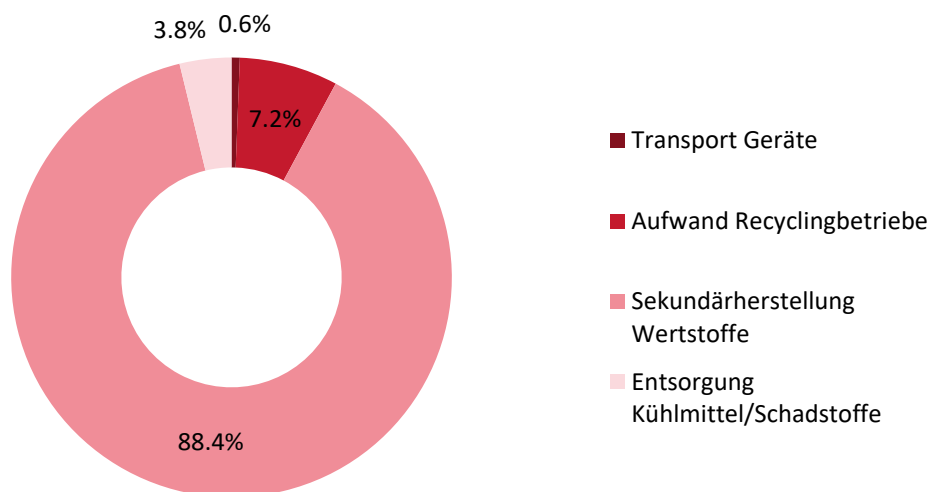


Abbildung 8: Beitrag der Prozesse am Umweltfussabdruck des Aufwands für das SENS Elektrogeräterecycling.

Eine Analyse der Umweltnutzens bezüglich Gerätekategorien (Abbildung 9) zeigt, dass 75.5 % von den Elektrokleingeräten stammen. Dies ist zu fast 100 % den in Vorschaltgeräten aus Leuchten verbauten PCB-haltigen Kondensatoren zuzuschreiben. 9.7 % des Umweltnutzens fällt bei den Elektrogrossgeräten an. Auch hier liegt die Ursache bei den PCB-haltigen Kondensatoren aus den langlebigen Grossgeräten. Die Kühlgeräte tragen 14.3 % zum Umweltnutzen bei. Leuchtmittel tragen 0.4 % dazu bei und Photovoltaik Module tragen weniger als 0.001 % zum Gesamtnutzen bei.

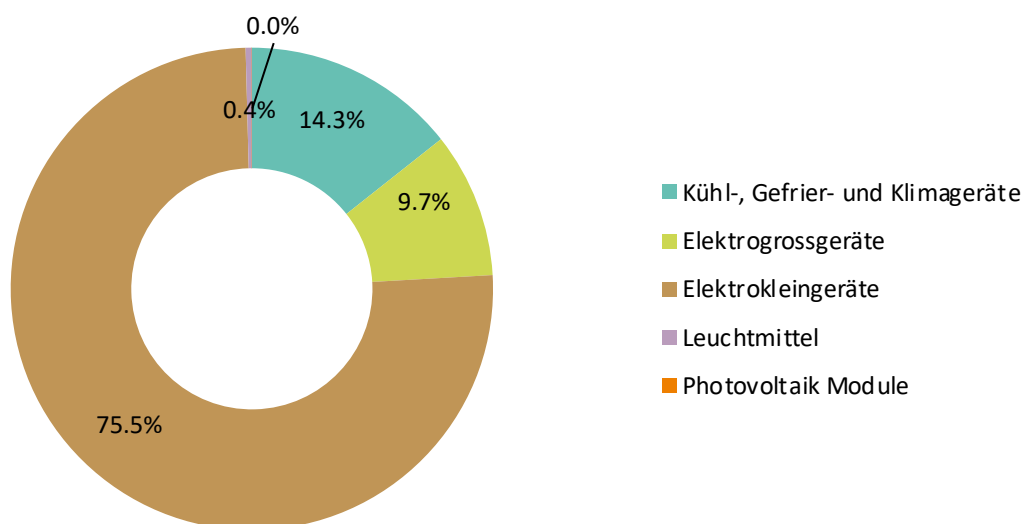


Abbildung 9: Der Nutzen des SENS Elektrogeräterecyclings aufgetrennt nach den Gerätekategorien.

4.2.3 Umweltnutzen pro Jahr

Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen die zeitliche Auflösung des generierten Umweltnutzens des SENS Elektrogeräterecyclings über die 33 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.

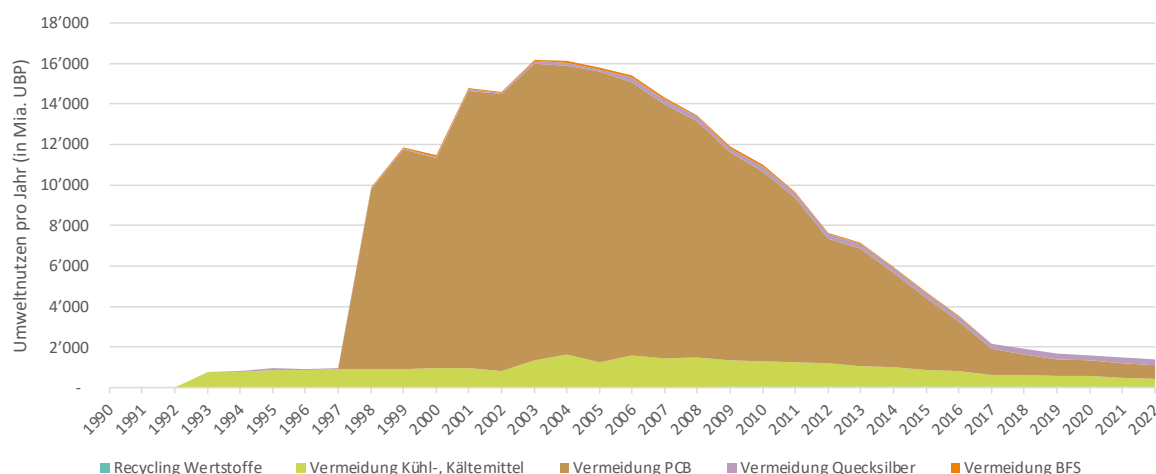


Abbildung 10: Der zeitlich aufgelöste Umweltnutzen des SENS Elektrogeräterecyclings.

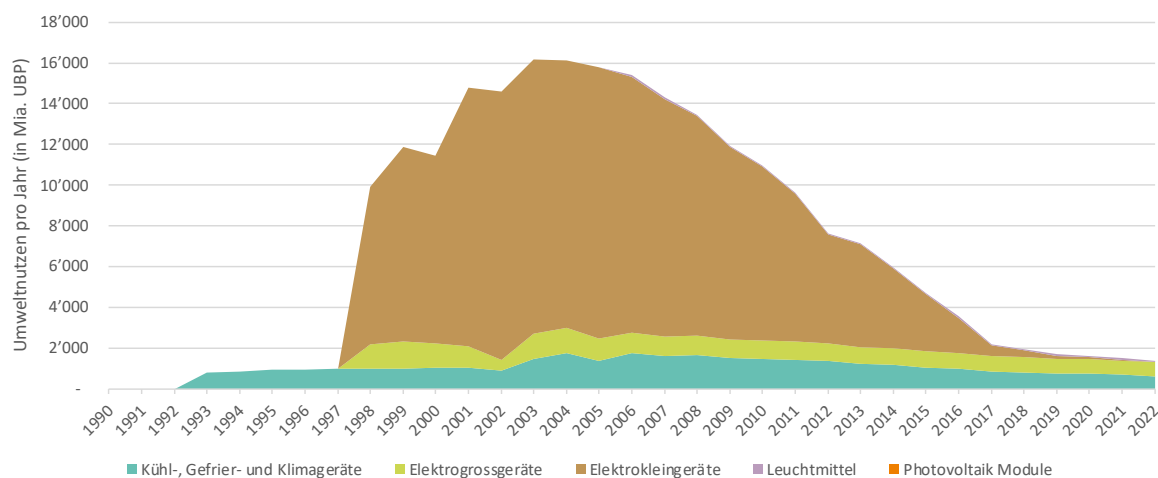


Abbildung 11: Der zeitlich aufgelöste Umweltnutzen des SENS Elektrogerätrecyclings, nach Gerätekategorien.

4.2.4 Umweltnutzen Jahr 2022

Die Abbildung 12 zeigt den die Umweltnutzen im Jahr 2022. Der Umweltnutzen beläuft sich auf 1'370 Mia. UBP. 50 % des Nutzens stammt vom korrekt entfrachteten PCB. Dies ist weit weniger als über 33 Jahre betrachtet (siehe Abbildung 6). Der Grund liegt in der stetigen Abnahme von PCB-haltigen Kondensatoren in Elektroaltgeräten. Rund ein Viertel des Umweltnutzens stammt von der korrekten Entsorgung von Kühlmitteln. Die Entfrachtung von Quecksilber trägt noch 19 % zum Umweltnutzen bei. Das stoffliche Recycling der Wertstoffe macht 4 % des Umweltnutzens aus. Der Anteil ist bereits 5-Mal grösser als über 33 Jahre betrachtet, und wird in Zukunft auch weiter steigen, da sowohl weniger PCB wie auch R11 und R12 Frachten in Zukunft zu erwarten sind. Der Umweltnutzen der BFS Entfrachtung ist aufgrund der geringen heutigen Mengen irrelevant.

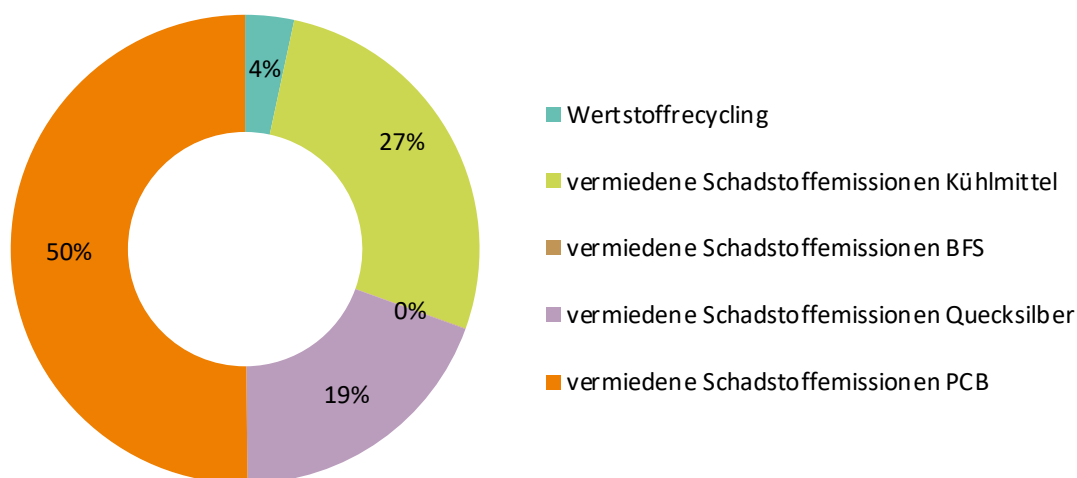


Abbildung 12: Der Umweltnutzen des SENS Elektrogeräterecyclings im Jahr 2022

4.3 Klimanutzen

4.3.1 Klimanutzen über 33 Jahre SENS eRecycling

Insgesamt beläuft sich der Klimanutzen von 33 Jahren SENS Elektrogeräterecyclings auf netto 8.1 Mio. Tonnen CO₂-Äq. Der grosse Teil des Klimanutzens (97 %) stammt dabei von vermiedenen Schadstoffemissionen. Der Klimanutzen der rezyklierten Wertstoffe ist wesentlich tiefer (2.8 %). 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 8.1 Mio. Tonnen CO₂-Äq. emittieren:

- Weltrundflug für die ganze Bevölkerung der Kantone Aargau und St. Gallen zusammen
- fünf Monate Strassenverkehr in der Schweiz.

Unter den verhinderten Schadstoffemissionen trägt die korrekte Entsorgung von FCKW R11 (68.4 %) und FCKW R12 (28.2 %) am meisten zum Klimanutzen bei. (Abbildung 13).

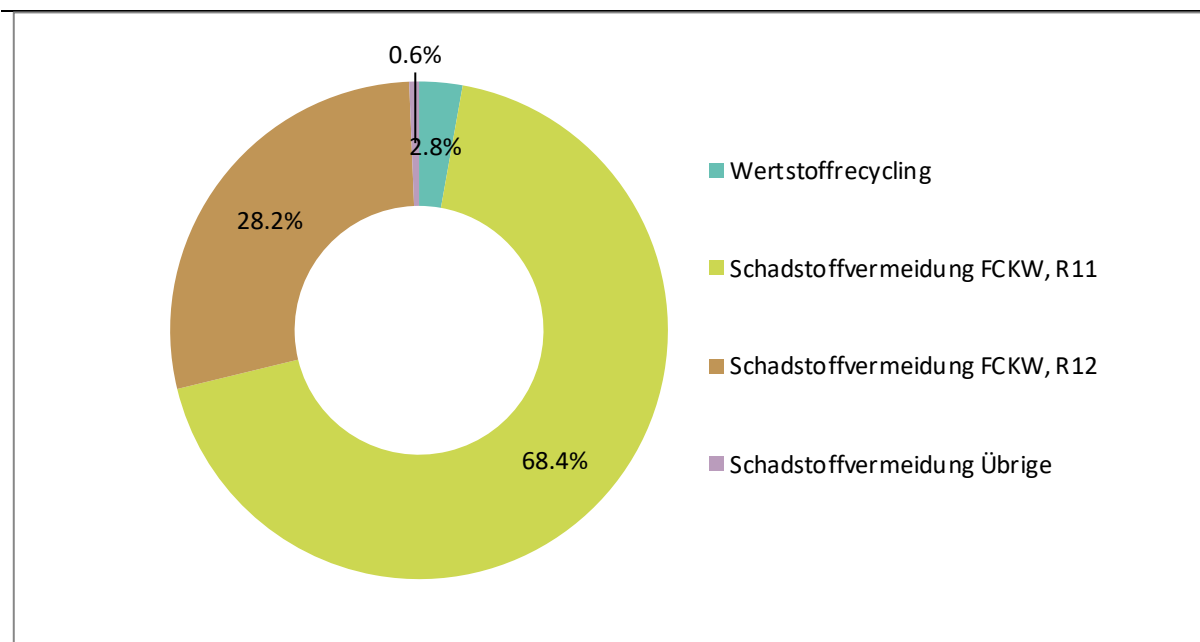


Abbildung 13: Anteil des Wertstoffrecyclings und der Schadstoffvermeidung am Klimanutzen des SENS Elektrogeräte-recyclings (Total 8.1 Mio Tonnen CO₂-Äq).

Trotzdem ist Recycling für die aktuell zurückgewonnen Wertstoffe sinnvoll, da der Klimanutzen des Recyclings (Einsparung von Primärmaterial) den ökologischen Aufwand um ein Vielfaches überwiegt (mindestens um einen Faktor 2). Von den rezyklierten Wertstoffen (Abbildung 14) trägt die Rückgewinnung von Eisen, der massereichste Wertstoff, am meisten zum Klimanutzen des stofflichen Recyclings bei (54.1 %). Die weiteren Anteile am Recyclingnutzen sind 18.3 % für Stahl, 14.7 % für Aluminium, und 6.1 % resp. 5.1 % für Kupfer und Kunststoffe. Die restlichen Wertstoffe wie Glas, Zink, Gold, Silber, Blei, Nickel, Ferromangan und Kunststoffe machen jeweils weniger als 2 % aus.

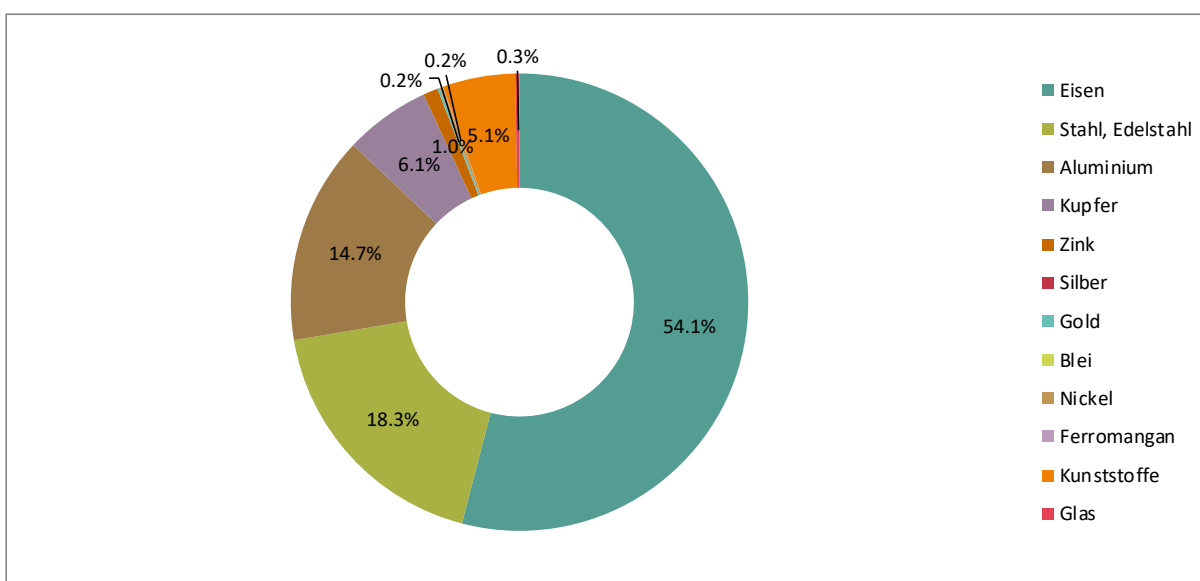


Abbildung 14: Wertstoffanteil am Klimanutzen des stofflichen Recyclings.

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

Wird nur der CO₂-Fussabdruck des Aufwands des SENS Elektrogeräterecyclings betrachtet (Abbildung 15), fällt der grösste Teil auf die Sekundärherstellung der Wertstoffe (58.8 %), gefolgt vom Aufwand der Recyclingbetriebe (32.2 %). Der Transport der Geräte zu den Recyclingbetrieben sowie die korrekte Entsorgung der Schadstoffe tragen nur einen kleinen Teil zum CO₂-Fussabdruck des Aufwands bei.

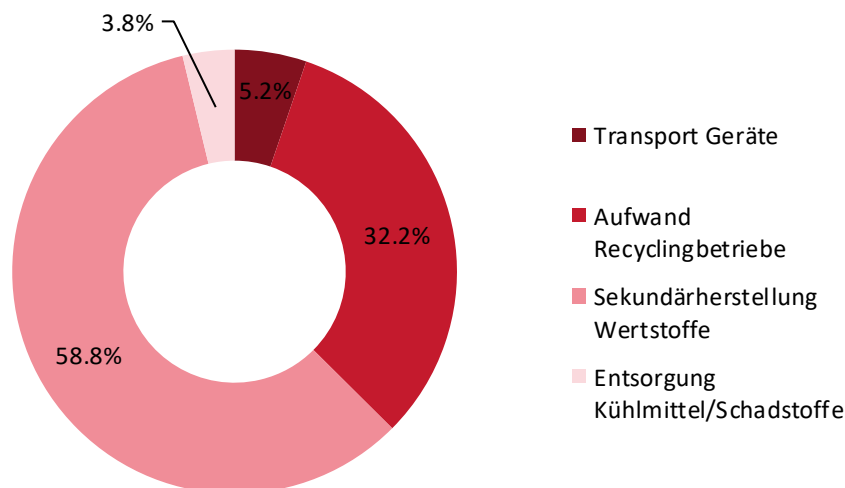


Abbildung 15: Anteil der Prozesse am CO₂-Fussabdruck des Aufwands des SENS Elektrogeräterecyclings.

Eine Analyse der Klimanutzen bezüglich Gerätekategorien (Abbildung 16) zeigt, dass 98.3 % durch die fachgerechte Verarbeitung von Kühl-, Gefrier- und Klimageräten erzeugt wird. Elektrogross- und -kleingeräte tragen zusammen nur 1.7 % bei. Der Anteil von Leuchtmitteln und Photovoltaik Modulen am Klimanutzen ist marginal.

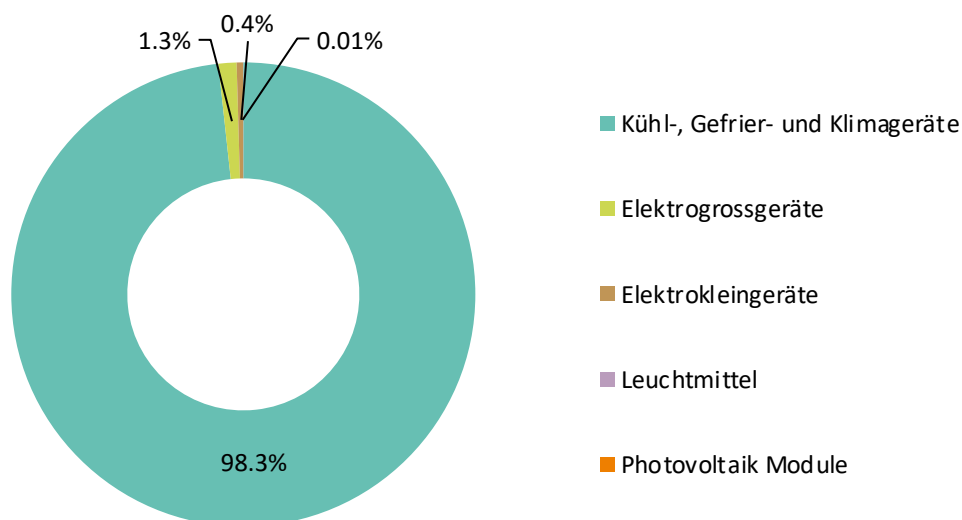


Abbildung 16: Der Klimanutzen des SENS Elektrogeräterecyclings, nach Gerätekategorien.

4.3.2 Klimanutzen pro Jahr

Abbildung 17 und Abbildung 18 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.

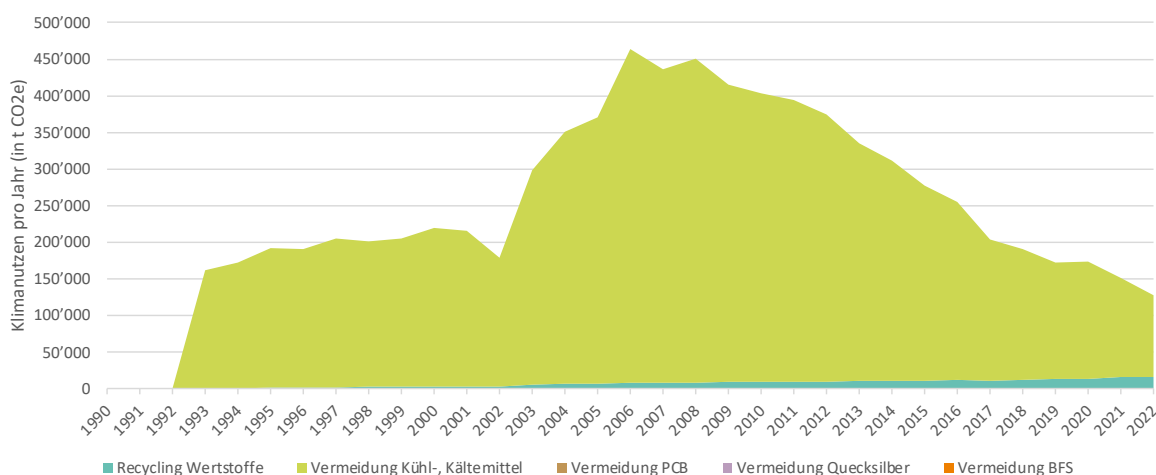


Abbildung 17: Die zeitlich aufgelöste Klimanutzen des SENS Elektrogeräterecyclings.

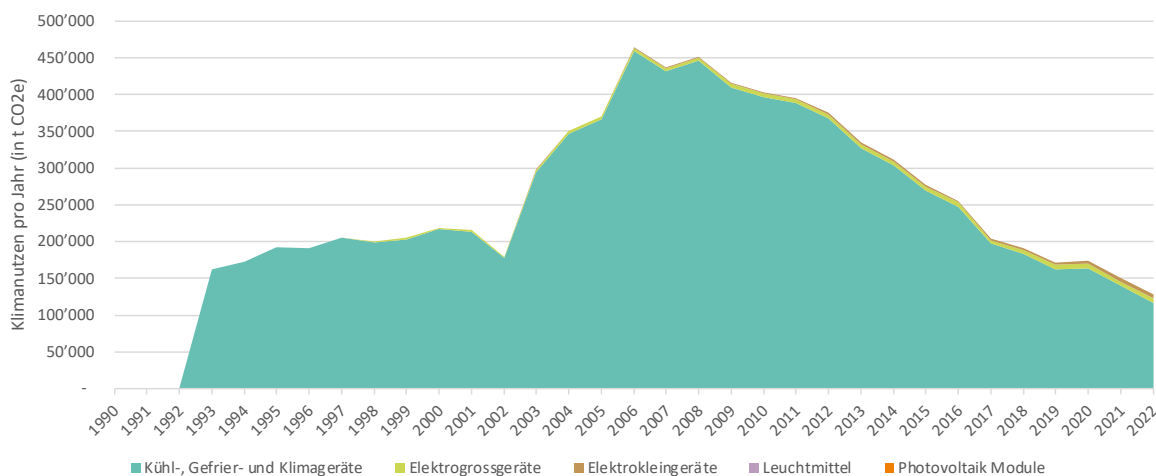


Abbildung 18: Die zeitlich aufgelöste Klimanutzen des SENS Elektrogerätrecyclings, nach Gerätekategorien.

4.3.3 Klimanutzen Jahr 2022

Die Abbildung 19 zeigt den Klimanutzen im Jahr 2022. Der Klimanutzen beläuft sich auf 128'095 t CO₂-Äq. Den weitaus grösste Anteil stammt von der korrekten Entfrachtung der Kältemittel, allen voran vom R11 (55 %) und R 12 (30.7 %). Die weiteren Kältemittel machen nur rund 1.6 % aus. Das stoffliche Recycling der Wertstoffe macht 12.7 % des Umweltnutzens aus. Der Anteil ist bereits 4-Mal grösser als über 33 Jahre betrachtet, und wird in Zukunft auch weiter steigen, da weniger R11 und R12 Frachten in Zukunft zu erwarten sind.

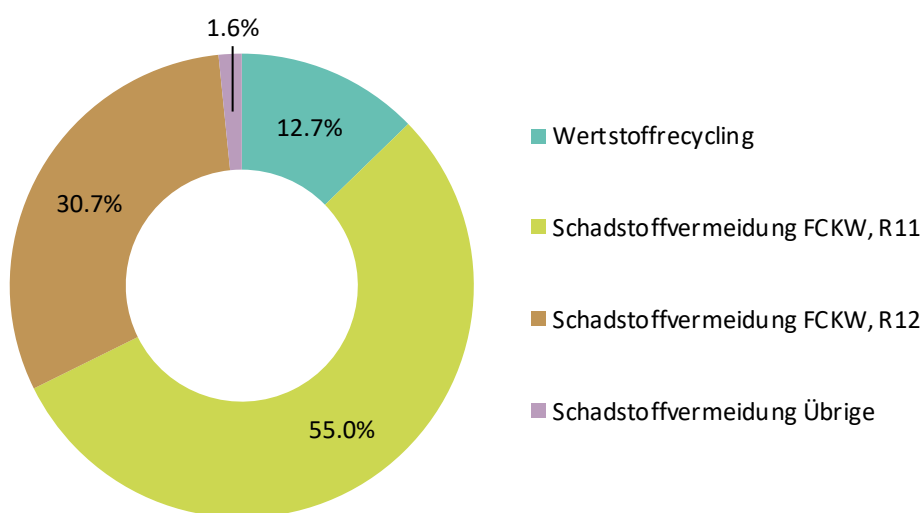


Abbildung 19: Der Nutzen des SENS Elektrogerätrecyclings im Jahr 2022

4.4 Vergleich IPCC 2021 vs. 2013

Abbildung 21 stellt den Klimanutzen dar, einmal berechnet mit der aktuellen Methode IPCC 2021, GWP 100a und einmal mit der Vorgängerversion IPCC 2013, GWP 100a. Es wird deutlich, dass der Klimanutzen mit der Version 2021 wesentlich höhere CO₂-Äq ausweist als mit der Vorgängerversion. Dies hat damit zu tun, dass in der Version 2021 die hergeleiteten Emissionsfaktoren für R11 und R12 wesentlich höher liegen. Als Beispiel sei hier R11 erwähnt: 1 kg R11 wies einen Emissionsfaktor von 4.66 t CO₂-Äq / kg R11 auf in der 2013 Version und in der Version 2021 sind es neu 6.52 t CO₂-Äq / kg R11. Da diese Erhöhung der Emissionsfaktoren einen entscheidenden Einfluss auf den Klimanutzen hat, haben wir in dieser Studie rückwirkend sämtliche Jahre neu mit der Version 2021 gerechnet und nicht nur die beiden aktuellsten Jahre, da es sonst einen nicht nachvollziehbaren und unbegründeten «Sprung» nach oben hinsichtlich des jährlichen Nutzens geben würde. Der Klimanutzen des Wertstoffrecycling ist v.a. CO₂ getrieben, weswegen sich nur minimale Änderungen zwischen den Versionen ergeben.

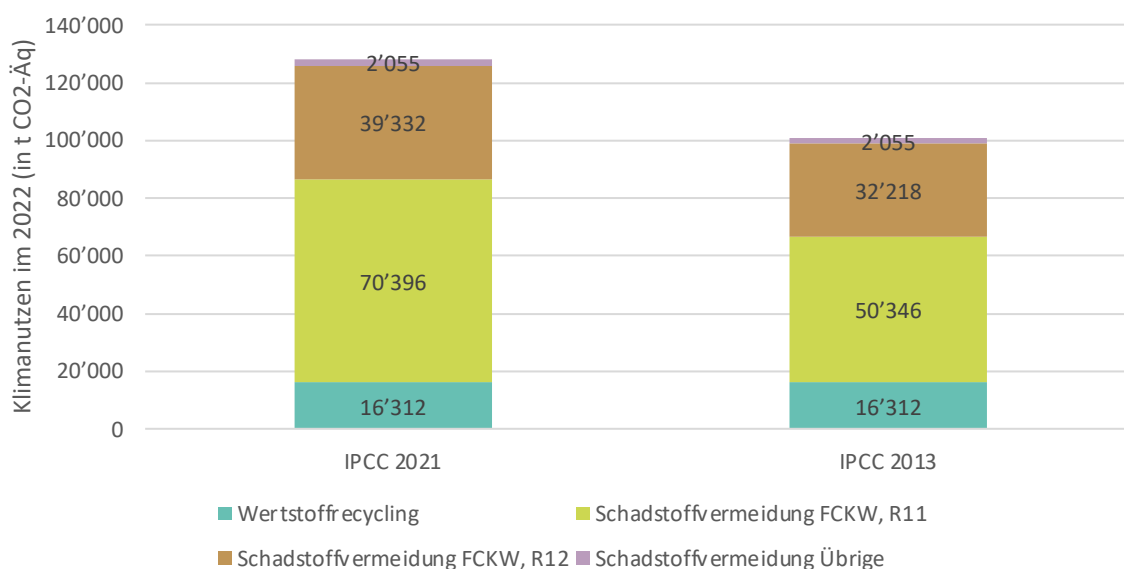


Abbildung 20: Der Nutzen des SENS Elektrogeräterecyclings im Jahr 2022 mit MÖK 21 und MÖK 13

4.5 Vergleich MÖK 2021 vs. MÖK 2013

Abbildung 22 stellt den Umweltnutzen dar, einmal berechne mit der aktuellen Methode der ökologischen Knappheit 2021 und einmal mit der Vorgängerversion 2013. Es wird deutlich, dass der Umweltnutzen mit der Version 2021 wesentlich höhere UBP-Werte ausweist als mit der Vorgängerversion. Dies hat damit zu tun, dass in der Version 2021 die hergeleiteten Emissionsfaktoren wesentlich höher liegen. Als Beispiel sei hier CO₂ erwähnt: 1 kg CO₂ wies einen Emissionsfaktor von 460 UBP / kg CO₂ auf in der 2013 Version und in der Version 2021 sind es neu 1'000 UBP / kg CO₂. Zudem sind auch neue Emissionsfaktoren ergänzt worden in der Version 2021. UBP 2021 sind nicht mit UBP 2013 vergleichbar. Es handelt sich um zwei unterschiedliche «Währungen», die nicht miteinander vermischt werden sollten. Aus diesem Grund haben wir in dieser Studie sämtliche Jahre neu mit der Version 2021 gerechnet und nicht nur die beiden aktuellsten Jahre, da es sonst einen nicht nachvollziehbaren und unbegründeten «Sprung» nach oben hinsichtlich des jährlichen Nutzens geben würde.

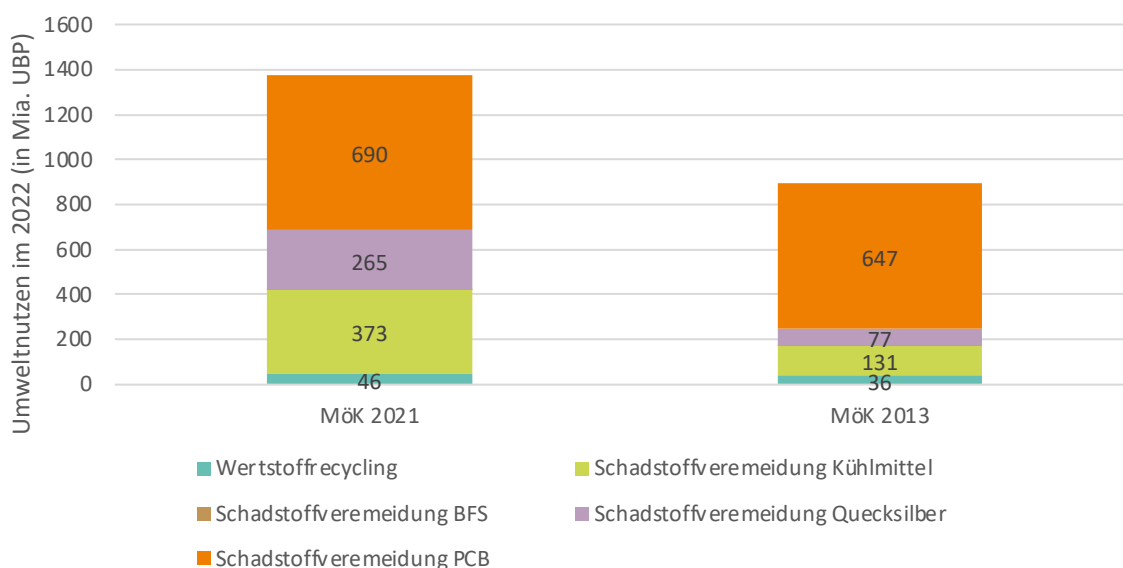


Abbildung 21: Der Nutzen des SENS Elektrogeräterecyclings im Jahr 2022 mit MöK 2021 und MöK 2013

4.6 Referenzszenario 0 % Recycling

Würde davon ausgegangen, dass im Referenzszenario die Geräte ohne Schadstoffentfrachtung unsachgemäss (auf einer Deponie) entsorgt würden (Referenzszenario 0 % Recycling), dann erhöht sich der Umwelt Nutzen im Jahr 2022 massiv von 1'400 Mia. UBP auf 6'000 Mia. UBP. Der grösste Anstieg ist auf die 6 Mal grösser PCB-Fracht zurückzuführen (rund 72 % des Gesamtnutzens). Aber auch das stoffliche Recycling trägt nun 10-Mal mehr Nutzen bei als im Standardreferenzszenario und weist nun einen ähnlich hohen Nutzen auf wie Kühlmittel, oder BFS, oder Quecksilber (je rund 8% zum Gesamtnutzen).

An dieser Stelle möchten wir darauf hinweisen, dass ein Referenzszenario 0 % Recycling nicht wirklich realistisch ist und auch nicht legal wäre. Daher empfehlen wir nicht, diese Zahlen für die externe Kommunikation zu verwenden.

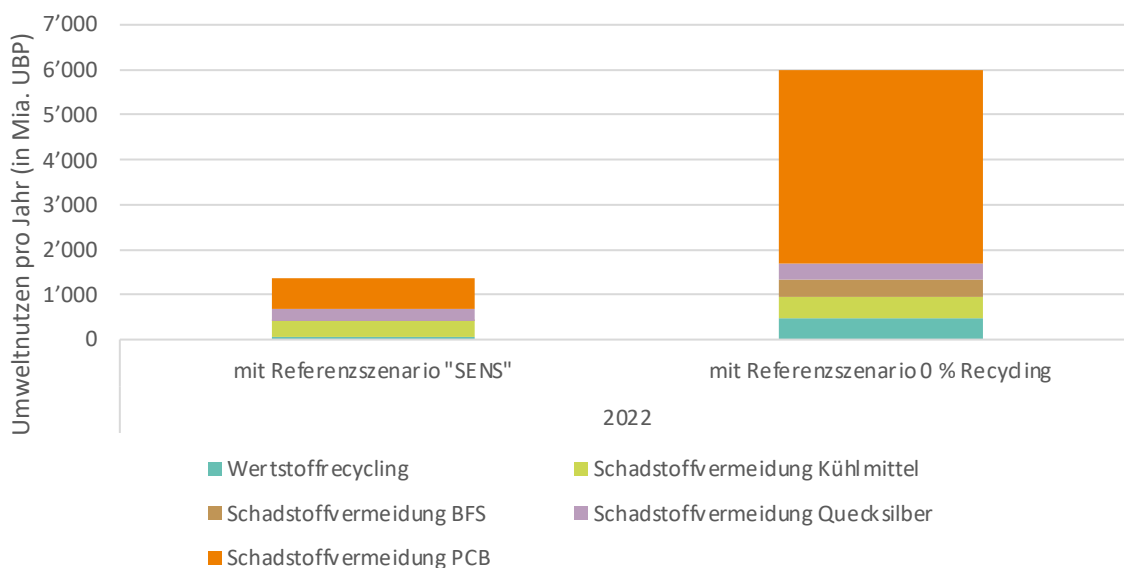


Abbildung 22: Der Nutzen des SENS Elektrogeräterecyclings gegenüber 0% Recycling im Jahr 2022

Tabelle 8: Der Nutzen des SENS Elektrogeräterecyclings gegenüber 0% Recycling im Jahr 2022

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.

	mit Referenzszenario in dieser Studie	mit Referenzszenario 0%
	Mia. UBP	Mia. UBP
Wertstoffrecycling	46	463
Schadstoffvermeidung Kühlmittel	373	497
Schadstoffvermeidung BFS	0.6	378
Schadstoffvermeidung Quecksilber	265	354
Schadstoffvermeidung PCB	690	4310
Total	1375	6001

Schlussfolgerungen

Die vorliegende Ökobilanzstudie zeigt, dass SENS eRecycling im Zusammenspiel mit Konsument*innen, Hersteller/Importeuren, Handel, Leistungspartnern (Sammelstellen, Transporteure, Recyclingbetriebe) und Behörden während 33 Jahren Einsatz einen sehr hohen Umweltnutzen generiert hat. Durch die umweltfreundliche Entsorgung von Elektrogeräten wurde die jährliche Umweltbelastung der Schweiz um durchschnittlich um 3 % - 4 % gesenkt, ein sehr beachtlicher Wert für eine einzelne Massnahme. Der grösste Anteil an diesem Umweltnutzen ist der Vermeidung von PCB-Emissionen durch die fachgerechte Entsorgung von PCB-haltigen Kondensatoren zuzuschreiben.

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

Die Vermeidung von Emissionen von Schadstoffen wie FCKW 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 33 Jahren erzeugte, zeigt, dass der weit-aus 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, 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.

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

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

ecoinvent. (2023). *ecoinvent 2023: Version 3.9*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.

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

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

Frischknecht, R., Dinkel, F., Braunschweig, A., Ahmadi, M., Kägi, T., Krebs, L., u. a. (2021). *Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der Ökologischen Knappheit - Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz* (S. 260). 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. (2006). *ISO 14040:2006 Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. Geneva: International Standard Organisation.

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

Kägi, T., & Conte, F. (2020). *Ökobilanz 30 Jahre Stiftung SENS eRecycling. Ökologischer Nutzen des Elektrogeräts-Recycling durch die SENS über 30 Jahre*.

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

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. (2023). SimaPro 9.5 (Version 9.5.0.0). 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: Umweltnutzen

Getitemengen	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	2020	2021	2022	Total		
Total	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	82'836	85'400	88'000	91'064	89'016	1'360'371	
Kühl-, Gefrier- und Klimageräte	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	82'836	85'400	88'000	91'064	89'016	1'360'371	
Elektrosgrossgeräte	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	35'800	37'100	38'448	37'167	589'084	
Elektrokleingeräte	t	-	-	-	-	-	-	-	-	1'532	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	28'700	29'800	31'207	30'386	380'472	
Leuchtmittel (LRS)	t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	420	1'100	1'110	1'130	1'100	1'130	1'110	960	1'100	1'100	1'100	970	1'059	1'000	1'000	990	955	17'479			
PV	t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	54	89	305	252	300	200	587	936	-	1'787	
Umweltnutzen		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	2020	2021	2022	Total	
Total	Mia LBP	-	-	-	797	830	943	910	980	9'906	11'861	11'453	14'768	14'586	16'180	16'120	15'804	15'394	14'295	13'461	11'911	10'975	9'645	7'631	7'137	5'956	4'716	3'538	2'186	1'922	1'677	1'599	1'487	1'375	228'667	
Kühl-, Gefrier- und Klimageräte	Mia LBP	-	-	-	797	830	943	910	980	9'906	11'861	11'453	14'768	14'586	16'180	16'120	15'804	15'394	14'295	13'461	11'911	10'975	9'645	7'631	7'137	5'956	4'716	3'538	2'186	1'922	1'677	1'599	1'487	1'375	228'667	
Elektrosgrossgeräte	Mia LBP	-	-	-	-	-	-	-	-	1'196	1'347	1'178	1'049	537	1'204	1'249	1'062	987	972	951	935	912	885	865	842	818	804	788	769	757	742	737	710	692	22'284	
Elektrokleingeräte	Mia LBP	-	-	-	-	-	-	-	-	7'753	9'540	9'233	12'686	13'766	13'499	13'132	13'343	12'606	11'667	10'804	9'420	8'544	7'283	5'949	5'025	3'923	2'920	1'718	541	301	148	82	47	32	172'631	
Leuchtmittel	Mia LBP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23	60	60	61	60	61	60	61	60	60	60	60	53	57	54	54	54	52	946		
Photovoltaik Module	Mia LBP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	0.02	0.06	0.05	0.06	0.04	0.07	0.11	0	
Umweltnutzen Recycling 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	2020	2021	2022	Total	
Total	Mia LBP	-	-	-	2	2	3	3	3	8	10	10	8	17	20	21	26	28	29	32	33	32	33	35	36	37	40	41	39	43	46	48	45	46	709	
Verminderung Kühl-, Kältemittel	Mia LBP	-	-	-	763	787	891	850	914	889	902	967	959	813	1'350	1'595	1'251	1'573	1'437	1'479	1'328	1'284	1'232	1'173	1'027	966	834	762	610	587	514	514	451	373	28'701	
Verminderung PCB	Mia LBP	-	-	-	-	-	-	-	-	8'904	10'831	10'354	13'684	13'664	14'628	14'291	14'310	13'488	12'530	11'649	10'249	9'360	8'086	6'133	5'792	4'678	3'563	2'449	1'266	1'018	854	773	724	690	193'276	
Verminderung Quecksilber	Mia LBP	-	-	-	32	40	50	57	63	64	68	72	70	67	121	137	141	219	217	235	234	233	239	248	259	255	265	261	263	266	265	265	265	4'834		
Verminderung BFS	Mia LBP	-	-	-	-	-	-	-	-	41	51	50	45	34	65	78	81	88	89	85	82	72	60	55	49	37	31	26	17	9	1	1	1	1	1'147	
Umweltnutzen pro t Gerät		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	2020	2021	2022	Total	
Total	Mio LBP / t	-	-	-	256.37	216.46	197.61	165.42	163.10	633.69	629.49	587.25	779.11	948.24	512.02	416.55	392.95	304.83	264.68	236.86	193.04	173.85	155.54	112.95	100.95	83.18	61.17	43.84	29.08	23.20	19.63	18.17	16.33	15.44	168.09	
Kühl-, Gefrier- und Klimageräte	Mio LBP / t	-	-	-	256.37	216.46	197.61	165.42	163.10	633.69	629.49	587.25	779.11	948.24	512.02	416.55	392.95	304.83	264.68	236.86	193.04	173.85	155.54	112.95	100.95	83.18	61.17	43.84	29.08	23.20	19.63	18.17	16.33	15.44	168.09	
Elektrosgrossgeräte	Mio LBP / t	-	-	-	-	-	-	-	-	149.52	136.10	122.69	109.27	95.86	82.44	69.02	55.61	42.19	37.23	35.48	30.75	29.70	31.83	28.54	27.51	27.82	24.43	24.23	27.38	22.10	20.73	19.60	18.47	18.62	37.83	
Elektrokleingeräte	Mio LBP / t	-	-	-	-	-	-	-	-	506.80	3'906.48	3'074.10	4'779.19	3'892.26	2'499.86	1'750.98	1'434.76	1'178.12	948.57	782.88	632.19	554.80	446.82	284.49	225.35	164.16	112.79	61.57	20.26	10.93	5.14	2.77	1.52	1.06	453.73	
Leuchtmittel	Mio LBP / t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	54.14	54.14	54.14	54.14	54.14	54.14	54.14	54.14	54.14	54.14	54.14	54.14	54.14	54.14	54.14	54.14	54.14	54.14	54.14	54.14	
Photovoltaik Module	Mio LBP / t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.11	0.18	
Umweltnutzen Kühl-, Gefrier- und Kältemittel		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	2020	2021	2022	Total	
Total	Mia LBP	-	-	-	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	7	7	7	9	8	9	9	9	9	10	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	214	
Verminderung Kühl-, Kältemittel	Mia LBP	-	-	-	763	787	891	850	914	889	902	967	959	813	1'350	1'595	1'251	1'573	1'437	1'479	1'328	1'284	1'232	1'173	1'027	966	834	762	610	587	514	514	451	373	28'701	
Verminderung PCB	Mia LBP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Verminderung Quecksilber	Mia LBP	-	-	-	32	40	50	57	63	64	68	72	70	67	121	137	141	219	217	235	234	233	239	248	259	255	265	261	263	266	265	265	265	265	4'834	
Verminderung BFS	Mia LBP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Umweltnutzen Elektrosgrossgeräte		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	2020	2021	2022	Total	
Total	Mia LBP	-	-	-	-	-	-	-	-	4	5	5	3	8	10	12	14	16	16	16	16	16	16	15	17	17	15	18	19	20	19	18	17	18	310	
Verminderung Kühl-, Kältemittel	Mia LBP	-	-	-	-	-	-	-	-	1'161	1'307	1'140	1'014	518	1'157	1'196	1'011	930	914	898	882	866	850	834	818	802	786	770	755	739	723	707	691	674	21'470	
Verminderung PCB	Mia LBP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Verminderung Quecksilber	Mia LBP	-	-	-	-	-	-	-	-	31	36	32	30	16	39	44	41	45	44	39	37	30	20	15	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	504
Verminderung BFS	Mia LBP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Umweltnutzen Elektrokleingeräte		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	2020	2021	2022	Total	
Total	Mia LBP	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	2	3	4	4	5	6	7	7	7	8	9	11	11	12	13	13	13	15	16	14	16	182	
Verminderung Kühl-, Kältemittel	Mia LBP	-	-	-	-	-	-	-	-	7'743	9'524	9'214	12'670	13'147	13'470	13'094	1																			

Anhang 2 Resultate in Tabellenform: Klimanutzen & Stoffflüsse

Klimanutzen		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	2020	2021	2022	Total	
		Total	t CO2eq	-	-	-	161714	172632	191662	191277	205583	200663	205267	218956	215701	178904	297852	351009	370414	464403	436918	451239	415291	403171	394726	374774	334512	310907	277488	255591	204196	190993	171845	172644	151513	120895
Kühl-, Gefrier- und Klimageräte	t CO2eq	-	-	-	161714	172632	191662	191277	205583	199032	203199	216894	213760	177554	294640	346954	366407	458914	438341	445517	408976	396661	388726	368056	327440	303901	269800	247723	197161	182856	162761	163953	139467	116366	7834873	
Elektrossenageräte	t CO2eq	-	-	-	-	-	-	-	-	1493	1848	1792	1792	1045	2725	3378	3199	3919	4371	4488	5091	5142	4656	5075	5125	4924	5510	5443	4706	5734	6206	6711	6283	6049	100654	
Elektroklengeräte	t CO2eq	-	-	-	-	-	-	-	138	220	271	239	305	487	677	782	899	1034	1161	1253	1371	1582	1777	2011	2104	2348	2247	2319	2795	2903	2513	2576	2903	35532	35532	
Leuchtmittel	t CO2eq	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27	71	72	73	71	73	72	62	71	71	71	71	71	63	64	64	63	60	126		
Photovoltaik Module	t CO2eq	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	6	19	16	19	12	27	44	102	
Klimanutzen		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	2020	2021	2022	Total	
Recycling Wertstoffe	t CO2eq	-	-	-	639	787	981	1130	1234	2885	3484	3408	2666	5956	6748	6229	7871	8302	8664	9397	9608	9372	10128	10326	10357	11214	11608	10814	12030	12960	13607	16147	16312	211591		
Vermeidung Kühl-, Kältemittel	t CO2eq	-	-	-	161076	171844	190682	190147	204349	197779	201864	215476	212294	176240	292257	344263	364186	456534	428517	442576	405896	393565	385355	364647	324187	300551	266275	243984	193383	178962	158885	160038	134906	111782	7760717	
Vermeidung PCB	t CO2eq	-	-	-	-	-	-	-	-	-1.0	-1.2	-1.1	-1.5	-1.5	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.6	-0.6	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1		
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	-0.0	-0.0		
Vermeidung BfS	t CO2eq	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Klimanutzen pro 1 Gerät		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	2020	2021	2022	Total	
DurchschnittSENS	t CO2eq /	-	-	-	52.00	45.05	40.15	34.77	34.21	12.84	10.89	11.23	11.38	11.63	9.43	9.07	9.21	9.20	8.99	7.94	6.73	6.39	6.37	5.55	4.73	4.34	3.60	3.17	2.72	2.31	2.01	1.97	1.66	1.44	5.86	
Kühl-, Gefrier- und Klimageräte	t CO2eq /	-	-	-	52.00	45.05	40.15	34.77	34.21	32.63	31.26	31.43	31.89	27.74	25.40	26.49	32.14	30.03	29.75	29.50	26.72	24.95	23.13	21.03	19.61	17.67	14.91	12.90	10.16	9.15	8.18	8.16	6.83	5.67	20.99	
Elektrossenageräte	t CO2eq /	-	-	-	-	-	-	-	-	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.16	0.16	0.17	
Elektroklengeräte	t CO2eq /	-	-	-	-	-	-	-	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.10	0.10	0.10	0.17	0.18	0.09	
Leuchtmittel	t CO2eq /	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	
Photovoltaik Module	t CO2eq /	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06
Gesamelte Mengen an Wert- und Schadstoffen des SENS Systems		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	2020	2021	2022	Total	
Werkstoffe	t	-	-	-	14403.3	17714.7	27210.7	27547.6	27922.5	8081.9	9714.7	9398.2	9780.5	7485.4	15934.8	19330.3	19886.3	24728.1	26526.5	27762.0	30370.0	31006.2	30747.6	32751.0	33931.1	33941.8	36815.1	38146.2	35217.2	39404.6	42468.2	43545.7	43581.3	42728.8	661050	
Stahl, Edelstahl	t	-	-	-	620.7	764.8	952.7	1097.9	1199.1	1511.0	1660.6	1729.4	1689.5	1482.8	2850.9	3278.8	2976.2	3912.4	3851.9	3997.3	4169.4	4300.1	4373.3	4604.7	4456.1	4511.8	4819.9	5024.8	4903.2	5246.3	5351.0	5425.6	5449.0	5430.9	96211	
Aluminium	t	-	-	-	14.7	18.1	22.6	26.0	28.4	33.9	44.3	47.1	44.9	38.8	71.5	98.7	133.6	136.4	161.6	170.4	184.6	184.6	184.6	204.9	212.6	249.1	249.4	265.8	246.0	285.5	370.9	292.7	278.1	41701		
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	2042.9	2067.8	2269.9	2413.5	2489.5	2651.3	2832.5	2694.8	2883.5	3730.5	3891.2	3661.2	3610.6	48371	
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	459.9	550.7	390.4	376.7	406.4	334.2	8768		
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	0.0	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	0.0	0.0	0.0	0.0	
Blei	t	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0	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	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
Nickel	t	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2	0.2	0.3	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	4.6	4.1	6.5	8.5	45
Eisenmangan	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	49.8	45.6	47.4	49.6	48.3	605	
Kunststoffe	t	-	-	-	448.2	552.2	687.9	792.7	865.8	1001.5	1132.0	1234.5	1177.8	1192.8	2103.5	2487.6	2386.7	3060.6	3073.3	3729.8	3996.6	3521.1	3724.7	4205.6	4190.3	4590.9	4598.5	4792.1	5084.5	6752.6	6757.2	6970.4	6775.8	88252		
Gas	t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	324.7	850.3	858.0	873.5	850.3	873.5	858.0	873.5	858.0	873.5	858.0	873.5	892.0	919.1	985.6	1013.2	1004.9	927.6	1219.1	14893	
Total Wertstoffe	t	-	-	-	2656.4	3273.2	4077.4	4698.7	5131.9	11546.2	13697.0	14145.7	13780.5	11888.5	22921.7	27771.4	28340.2	35936.6	38003.0	39846.6	43073.7	44094.1	43360.7	46945.8	48528.7	49024.6	52846.6	55154.4	51705.2	56923.4	62234.6	64001.6	64270.8	63185.2	959179	
Schadstoffe		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	2020	2021	2022	Total	
CKW, 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	5.0	5.1	5.0	4.2	256	
CKW, R11 TCFM	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	22.3	22.1	18.4	15.2	1272	
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	8.7	8.6	9.8	7.8	227	
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	3.3	3.6	2.3	1.8	43	
Ammeniak	t	-	-	-	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3</																				