

Ökobilanzielle Untersuchung zur Verwertung von FCKW- und KW- haltigen Kühlgeräten

Update 2016

**Im Auftrag der RAL-Gemeinschaft
Rückproduktion von Kühlgeräten e.V.**

Darmstadt, 29.02.2016

Autoren

Doris Schüler
Jürgen Sutter

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

info@oeko.de
www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	2
Tabellenverzeichnis	3
1. Hintergrund der Studie und Aufbau des Berichts	5
2. Beschreibung der Varianten	5
2.1. Variante 1: Mischbetrieb	5
2.2. Variante 2: Parallelbetrieb	5
2.3. Variante 3: Stufe 2 im Spezialshredder bei KW-Geräten	6
2.4. Variante 4: Stufe 1 + 2 beim Autosshredder bei KW-Geräten	6
3. Parameter-Update	6
4. Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	8
4.1. Standardvarianten	10
4.1.1. Treihauspotenzial (GWP)	10
4.1.2. Versauerungspotenzial (AP)	11
4.1.3. Eutrophierungspotenzial (EP)	13
4.1.4. Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)	15
4.1.5. Ozonzerstörungspotenzial (ODP)	17
4.1.6. Kumulierter Energieaufwand (CED total)	19
4.2. Sensitivitätsrechnungen	21
4.2.1. Variante 4 mit 5 % Fehlsortierung	22
4.2.2. Variante 2 mit stofflicher Verwertung des PS	23
4.2.3. Anteil der KW-Geräte 90 %	24
5. Fazit	25
6. Literatur	27
Annex 1: Verwendete generische Datensätze	29

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-1:	Treibhausgaspotenzial (Standardvarianten)	10
Abbildung 4-2:	Treibhausgaspotenzial nach Prozessschritten (Standardvarianten)	11
Abbildung 4-3:	Versauerungspotenzial (Standardvarianten)	12
Abbildung 4-4:	Versauerungspotenzial nach Prozessschritten (Standardvarianten)	13
Abbildung 4-5:	Eutrophierungspotenzial (Standardvarianten)	14
Abbildung 4-6:	Eutrophierungspotenzial nach Prozessschritten (Standardvarianten)	15
Abbildung 4-7:	Photoxidantenpotential (Standardvarianten)	16
Abbildung 4-8:	Photoxidantenpotential nach Prozessschritten (Standardvarianten)	17
Abbildung 4-9:	Ozonerstörungspotential (Standardvarianten)	18
Abbildung 4-10:	Ozonerstörungspotential nach Prozessschritten (Standardvarianten)	19
Abbildung 4-11:	Kumulierter Energieaufwand (Standardvarianten)	20
Abbildung 4-12:	Kumulierter Energieaufwand, nach Prozessschritten (Standardvarianten)	21

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Zusammensetzung der Kühlgeräte	7
Tabelle 4-1:	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (Standard)	9
Tabelle 4-2:	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (Sensitivität: Variante 4 mit 5 % Fehlsortierquote)	22
Tabelle 4-3:	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (Sensitivität: Variante 2 mit stofflicher Verwertung des PS)	23
Tabelle 4-4:	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (Sensitivität: 90 % KW-Geräte)	24
Tabelle A-1:	Für die Ökobilanz verwendete generische Datensätze	29

1. Hintergrund der Studie und Aufbau des Berichts

Die vorliegende Studie wurde von der RAL-Gemeinschaft Rückproduktion von Kühlgeräten e.V. beauftragt. Zentraler Gegenstand ist ein Update der Ökobilanziellen Untersuchung zur Verwertung von FCKW- und KW-haltigen Kühlgeräten aus dem Jahr 2008 [OEKO 2008]. Hierin wurden verschiedene Entsorgungsoptionen für FCKW- und KW-haltige Kühlgeräte aus privaten Haushalten untersucht. Für das Update wurde eine Reihe von Grunddaten und Parametern aktualisiert. Insbesondere wurden die Anteile FCKW- und KW-Geräte im Input der Anlagen den heutigen Gegebenheiten angepasst. Außerdem wurde ein in 2020 zu erwartender Mix der Geräte modelliert.

Die Ökobilanz in 2008 wurde gemäß ISO 14040/14044 sowie ISO TS 14071 durchgeführt. Da es sich hier um ein Update der zugehörigen Studie handelt, wird für die umfassende Beschreibung der Entsorgungsprozesse, der Systemgrenzen und des Untersuchungsrahmens der Ökobilanz, der Wirkungskategorien, der Datenrepräsentativität, der Allokationsmethoden und der Auswertung auf den Bericht von 2008 verwiesen.

Verglichen wurden vier Entsorgungsoptionen:

- Mischbetrieb
- Parallelbetrieb
- Spezialshredder für KW-Geräte in Stufe 2
- Autoshredder für KW-Geräte in Stufe 1 und 2

2. Beschreibung der Varianten

2.1. Variante 1: Mischbetrieb

Die Entsorgung aller Kühlgeräte erfolgt in Variante 1 ausschließlich beim Kühlgeräterecycler. Die KW- und FCKW-Geräte werden hierbei zeitgleich in einer gemeinsamen Anlage entsorgt. Das erzeugte PUR-Mehl wird als Aufsaugmaterial eingesetzt; eine hochreine Polystyrolfraktion wird stofflich verwertet. Die Metalle werden dem Metallrecycling zugeführt. Unreinere Kunststofffraktionen gehen zur Müllverbrennung und zum Zementwerk. Das Glas wird ins Glasrecycling überführt.

2.2. Variante 2: Parallelbetrieb

Die Entsorgung aller Kühlgeräte erfolgt ausschließlich beim Kühlgeräterecycler. Die KW- und FCKW-Geräte werden hierbei in getrennten Anlagen entsorgt (kein Batch-Betrieb). Die FCKW-Schiene arbeitet prinzipiell wie im Mischbetrieb (Variante 1).

Für die KW-Schiene wird im Modell bilanziert, dass das Cyclopentan, das während des Zerkleinerns ausgast (30 % der Gesamtmenge im Schaum) als Emission freigesetzt wird. Das stückige PUR wird anschließend in einer Müllverbrennungsanlage entsorgt.

Weiterhin wird modelliert, dass 1 % der FCKW-Geräte falsch sortiert und gemeinsam mit den KW-Geräten entsorgt wird. Als Folge werden 30 % des FCKW in die Umgebungsluft

emittiert. Das Polystyrol aus den KW-Geräten kann mangels Reinheit nicht stofflich recycelt werden sondern wird in einem Zementwerk thermisch verwertet.

2.3. Variante 3: Stufe 2 im Spezialshredder bei KW-Geräten

Die Variante 3 geht davon aus, dass die Stufe 1 für alle Geräte beim Kühlgeräterecycler im Parallelbetrieb durchgeführt wird. Die richtig sortierten FCKW-Geräte werden dann in Stufe 2 wie in Variante 1 beim Kühlgeräterecycler entsorgt.

Die KW-Geräte und die fehlsortierten FCKW-Geräte (Fehlsortierquote 1 %) werden zu einem Spezialshredder transportiert und dort verwertet. Der Spezialshredder arbeitet im Wesentlichen wie ein Autosshredder (siehe Variante 4), jedoch mit dem Unterschied, dass hier die PUR-Schäume den Shredder in größeren Stücken verlassen, so dass weniger Cyclopentan (bzw. R11 aus den fehlsortierten Geräten), freigesetzt wird (angenommene Freisetzung im Spezialshredder 40 % und im Autosshredder 70 %). Die weitere Verwertung der Shredderleichtfraktion (SLF) erfolgt in der MVA (60 %) und im Postshredder (40 %).

2.4. Variante 4: Stufe 1 + 2 beim Autosshredder bei KW-Geräten

Die Variante 4 geht davon aus, dass bei der Sammelstelle, beispielsweise dem Bauhof, eine Sortierung in KW- und FCKW-Geräte erfolgt. Die FCKW-Geräte werden dann, abgesehen von fehlsortierten Geräten, wie in den vorhergehenden Varianten beim Kühlgeräterecycler mit hohem Umweltstandard entsorgt. Die KW-Geräte sowie fehlsortierte FCKW-Geräte (Fehlsortierquote 1 %) werden zu einem Autosshredder transportiert und dort verwertet. Im Gegensatz zum Spezialshredder werden die PUR-Schäume feiner zerkleinert, so dass hier angenommene 70 % des Cyclopentans bzw. 70 % des R11 aus den fehlsortierten Geräten freigesetzt werden. Die weitere Verwertung der Shredderleichtfraktion (SLF) erfolgt in der MVA (60 %) und im Postshredder (40 %).

3. Parameter-Update

Folgende Bezugsgrößen und Parameter wurden für das Update der Studie aktualisiert:

Die Materialzusammensetzung der Kühlgeräte wurde folgendermaßen mit neuen Zahlen eines Recyclers (RAL 2015, siehe Tabelle 3-1) aktualisiert:

Tabelle 3-1: Zusammensetzung der Kühlgeräte

Material	Wert
FE-Metalle	17,69 kg
Glas	1,317 kg
Kabel	0,109 kg
Hg-Schalter	0,001 kg
Kälteöle	0,243 kg
PUR	4,458 kg
Kunststoffe (ohne PUR)	6,2 kg
Gummi	0,06 kg
Kompressor	8,705 kg
Wasser	1,022 kg
R12 pro FCKW-Gerät	0,11 kg
Isobutan pro KW-Gerät	0,06 kg
Rest	0,557 kg

Quelle: RAL 2015

Aktuelle Statistiken gehen für das Jahr 2014 von einer Entsorgung von 2,97 FCKW- und KW-Haushaltskühlgeräten in Deutschland aus [stiftung ear 2015]. Hierbei wird zunächst von einem derzeitigen Anteil der KW-Geräte von 55 % ausgegangen (alte Bilanz: 20 % bzw. Sensitivität mit 50 %). In einer Sensitivitätsanalyse wird zusätzlich ein KW-Geräte-Anteil von 90 % betrachtet. Dies entspricht dem zu erwartenden KW-Geräte-Anteil ab ca. 2020.

Der Energiebedarf für den Shredder und den Postshredder wurde nach neuen Expertenschätzungen wie folgt festgelegt:

- Strombedarf Shredder: 31 kWh/ t Input
- Dieselbedarf Shredder: 2,26 l / t Input
- Strombedarf Postshredder: 168 kWh/ t Input
- Dieselbedarf Postshredder: 0,75 l / t Input

Bei den FCKW-Geräten wird hier davon ausgegangen, dass das Treibgas beim PUR-Schaum zu 90 % aus R11 und zu 10 % aus R12 besteht (alte Bilanz: 100 % R11).

Als Aufsaugmaterial ersetzt das gemahlene PUR-Mehl heute Kieselgur (alte Bilanz: Sägespäne). Die Kieselgurproduktion wurde mangels genauerer Daten mit der Herstellung von Kalk abgeschätzt.

Weiterhin wurden die generischen Datensätze für alle Vorketten upgedatet. Während diese in der alten Studie in der Regel aus der Gemis-Datenbank entnommen wurden, wurden für das Update entsprechende Datensätze aus ecoinvent 3.2 verwendet. Für die Müllverbrennungsanlage (MVA), die Stromproduktion, das Glasrecycling, die Hochtemperaturverbrennung (HTV), das Zementwerk und den Hochofen wurden eigene Modelle verwendet.

Die Werte für den Energie- und Hilfsstoffbedarf beim Kühlgeräterecycler, Abluftemissionen, Schaum-Anhaftung an Metallen und Kunststoffen, Transportwege, Abbauraten in MVA, Zementwerk und Hochofen sind identisch mit den jeweiligen Werten in der Studie von 2008. Auch die Anteile der Shredderleichtfraktion, die in die MVA bzw. den Postshredder überführt werden sind identisch zur alten Studie.

Die neue Generation von Kühlgeräten mit Vakuumisulationspaneelen ist in dieser Studie nicht berücksichtigt worden, weil ihr Anteil an den Altgeräten noch sehr klein ist. Dennoch müssen künftig auch hier ökologische Entsorgungspfade eingeschlagen werden, damit es zu keinen Emissionen von lungenrelevanten Staubemissionen aus den Füllstoffen der VIP kommt.

4. Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

Die berücksichtigten Wirkungskategorien umfassen Treibhausgaspotenzial (GWP), Versauerungspotential (AP), Eutrophierungspotential (EP), Photochemisches Oxidantienbildungspotential (POCP), Ozonzerstörungspotential (ODP) und Kumulierter nergieaufwand (CED total).

Die Ergebnisse der Ökobilanz beziehen sich in der Standardrechnung auf einen Anteil der KW-Geräte von 55 % und einen Anteil der FCKW-Geräte von 45 %. In einer Sensitivitätsanalyse wird zusätzlich ein KW-Geräte-Anteil von 90 % betrachtet.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für alle betrachteten sechs Wirkungskategorien. Positive Werte bedeuten hierbei Umweltbelastungen, negative Werte Umweltentlastungen. Hier überwiegen die Gutschriften aus den Verwertungsprozessen die Umweltbelastungen. Die aus Umweltsicht jeweils günstigsten Werte sind fett markiert, die jeweils ungünstigsten Varianten sind rot.

Tabelle 4-1: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (Standard)

Wirkungskategorie	Einheit	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Treibhauspotenzial (GWP)	t CO ₂ -eq./a	-403.617	-390.020	-365.514	-350.119
Versauerungspotenzial (AP)	t SO ₂ -eq./a	-2.339	-2.295	-2.994	-3.020
Eutrophierungspotenzial (EP)	t PO ₄ -eq./a	-1.602	-1.668	-1.659	-1.672
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP)	t ethylene-eq./a	-216	-159	-142	-38
Ozonerstörungspotenzial (ODP)	kg R11-eq./a	377	2226	4005	5231
Kumulierter Energieaufwand (CED)	MJ/a	-4,1,E+09	-4,0,E+09	-4,7,E+09	-4,7,E+09

4.1. Standardvarianten

4.1.1. Treibhauspotenzial (GWP)

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse für das Treibhausgaspotenzial in Summe bzw. aufgeschlüsselt nach den einzelnen Prozessschritten.

Abbildung 4-1: Treibhausgaspotenzial (Standardvarianten)

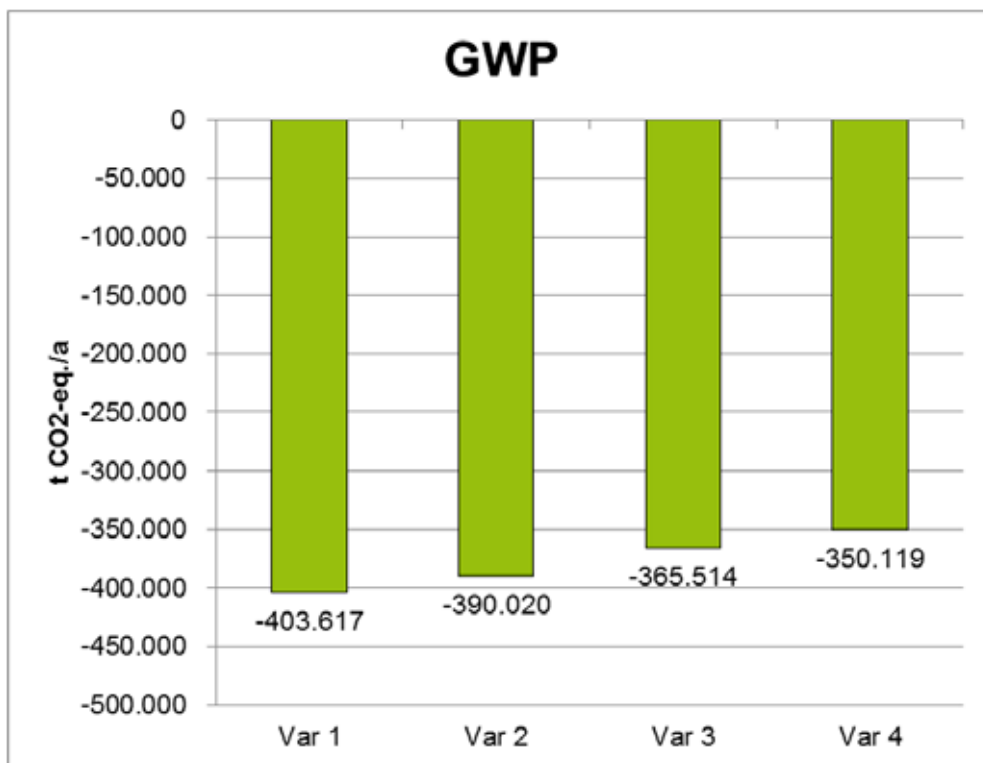
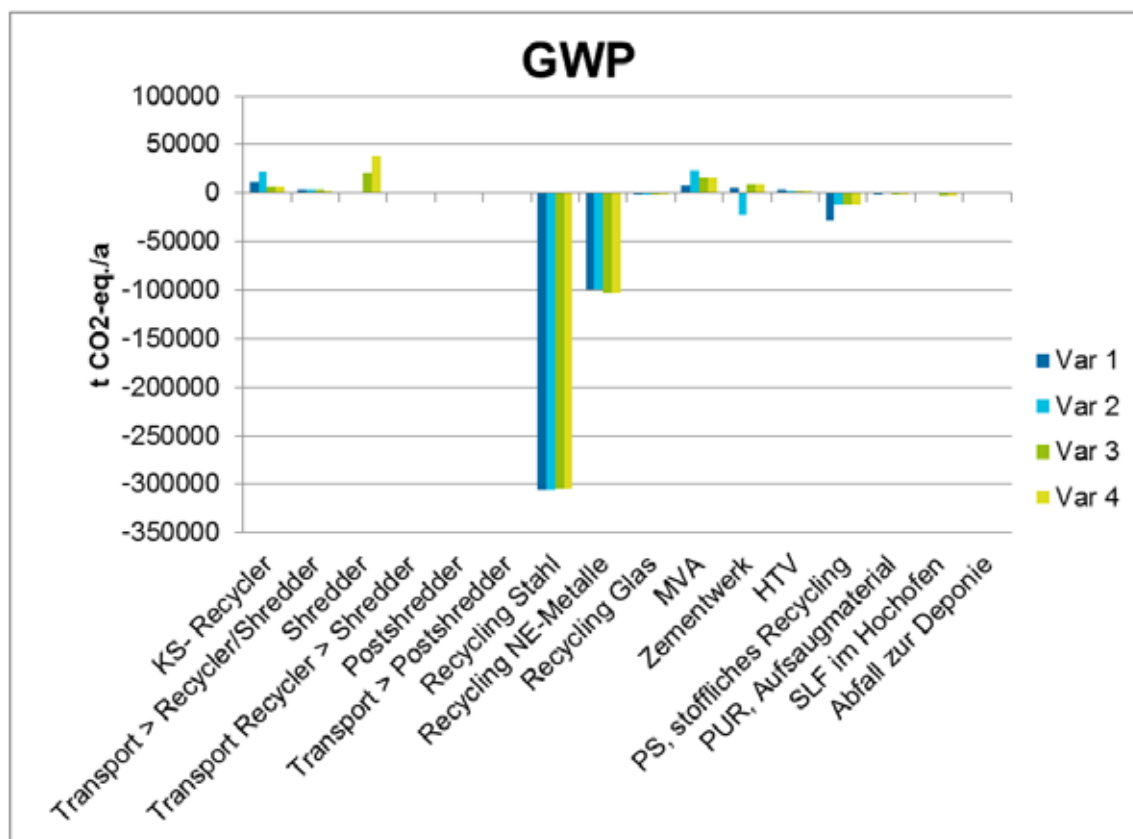


Abbildung 4-2: Treibhausgaspotenzial nach Prozessschritten (Standardvarianten)



Beim Treibhauspotenzial (GWP, siehe Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2) zeigen sich im Vergleich zur Vorstudie deutlich höhere Gutschriften bei etwas geringeren Lasten, die sich insgesamt zu deutlich größeren Nettogutschriften addieren. Grund hierfür sind deutlich höhere Lasten in den Datensätzen zur Primärherstellung von Stahl und Aluminium, die im Wesentlichen bedingt sind durch den Wechsel der zu Grunde gelegten Datenbank. Die Last durch die MVA ist etwas höher, da im neuen MVA-Modell für Strom ein fossiler Mix und für Wärme ein Mix aus Erdgas und Erdöl gutgeschrieben wird, während im alten Modell jeweils Kohle gutgeschrieben wurde. Die Variante 4 (Autoshredder) weist vor allem aufgrund der FCKW-Freisetzungen von fehlsortierten FCKW-Geräten die geringsten ökologischen Vorteile bzgl. GWP auf. Die aus ökologischer Sicht vorteilhafteste Variante ist der Mischbetrieb (Variante 1).

4.1.2. Versauerungspotenzial (AP)

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse für das Versauerungspotenzial in Summe bzw. aufgeschlüsselt nach den einzelnen Prozessschritten.

Abbildung 4-3: Versauerungspotenzial (Standardvarianten)

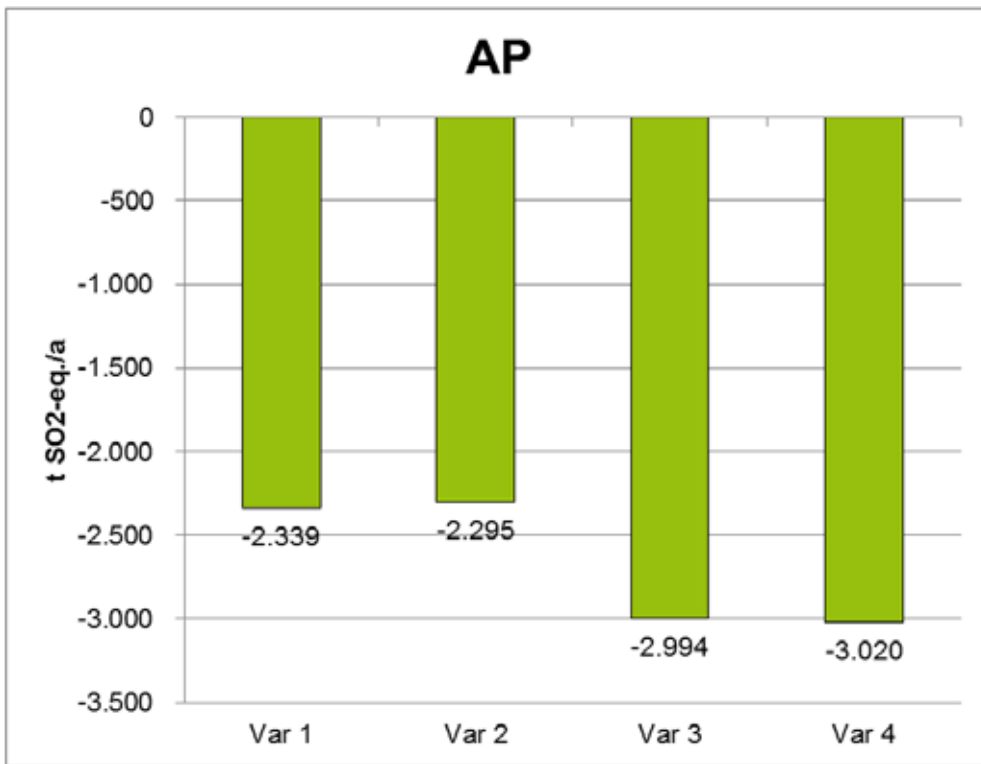
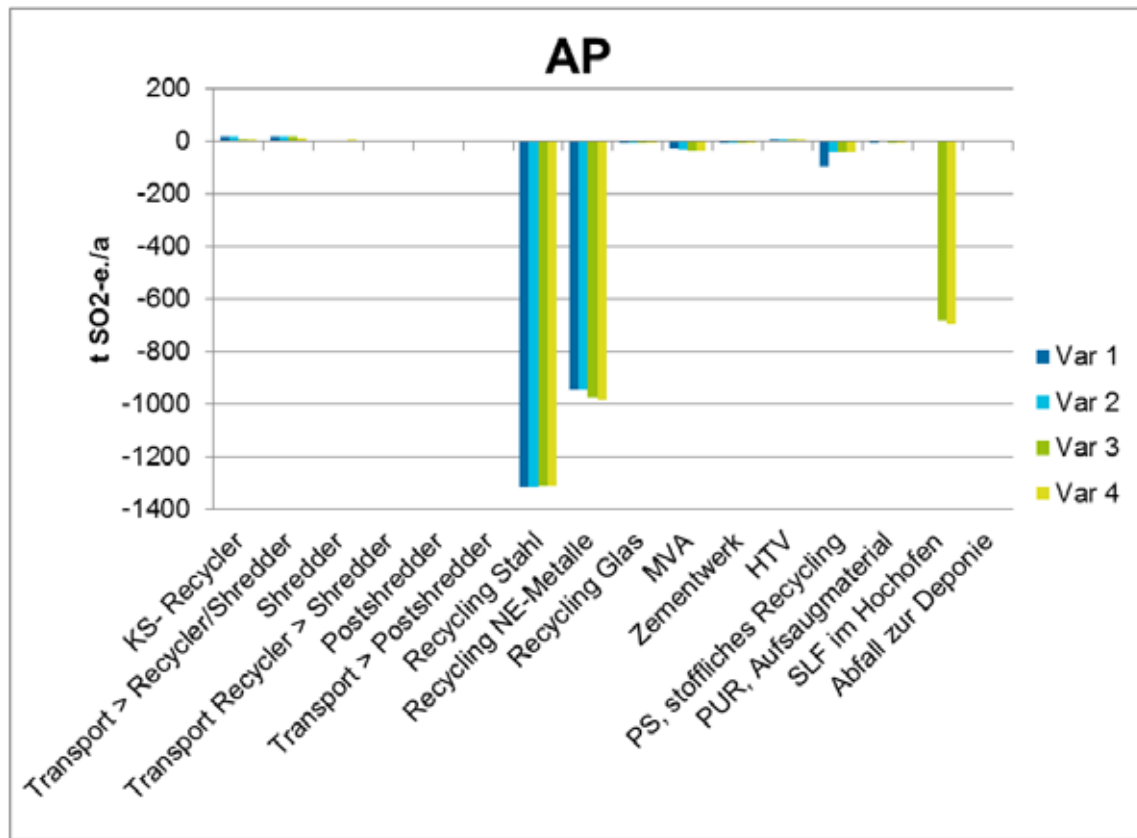


Abbildung 4-4: Versauerungspotenzial nach Prozessschritten (Standardvarianten)



Auch beim Versauerungspotenzial (AP, siehe Abbildung 4-3 und Abbildung 4-4) zeigen sich wie beim GWP deutlich höhere Gutschriften bei etwas geringeren Lasten, und damit insgesamt deutlich größere Nettogutschriften, bedingt durch die höheren Lasten in der Primärherstellung von Stahl, Kupfer und Aluminium.

Durch die angenommene Verwertung von der im Post-Shredder erzeugten Kunststofffraktion im Hochofen und die damit verbundene Substitution vom Schweröleinsatz im Hochofen ergeben sich bei den Varianten 3 und 4 deutliche Gutschriften, die letztendlich dazu führen, dass die beiden Shredder-Varianten (3 und 4) aus ökologischer Sicht bzgl. AP günstiger abschneiden als die Varianten 1 und 2. Wenn dieser Verwertungspfad nicht erfolgt und die Kunststoffe in einer MVA oder in einem Zementwerk verwertet werden, liegen alle Varianten hingegen dicht beieinander.

4.1.3. Eutrophierungspotenzial (EP)

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse für das Eutrophierungspotenzial in Summe bzw. aufgeschlüsselt nach den einzelnen Prozessschritten.

Abbildung 4-5: Eutrophierungspotenzial (Standardvarianten)

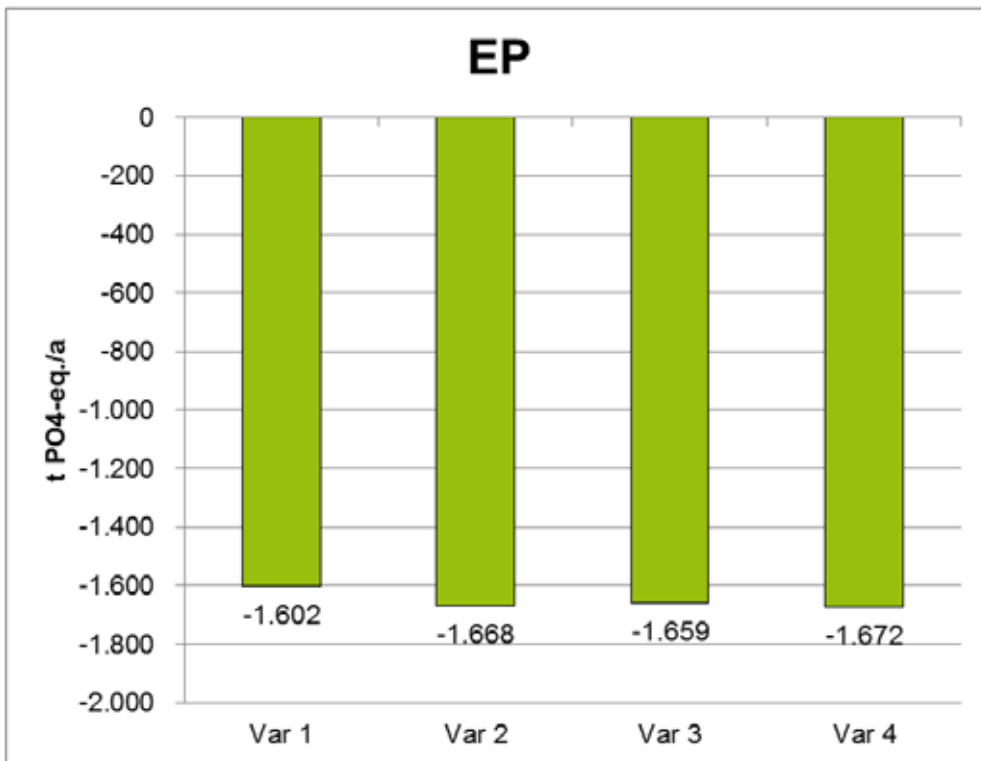
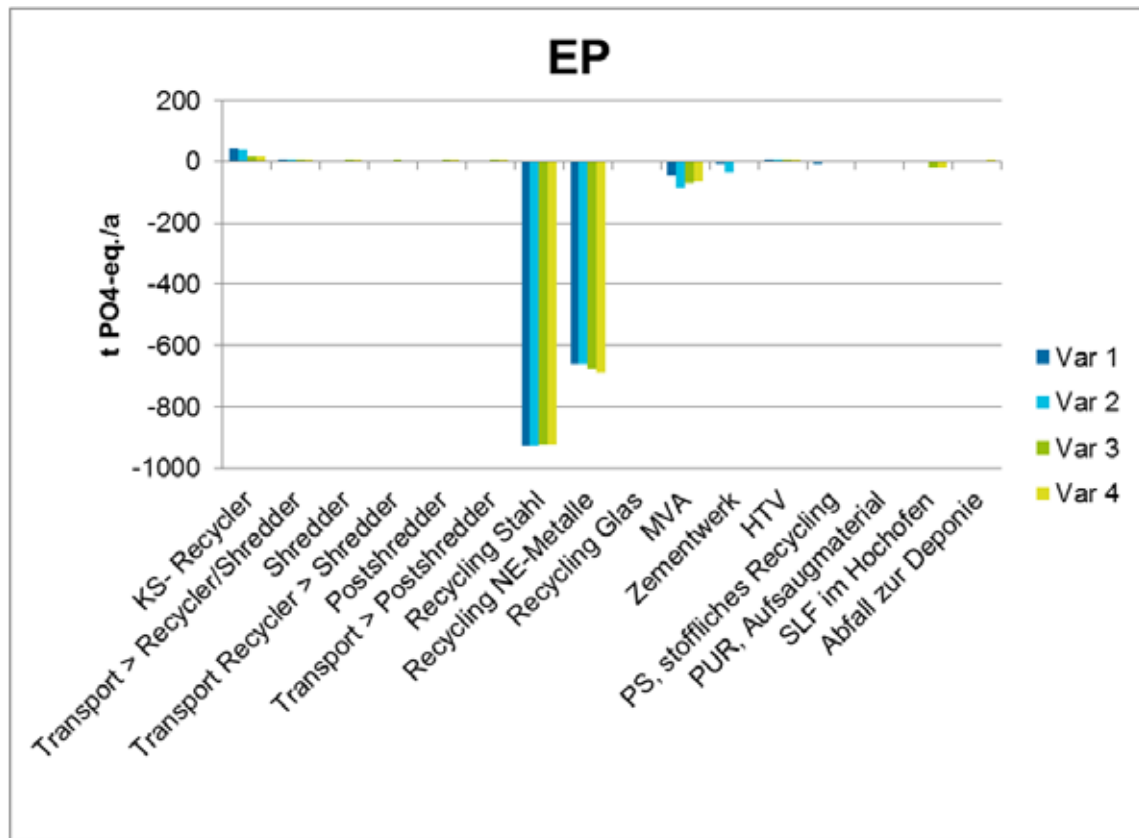


Abbildung 4-6: Eutrophierungspotenzial nach Prozessschritten (Standardvarianten)



Die Unterschiede zwischen den Varianten beim Eutrophierungspotenzial (EP, siehe Abbildung 4-5 und Abbildung 4-6) sind so gering, dass im Rahmen der Genauigkeit einer Ökobilanz die Ergebnisse als etwa gleich eingestuft werden können. Wie bei den anderen Wirkungskategorien sind auch hier die Gutschriften aus dem Metallrecycling deutlich höher als bei der Vorstudie.

4.1.4. Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial (POCP)

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse für das photochemische Oxidantienpotenzial in Summe bzw. aufgeschlüsselt nach den einzelnen Prozessschritten.

Abbildung 4-7: Photoxidantenpotential (Standardvarianten)

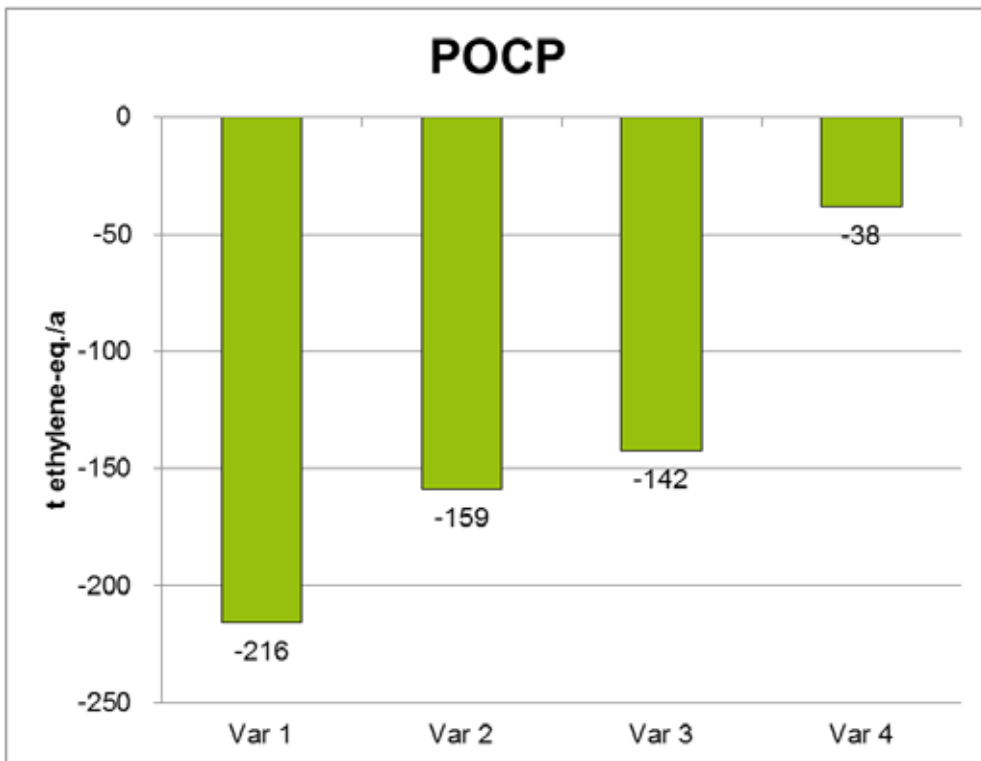
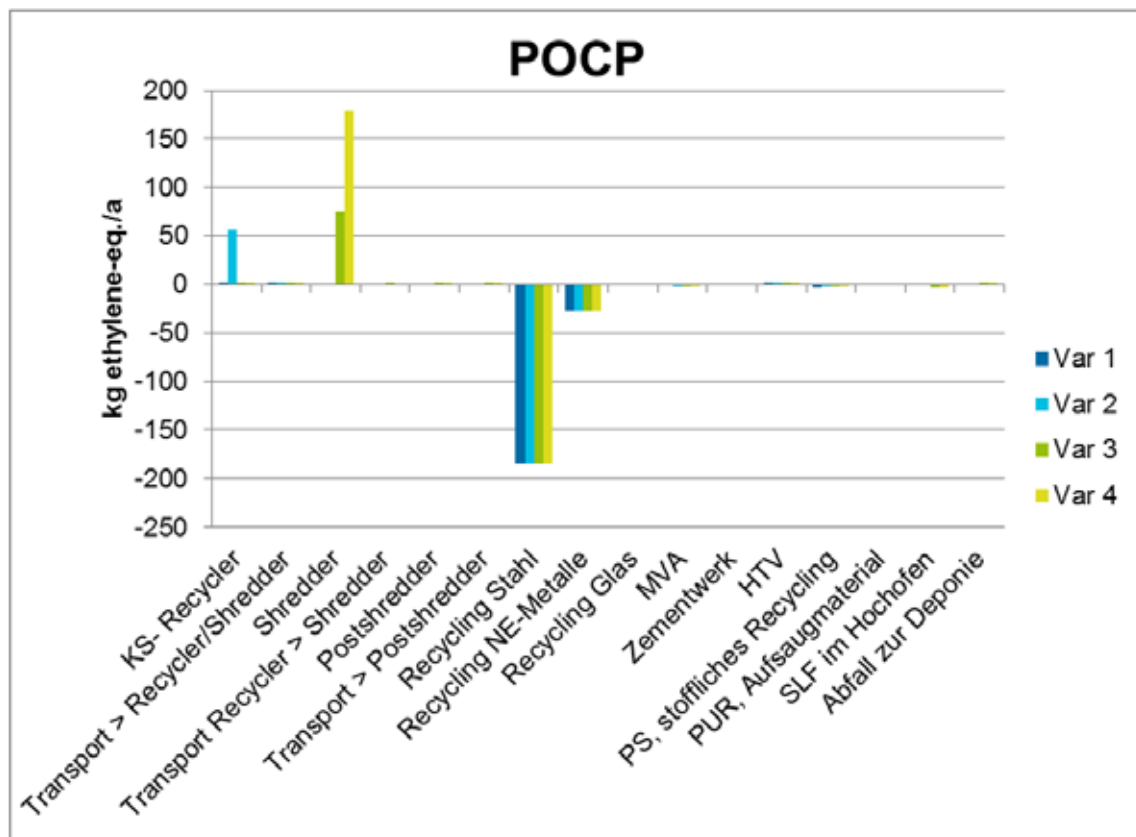


Abbildung 4-8: Photoxidantenpotential nach Prozessschritten (Standardvarianten)



Beim Bildungspotenzial photochemischer Oxidantien (POCP, siehe Abbildung 4-7 und Abbildung 4-8) resultieren aus dem Recyclingprozess deutliche höhere Gutschriften aus dem Metallrecycling als bei der Vorstudie. Der Hauptgrund hierfür liegt in dem Wechsel der Ökobilanz-Datenbank, die deutlich mehr POCP-relevante Emissionen in den Prozessketten erfasst.

Die Lasten stammen – wie in der Studie von 2008 auch - vor allem aus den Emissionen von Isobutan und Cyclopentan. Während es in der Vorstudie in allen Varianten eine Nettolast gab, werden durch die Neuberechnung der Metallvorketten nun in allen Varianten Nettogutschriften erzielt. Variante 1 ist bzgl. des POCP der ökologisch vorteilhafteste Entsorgungsweg, Variante 4 der ungünstigste.

4.1.5. Ozonzerstörungspotenzial (ODP)

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse für das Ozonzerstörungspotenzial in Summe bzw. aufgeschlüsselt nach den einzelnen Prozessschritten.

Abbildung 4-9: Ozonzerstörungspotential (Standardvarianten)

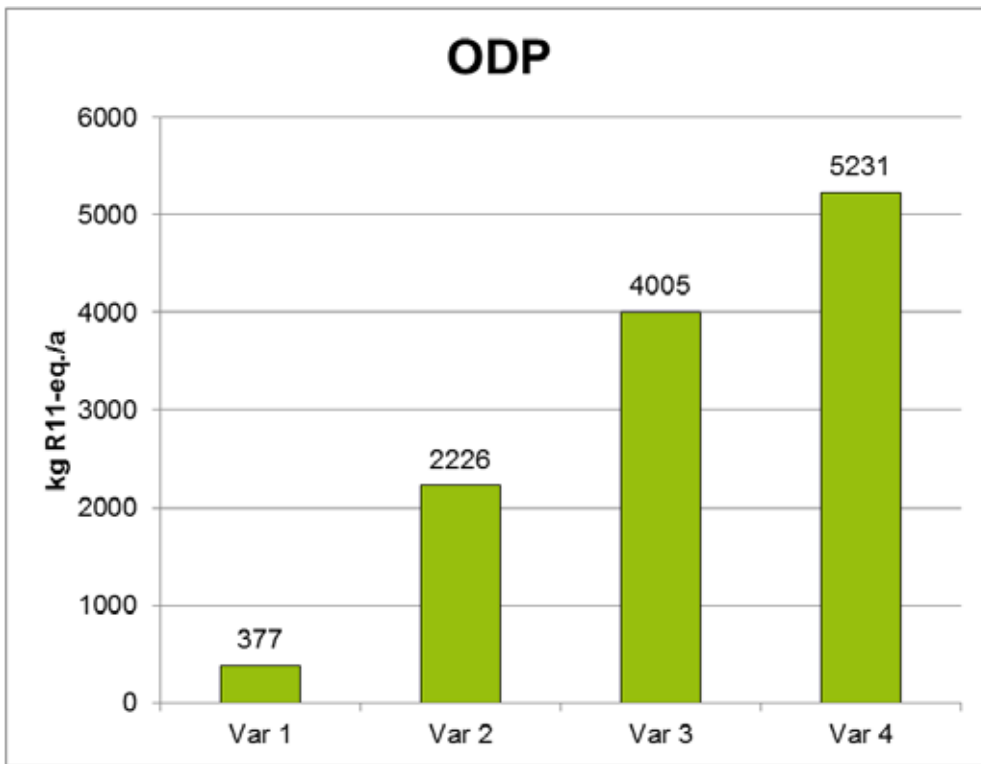
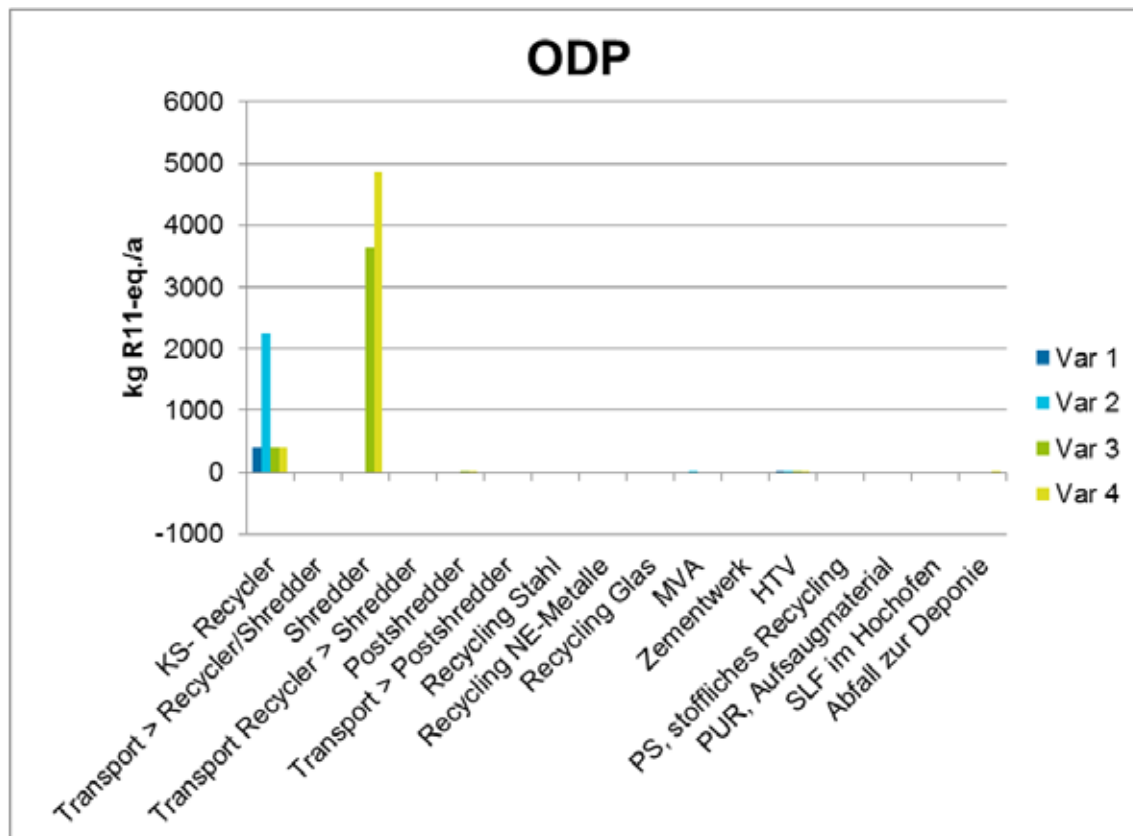


Abbildung 4-10: Ozonzerstörungspotential nach Prozessschritten (Standardvarianten)



Das Ozonzerstörungspotential (ODP, siehe Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10) wird ausschließlich durch die R11- und R12-Emissionen bestimmt. Dadurch, dass der Anteil der FCKW-Geräte deutlich niedriger ist als bei der Vorstudie, liegt das ODP in allen Varianten deutlich niedriger als 2008.

Wie schon in der Vorstudie weist der Mischbetrieb mit rund 380 kg R11-eq./a das geringste Ozonzerstörungspotential auf. Das ODP von Parallelbetrieb und Variante 3 (KW-Geräte im Spezialshredder) ist mit rund 2.200 bzw. 4.000 kg R11-eq./a deutlich höher. Noch höher liegt die Variante 4 (KW-Geräte im Autosshredder) mit rund 5.200 kg R11-eq./a. Die Unterschiede rühren fast ausschließlich von den Emissionen fehlsortierter FCKW-Geräte her.

4.1.6. Kumulierter Energieaufwand (CED total)

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse für den Kumulierten Energieaufwand (CED) in Summe bzw. aufgeschlüsselt nach den einzelnen Prozessschritten.

Abbildung 4-11: Kumulierter Energieaufwand (Standardvarianten)

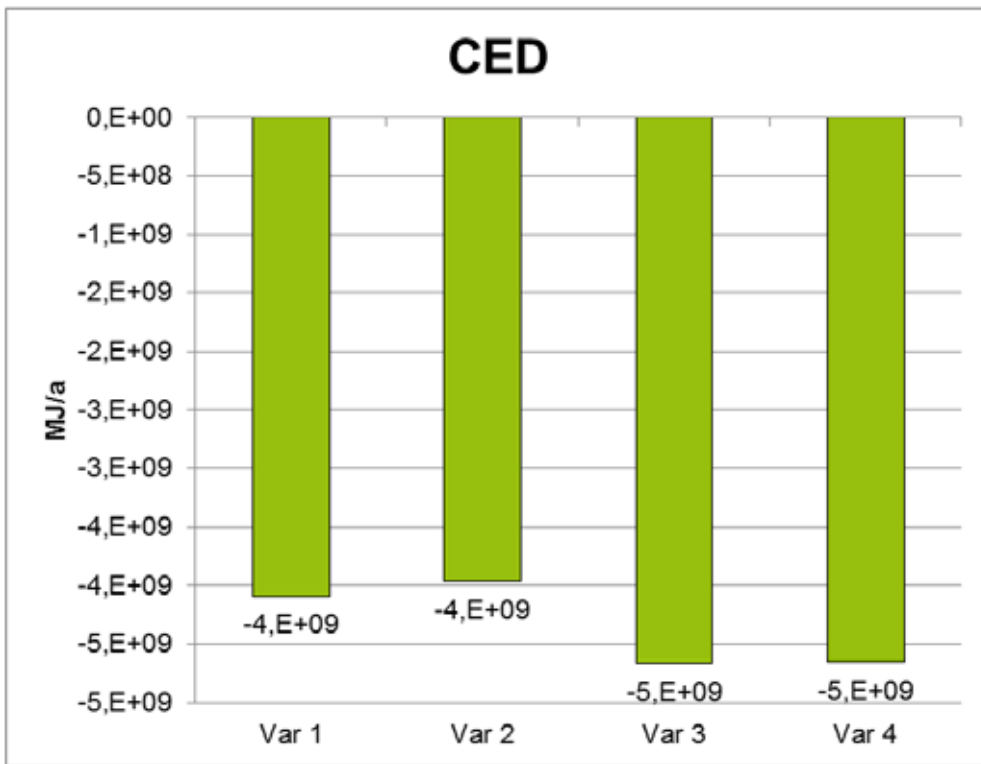
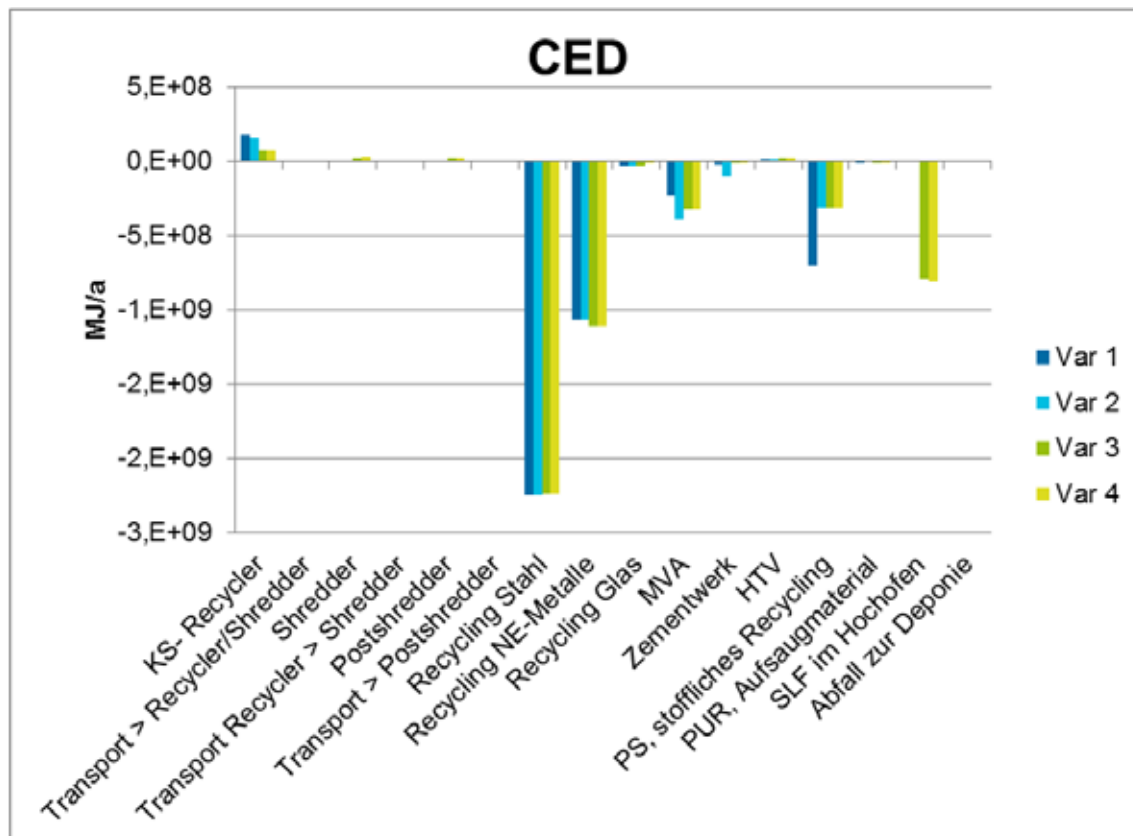


Abbildung 4-12: Kumulierter Energieaufwand, nach Prozessschritten (Standardvarianten)



Die Unterschiede zwischen den Varianten beim Kumulierten Energieaufwand Energieaufwand (CED, siehe Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12) sind so gering, dass im Rahmen der Genauigkeit einer Ökobilanz die Ergebnisse als etwa gleich eingestuft werden können. Wie bei den anderen Wirkungskategorien sind auch hier die Gutschriften aus dem Metallrecycling deutlich höher als bei der Vorstudie.

4.2. Sensitivitätsrechnungen

Im Rahmen des Updates der Ökobilanz wurden drei Sensitivitätsrechnungen durchgeführt:

1. Variante 4 mit höherer Fehlsortierungsquote von 5 %.
2. Variante 2 mit einem stofflichen Recycling des Polystyrols.
3. Alle Varianten mit einem KW-Geräte-Anteil von 90 %.

4.2.1. Variante 4 mit 5 % Fehlsortierung

Da die Variante 4 die einzige Variante ist, bei der eine Sortierung der Geräte nicht beim Kühlgeräterecycler stattfindet sondern auf dem örtlichen Bauhof, ist es wahrscheinlich, dass hier aufgrund fehlenden Fachpersonals deutlich mehr Geräte fehlsortiert werden. Die Sensitivitätsanalyse mit einer Fehlsortierung von 5 % statt 1 % bildet dieses ab.

Tabelle 4-2: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (Sensitivität: Variante 4 mit 5 % Fehlsortierquote)

Wirkungskategorie	Einheit	Variante 4 (1 %)	Variante 4 (5 %)
Treibhauspotenzial (GWP)	t CO2-eq./a	-350.119	-204.929
Versauerungspotenzial (AP)	t SO2-eq./a	-3.020	-3.043
Eutrophierungspotenzial (EP)	t PO4-eq./a	-1.672	-1.674
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP)	t ethylene-eq./a	-38	-38
Ozonzerstörungspotenzial (ODP)	kg R11-eq./a	5.231	24.676
Kumulierter Energieaufwand (CED)	MJ/a	-4,7 E+09	-4,7E+09

Tabelle 4-2 zeigt für Variante 4 zum einen die Ergebnisse der Standardrechnung, zum zweiten die Ergebnisse der Sensitivitätsrechnung mit einer Fehlsortierung von 5 %. Wie zu erwarten war, ist das ODP deutlich höher und auch beim GWP ist die Nettogutschrift deutlich geringer. Bei den anderen Wirkungskategorien sind dagegen kaum Auswirkungen zu beobachten.

4.2.2. Variante 2 mit stofflicher Verwertung des PS

Mit dieser Sensitivitätsanalyse wird untersucht, welchen Einfluss eine stoffliche Verwertung des Polystyrols aus KW-Geräten im Parallelbetrieb hat. In der Standardvariante wurde angenommen, dass das Polystyrol nicht so gereinigt wird, dass es stofflich verwertet werden kann. Stattdessen wird es im Zementwerk energetisch verwertet. Als Sensitivität wurde betrachtet, wie sich die Wirkungsabschätzung verändert, wenn auch das Polystyrol aus KW-Geräten analog zur FKCW-Schiene stofflich verwertet wird.

Tabelle 4-3: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (Sensitivität: Variante 2 mit stofflicher Verwertung des PS)

Wirkungskategorie	Einheit	Variante 2 (thermische Verw.)	Variante 2 (stoffliche Verw.)
Treibhauspotenzial (GWP)	t CO2-eq./a	-390.020	-378.734
Versauerungspotenzial (AP)	t SO2-eq./a	-2.295	-2.345
Eutrophierungspotenzial (EP)	t PO4-eq./a	-1.668	-1.644
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP)	t ethylene-eq./a	-159	-161
Ozonerstörungspotenzial (ODP)	kg R11-eq./a	2226	2226
Kumulierter Energieaufwand (CED)	MJ/a	-4,0 E+09	-4,7E+09

Tabelle 4-3 zeigt im Vergleich die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung der Variante 2, zum einen mit einer thermischen Verwertung des Polystyrols, zum anderen mit einer stofflichen Verwertung. Hier zeigt sich, dass sich bei einer stofflichen Verwertung für das GWP und das AP geringere Nettogutschriften, also höhere Umweltlasten, errechnen. Dies liegt daran, dass die Gutschrift aus dem stofflichen Recycling etwas geringer ist als die Gutschrift aus der thermischen Verwertung im Zementwerk. Hingegen ist die Nettogutschrift beim CED bei der stofflichen Verwertung deutlich höher, es ergibt sich hier also eine Umweltbelastung. Zusammenfassend ergibt sich kein eindeutiges Bild. Darüber hinaus ist auch darauf hinzuweisen, dass für eine konkrete Entscheidung für den einen oder anderen Verwertungsweg die Stoffströme genauer spezifiziert werden müssten (Art der

energetische Verwertung, substituierte Energieträger, substituierte Kunststoffprodukte, Aufwendungen für die Erzeugung der Sekundärkunststoffe etc.).

4.2.3. Anteil der KW-Geräte 90 %

Diese Sensitivitätsanalyse bildet den zunehmend ansteigenden Anteil der KW-Geräte ab und deren voraussichtlichen Anteil ab ca. 2020.

Tabelle 4-4: Ergebnisse der Wirkungsabschätzung (Sensitivität: 90 % KW-Geräte)

Wirkungskategorie	Einheit	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Treibhauspotenzial (GWP)	t CO2-eq./a	-406.362	-390.845	-371.487	-369.337
Versauerungspotenzial (AP)	t SO2-eq./a	-2.346	-2.269	-3.408	-3.452
Eutrophierungspotenzial (EP)	t PO4-eq./a	-1.605	-1.669	-1.696	-1.717
Photochem. Oxidantienbildungspot. (POCP)	t ethylene-eq./a	-216	-122	-96	75
Ozonzerstörungspotenzial (ODP)	kg R11-eq./a	67	480	863	1135
Kumulierter Energieaufwand (CED)	MJ/a	-4,1 E+09	-3,7 E+09	-5,0 E+09	-5,0 E+09

Tabelle 4-4 zeigt die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung der vier Varianten. Aufgrund der geringeren Anteils an FCKW-Geräten sind die Emissionen von R11, R12, Isobutan und Cyclobutan in den Varianten 2, 3 und 4 deutlich geringer, während es bei Variante 1 hier wegen des geschlossenen Systems kaum Unterschiede gibt. Alle Varianten schneiden in allen Wirkungskategorien mit Ausnahme des POCP besser ab als in der Standardvariante, die Reihenfolge der ökologischen Unterschiede zwischen den Varianten bleibt allerdings erhalten, wenn auch mit einer geringeren Spreizung.

Die Werte beim POCP sind in den Varianten 2, 3 und 4 höher als in den Standardvarianten. Dies liegt an der höheren Emission der Kohlenwasserstoffe Isobutan und Cyclopentan aus den KW-Geräten.

5. Fazit

Als Ergebnis des Updates der Ökobilanz lässt sich folgern, dass die Variante 1, der Mischbetrieb, auch bei einem reduzierten Anteil an FCKW-Geräten aus ökologischer Sicht nach wie vor das beste Verfahren ist. Dies gilt auch für die für das Jahr 2020 modellierte Bilanz bei einem Input von 90 % KW-Geräten und 10 % FCKW-Geräten.

Beim Treibhauspotenzial (GWP) erreicht die Variante 4 nur rund 87 % der Einsparungen an CO₂-eq. der Variante 1. Gegenüber den Varianten 2 bis 4 werden in Variante 1 etwa 14.000 bis 54.000 t/a mehr eingespart. Dies entspricht den jährlichen CO₂-Emissionen von rund 5.000 bis 19.000 PKWs in Deutschland bei einem durchschnittlichen CO₂-eq-Ausstoß von 205 g/km und einer jährlichen Fahrleistung von 14.000 km (Stand der deutschen PKW-Flotte in 2010). Der Schutz des Klimas ist als besonders wichtig und dringend einzustufen, so dass alle Maßnahmen mit Beiträgen zur Einsparung von Treibhausgasen in dem ermittelten Umfang von Bedeutung sind.

Beim Ozonerstörungspotenzial (ODP) fällt der Unterschied zwischen den Varianten noch wesentlich deutlicher aus. Hier liegt der Abstand von Variante 1 zu den Varianten 2 bis 4 beim Faktor 6 bis 14 bei einer Fehlsortierquote von 1 %. Für Variante 4 wurde eine weitere Sensitivitätsrechnung mit einer noch höheren Fehlsortierquote von 5 % durchgeführt, da bei dieser Variante die Sortierung der Kühlgeräte bereits beim örtlichen Bauhof erfolgt. Wenn das Personal der zahlreichen Bauhöfe keine angemessene Schulung erhält oder das Sortieren sogar den Bürgern überlassen wird, ist eine derart hohe Fehlsortierquote als realistisch einzustufen; es ist sogar denkbar, dass die realen Fehlsortierquoten noch höher liegen. Das Ozonerstörungspotenzial wäre in diesem Fall 65-mal so hoch wie beim Mischbetrieb.

Auch bei dem Bildungspotenzial von Photooxidantien weist Variante 1 die größte Umweltentlastung auf, Variante 4 erreicht hier nur 18 % der Einsparungen. Variante 2 und 3 liegen dazwischen.

Beim Versauerungspotenzial (AP) sind die beiden Shreddervarianten ökologisch vorteilhafter aufgrund der Verwertung der Shredderleichtfraktion (SLF) im Hochofen und der damit verbundenen Schwerölsubstitution. Wenn man hier eine Entsorgung der SLF in einer Müllverbrennungsanlage ansetzt, sind die Ergebnisse der 4 Varianten beim AP etwa gleich.

Die Unterschiede zwischen den Varianten beim Eutrophierungspotenzial (EP) und beim Kumulierten Energieaufwand (CED) sind so gering, dass im Rahmen der Genauigkeit einer Ökobilanz die Ergebnisse als etwa gleich eingestuft werden können.

Der Gesamteindruck wird auch durch die drei Sensitivitätsrechnungen gestützt:

Eine durchaus realistische Fehlsortierungsquote von 5 % bei Variante 4 führt zu einer deutlichen Verschlechterung der Ergebnisse beim GWP und beim ODP, während die anderen Wirkungskategorien nahezu identische Ergebnisse aufweisen.

Wenn beim Parallelbetrieb (Variante 2) statt der energetischen Verwertung des Polystyrols eine stoffliche Verwertung angesetzt wird, liegen die Ergebnisse beim GWP etwas schlechter, beim AP und CED hingegen etwas günstiger, die Werte bei ODP, POCP und EP sind vergleichbar zur Standardrechnung. Insgesamt bleiben die Ergebnisse aber im Bereich zwischen denen von Variante 1 und Variante 4.

Bei einem im Jahr 2020 zu erwartenden Anteil von nur noch 10 % FCKW-Geräten im Altgeräteaufkommen schneiden alle Varianten in allen Wirkungskategorien mit Ausnahme des POCP besser ab als in der Standardvariante mit einem FCKW-Geräteanteil von 50 %. Die Reihenfolge der ökologischen Unterschiede zwischen den Varianten bleibt allerdings erhalten. Auch beim Treibhauspotenzial zeigt die Studie für das Jahr 2020 noch relevante Umweltvorteile für die Variante 1 auf (rund 37.024 t CO₂-eq.). Die Werte beim POCP sind in den Varianten 2, 3 und 4 mit einem 90 %-igen KW-Geräteanteil aufgrund der höheren Emission an Isobutan und Cyclopentan erwartungsgemäß höher als in den Standardvarianten mit einem KW-Geräteanteil von 50 %.

Die neue Generation von Kühlgeräten mit Vakuumisolationspaneelen ist in dieser Studie nicht berücksichtigt worden, weil ihr Anteil an den Altgeräten noch sehr klein ist. In diesem Zusammenhang ist zu hoffen, dass die Hersteller ihrer Produktverantwortung nachkommen und Füllstoffe einsetzen, die nicht lungengängig sind und dann bei der Entsorgung zur Emission von lungengängigen Feinstäuben führen.

Annex 1: Verwendete generische Datensätze

Tabelle A-1: Für die Ökobilanz verwendete generische Datensätze

Schritt	Datensatz	Herkunft
Energie	Strom, DE, 2015, Niederspannung	Öko-Institut
	Strom, DE, 2015, Mittelspannung	Öko-Institut
	Strom, DE, 2015, Hochspannung	Öko-Institut
	diesel, burned in diesel-electric generating set, 10MW [GLO]	ecoinvent v3.2
Hilfsstoffe	market for nitrogen, liquid [RER]	ecoinvent v3.2
Stahlrecycling	steel production, electric, low-alloyed [RER]	ecoinvent v3.2
	steel production, converter, low-alloyed [RER]	ecoinvent v3.2
Kupferrecycling	copper, secondary, at refinery [RER]	ecoinvent v3.2
	copper scrap, at plant [RER]	ecoinvent v3.2
	copper, primary, at refinery [RER]	ecoinvent v3.2
Glasrecycling	treatment of waste glass from unsorted public collection, sorting [RER]	ecoinvent v3.2
	heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW [Europe without Switzerland]	ecoinvent v3.2

	market for silica sand [GLO]	ecoinvent v3.2
	market for soda ash, light, crystalline, heptahydrate [GLO]	ecoinvent v3.2
	market for dolomite [GLO]	ecoinvent v3.2
	market for feldspar [GLO]	ecoinvent v3.2
Verwertung PS	market for polystyrene, general purpose [GLO]	ecoinvent v3.2
Verwertung PUR	market for limestone, unprocessed [GLO]	ecoinvent v3.2
HTV	HTV-Modell	Öko-Institut
MVA	MVA-Modell	Öko-Institut
Zementwerk	Zementwerk-Modell	Öko-Institut
Hochofen	Hochofen-Modell	Öko-Institut
	heavy fuel oil, burned in refinery furnace [Europe without Switzerland]	ecoinvent v3.2
	treatment of inert waste, sanitary landfill [RoW]	GaBi v6.0
Transport/Maschinen	LWK-Transport	Öko-Institut