

Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft
Technische Universität Wien



Technisch-naturwissenschaftliche Entscheidungs- grundlagen für die zielorientierte Behandlung von Alt-Kühlgeräten



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

INSTITUT FÜR WASSERGÜTE,
RESSOURCENMANAGEMENT
UND ABFALLWIRTSCHAFT
INSTITUTE FOR WATER QUALITY,
RESOURCES AND
WASTE MANAGEMENT



**Technisch-naturwissenschaftliche
Entscheidungsgrundlagen für die
zielorientierte Behandlung
von Alt-Kühlgeräten
(TEZLA)**

Endbericht

David Laner
Helmut Rechberger

Auftraggeber

Stadt Wien, Magistratsabteilung 22

Wien, November 2006

Projektleitung
Helmut Rechberger

Projektbearbeitung
David Laner

Impressum
Technische Universität Wien
Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft
Stiftungsprofessur Ressourcenmanagement des ARA-Systems
A-1040 Wien, Karlsplatz 13/226.4
Tel.: +43 1 58 801 226 41 (Skr.)
Fax.: +43 1 504 22 34
E-Mail: aws@iwa.tuwien.ac.at
URL: <http://www.iwa.tuwien.ac.at>



Kurzfassung

Die Elektroaltgeräteverordnung (EAG-VO) schreibt bei der Behandlung von Alt-Kühlgeräten eine Mindestverwertungsquote von 80 % vor, wobei die stoffliche Verwertungsquote wenigstens 75 % betragen muss. In Österreich gibt es zwei Arten von Kühlgerätebehandlungsverfahren bei welchen diese Regelung zur Anwendung kommt. Das ist einerseits ein Verfahren mit weitestgehender stofflicher Verwertung und andererseits Verfahren mit einer Kombination aus thermischer und stofflicher Verwertung. Ersteres zielt auf eine maximale stoffliche Verwertung ab, letzteres erfüllt die durch die EAG-VO festgelegten stofflichen Verwertungsquoten nicht.

Der Vergleich dieser beiden Verfahrenstypen erfolgte sowohl für FCKW-haltige Kühlgeräte als auch für kohlenwasserstoffgeschäumte Kühlgeräte (=VOC-Geräte). Die Bilanzierung der Verfahren wurde anhand folgender Ansätze bzw. Indikatoren vorgenommen:

Um den Ressourcenverbrauch abschätzen zu können wurden Energiebilanzen erstellt, welche die energetischen und materiellen Aufwendungen, z.B. Energiebedarf für die Spaltung der FCKW, und Gutschriften, z.B. die Gewinnung einer Recyclingfraktion, der Verfahren berücksichtigten. Um materielle und energetische Größen miteinander vergleichen zu können, wurde die Methode des kumulierten Energieaufwands (KEA) angewandt. Dadurch wurden auch die Vorketten des jeweils bereitgestellten bzw. verbrauchten Gutes in die Bilanzierung miteinbezogen. Zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit der Behandlungsverfahren, wurden eingesparte und erzeugte Emissionen an FCKW, CO₂, HCl und HF einander gegenüber gestellt. Die festen Abfälle der jeweiligen Verfahren wurden ebenfalls betrachtet.

Die Resultate der Verfahrensvergleiche sind für FCKW- und VOC-Geräte getrennt zu betrachten:

Bei den FCKW-haltigen Kühlgeräten zeigt sich, dass die FCKW-Emissionen des weitestgehend stofflichen Verfahrens, die v.a. durch die stoffliche Verwertung der PUR-Isolierung (Ölbindemittel) entstehen, die größte Relevanz besitzen. Hingegen werden beim kombinierten thermisch/stofflichen Verfahren die FCKW im Kühlgerät praktisch vollständig zerstört. Für das weitestgehend stoffliche Verfahren muss davon ausgegangen werden, dass es durch diffuse Emissionen zu einer ca. 100 Mal höheren FCKW Freisetzung kommt. Setzt man die einzelnen Indikatoren zu nationalen Referenzwerten in Beziehung, so zeigt sich, dass die FCKW-Emissionen aus der Kühlgeräteentsorgung der relevante Parameter sind und andere Emissionen (CO₂, HCl, HF, feste Abfälle) vergleichsweise als wenig relevant einzustufen sind.

Bei der Behandlung von VOC-Kühlgeräten spielen die Emissionen nur eine untergeordnete Rolle, die Ressourcenschonung tritt in den Vordergrund. Aufgrund der besseren Rückgewinnung der Metalle (v.a. des Aluminiums) durch das weitestgehend stoffliche Verfahren, weist dieser Behandlungstyp für diese Kühlgeräteart Vorteile auf. Abschätzungen zeigen jedoch, dass dieser Unterschied durch praxisgerechtere Annahmen und verfahrenstechnische Maßnahmen im kombinierten thermisch/stofflichen Verfahren marginalisiert werden könnte.

Aus der Studie können somit folgende Empfehlungen abgeleitet werden:

- So lange es FCKW-haltige Kühlgeräte zu entsorgen gilt, ist dem kombinierten thermisch/stofflichen Verfahren und damit der vollständigen Zerstörung der FCKW der Vorzug zu geben.
- Sobald der Umstieg auf VOC-Geräte vollzogen ist, schneidet das weitestgehend stoffliche Verfahren besser ab, jedoch ist der Vorteil vergleichsweise gering.
- Der Einsatz des PUR-Mehls als Ölbindemittel kann nicht wesentlich zur Ressourcenschonung beitragen, da damit praktisch nur andere Abfälle substituiert werden. Ökologisch wirkt sich der Einsatz infolge der FCKW-Freisetzung negativ aus.
- Die stoffliche Verwertung der Polystyrol-Fraktion bringt gegenüber der thermischen Verwertung keine Vorteile.
- Die Untersuchungen zeigen, dass ein Verfahren, welches die in der EAG-VO vorgegebenen Quoten nicht erfüllt gegenüber einem verordnungskonformen Verfahren im Hinblick auf die Ziele der Abfallwirtschaft nicht schlechter sein muss bzw. sogar besser sein kann. Solange man hier über keine besseren Regelungen verfügt (und die liegen zumindest nicht auf der Hand) sollte man pragmatisch Ausnahmen für effiziente Verfahren zulassen.



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung _____	- 1 -
2	Ziele und Fragestellungen _____	- 3 -
3	Material und Methoden _____	- 5 -
3.1	Begriffsbestimmung _____	- 5 -
3.2	Anfall und Zusammensetzung von Alt-Kühlgeräten _____	- 5 -
3.2.1	Arten und Aufkommen von Alt-Kühlgeräten _____	- 5 -
3.2.2	Stoffliche Zusammensetzung von Alt-Kühlgeräten _____	- 7 -
3.3	Betrachtete Verwertungssysteme für FCKW-haltige Alt-Kühlgeräte ____	- 9 -
3.3.1	Verfahren mit weitestgehender stofflicher Verwertung _____	- 9 -
3.3.2	Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung _____	- 14 -
3.4	Verwertungssysteme für VOC-Alt-Kühlgeräte _____	- 18 -
3.4.1	Verfahrenstyp mit weitgehender stofflicher Verwertung _____	- 19 -
3.4.2	Verfahrenstyp mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung _____	- 20 -
3.5	Vergleich der verschiedenen Verwertungssysteme für Alt-Kühlgeräte -	- 21 -
3.5.1	Auswahl der relevanten Kennwerte für den Systemvergleich _____	- 22 -
3.5.2	Bestimmung von Ersatzprodukten für die wiederverwerteten Materialien ____	- 24 -
4	Ergebnisse und Interpretation _____	- 29 -
4.1	Bilanzierung der verschiedenen Behandlungsverfahren _____	- 29 -
4.1.1	Energetische Bilanzierung der Verwertungsmodelle _____	- 29 -
4.1.2	Emissionen aus den einzelnen Behandlungsverfahren _____	- 40 -
4.2	Vergleich der betrachteten Behandlungssysteme _____	- 74 -
4.2.1	Verwertungsverfahren für FCKW-haltige Alt-Kühlgeräte _____	- 74 -
4.2.2	Verwertungsverfahren für VOC-Geräte _____	- 79 -
4.2.3	Sensitivitätsanalyse _____	- 82 -
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen _____	- 85 -
6	Literatur _____	- 89 -
7	Danksagung _____	- 95 -
8	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis _____	- 97 -
8.1	Abbildungsverzeichnis _____	- 97 -
8.2	Tabellenverzeichnis _____	- 99 -
9	Anhang _____	9-1
9.1	Zusammensetzungen von FCKW-haltigen Alt-Kühlgeräten _____	9-1
9.2	Bilanzierung _____	9-2
9.2.1	Grundlagen _____	9-2
9.2.2	Verfahrensmodelle für FCKW-Kühlgeräte _____	9-8
9.2.3	Verfahrensmodelle für VOC-Kühlgeräte _____	9-26



1 Einleitung

Die zukünftige Bewirtschaftung von zu behandelnden Alt-Kühlgeräten in Österreich wird maßgeblich durch zwei Sachverhalte geprägt:

Zum einen schreibt die im April 2005 in Kraft getretene und ab dem Jahr 2007 gültige Elektroaltgeräteverordnung (EAG-VO) für Alt-Kühlgeräte eine Verwertungsquote von 80 % vor, wobei eine stoffliche Verwertungsquote von mindestens 75 % zu erfüllen ist.

Zum anderen wird sich die stoffliche Zusammensetzung zukünftiger Alt-Kühlgeräte infolge des Verbotes von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) als Kälte- und Treibmittel ändern. In der Atmosphäre rufen die spezifischen Eigenschaften der FCKW umweltrelevante Reaktionen hervor. Einerseits tragen sie in der Stratosphäre wesentlich zum Ozonabbau und damit zur Entstehung des Ozonloches bei, andererseits sind sie auch für den anthropogen verursachten Treibhauseffekt relevant. Die umweltschädigenden Wirkungen der FCKW führten schließlich 1987 zum Montreal-Protokoll, welches den weltweiten Ausstieg aus Produktion und Verwendung der FCKW regelt. Später wurden in den Revisionen von London und Kopenhagen Verschärfungen der ursprünglichen Regelungen vorgenommen. In Österreich ist seit 1995 die Verwendung von FCKW als Kälte- oder Treibmittel in Kühlgeräten untersagt.

Derzeit existiert in Österreich nur ein Verfahren (Verfahrenstyp mit weitgehender stofflicher Verwertung), das die stoffliche Verwertungsquote der EAG-VO erfüllt. Andere Verfahrenstypen, z.B. Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung, erreichen die vorgegebene stoffliche Recyclingquote nicht und sind somit ab dem Jahr 2007 nicht mehr einsetzbar. Es ist daher angebracht zu untersuchen, ob diese Regelungen derzeit und in Zukunft, speziell für die zu erwartende Zusammensetzung der dann anfallenden Alt-Kühlgeräte, zu optimalen Behandlungsverfahren führen.

Es gibt bereits einige Arbeiten, die sich mit dem Vergleich und der Bewertung verschiedener Behandlungsverfahren für Alt-Kühlgeräte beschäftigen. So wurde beispielsweise in der Untersuchung von Fehrenbach et al. (1997) anhand von Ökobilanzen ein Vergleich verschiedener Verwertungsoptionen für FCKW-haltige Kühlgeräte hinsichtlich ihrer Umweltverträglichkeit durchgeführt. In Hornberger et al. (2005) wurde eine Analyse von Verwertungsmöglichkeiten für kohlenwasserstoffgeschäumte Kühlgeräte (VOC-Geräte) vorgenommen. Dabei wurde den Vor- bzw. Nachteilen einer Rückgewinnung der Kohlenwasserstoffe besondere Beachtung geschenkt. Mit der Behandlung von VOC-Geräten beschäftigt sich auch eine Studie der S.EN.S (2000), in

welcher die Eignung bestehender Verwertungswege für FCKW-haltige Kühlgeräte zur Behandlung von zukünftig anfallenden VOC-Geräten betrachtet wird.

Aus den bisherigen Arbeiten zu diesem Themengebiet lassen sich aber keine Kriterien ableiten, anhand derer die in Österreich eingesetzten Behandlungsverfahren für Kühlgeräte hinsichtlich der Erfüllung abfallwirtschaftlicher Zielsetzungen beurteilt werden können. Deswegen wird in der vorliegenden Studie untersucht, welche technisch-naturwissenschaftlichen Entscheidungsgrundlagen notwendig sind, um die zukünftige Behandlung von Kühlgeräten in Österreich hinsichtlich der Ziele „Umweltschutz“ und „Ressourcenschonung“ bestmöglich durchführen zu können. Dafür werden die derzeit in Österreich existierenden Kühlgerätebehandlungstypen für ausgewählte Kennwerte bilanziert und im Hinblick auf die Erreichung oben angeführter Zielsetzungen beurteilt.



2 Ziele und Fragestellungen

Das Ziel des Projektes besteht darin, technisch-naturwissenschaftliche Entscheidungsgrundlagen in Bezug auf die derzeit in Österreich zur Verfügung stehenden Verfahren zu erarbeiten, um die zukünftige Verwertung und Entsorgung von Kühlgeräten gemäß den abfallwirtschaftlichen Zielen „Umweltschutz“ und „Ressourcenschonung“ optimal zu gestalten.

Folgende Fragestellungen sind dabei von Interesse:

- Wie wird sich die stoffliche Zusammensetzung der Alt-Kühlgeräte infolge des Verbotes von FCKW zukünftig entwickeln. Durch welche Stoffe wurde und wird FCKW in Alt-Kühlgeräten ersetzt?
- Welche Parameter (z.B. Energie, Stoffe, Emissionen) sind bei der Behandlung von Alt-Kühlgeräten im Hinblick auf Umweltschutz und Ressourcenschonung relevant?
- Welche Verfahren werden derzeit in Österreich zur Verwertung und Entsorgung von Alt-Kühlgeräten eingesetzt?
- In welchem Ausmaß erfüllen diese Verfahren die abfallwirtschaftlichen Ziele „Umweltschutz“ und „Ressourcenschonung“ heute? Welche Änderungen lassen sich zukünftig aufgrund der geänderten Zusammensetzung von Kühlgeräten erwarten?
- Ist der derzeit vorgegebene Weg der Behandlung von Alt-Kühlgeräten auch in Zukunft optimal hinsichtlich der zuvor erwähnten Ziele und falls nicht, welche Änderungen bezüglich Verwertungsquoten wären vorzunehmen?



3 Material und Methoden

3.1 Begriffsbestimmung

Als Kühlgerät werden in dieser Studie alle Kühlschränke und Gefriergeräte bezeichnet. Die Betrachtungen in dieser Arbeit erfolgen für Kühlgeräte, die aus dem Haushalt stammen oder die aufgrund ihrer Beschaffenheit mit Haushaltsgeräten vergleichbar sind.

Die Begriffe Recycling (= stoffliche Verwertung), thermische Verwertung und Beseitigung sind im Rahmen dieser Arbeit wie folgt gebraucht:

Recycling bedeutet eine stoffliche Wiedernutzung der Abfallmaterialien zu ihrem ursprünglichen oder einem anderen Zweck. Thermische Verwertung bezeichnet die Nutzung der im jeweiligen Stoff enthaltenen Energie und Beseitigung steht für keine weitere Nutzung der betreffenden Abfallfraktion. Unter dem Begriff Behandlung werden sowohl Verwertung als auch Beseitigung verstanden.

3.2 Anfall und Zusammensetzung von Alt-Kühlgeräten

3.2.1 Arten und Aufkommen von Alt-Kühlgeräten

Im Jahr 2000 fielen in Österreich ca. 214.000 Stück bzw. 8.600 t Alt-Kühlgeräte zur Behandlung an (Salhofer et al., 2002). Die Zahlen hinsichtlich des jährlichen Gesamtaufkommens an Alt-Kühlgeräten unterschieden sich in den letzten Jahren teilweise beträchtlich. Das hing in erster Linie mit der Rückerstattung des Entsorgungsbeitrages für Alt-Kühlgeräte zusammen. Obige Angabe soll somit nur dazu dienen, eine ungefähre Größenordnung des Abfallstromes „Alt-Kühlgeräte“ zu vermitteln. Für den Zweck dieser Studie ist dies ausreichend, da als funktionelle Einheit für diese Arbeit ein durchschnittliches Alt-Kühlgerät gewählt wird.

Nach der Art des Kältemittels von Kühlgeräten können mehrere Typen unterschieden werden (siehe auch Tabelle 3-1):

- FCKW-haltige Kühlgeräte bezeichnen Geräte, die als Kältemittel und/oder als Aufschäummedium für die PUR¹-Schaum-Isolierung Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) nutzen. FCKW (z.B. R11, R12) sind maßgebend am stratosphärischen Ozonabbau beteiligt und weisen außerdem ein hohes Treibhauspotential auf.

¹ PUR = Polyurethan

- Kühlgeräte mit (H-)FKW (z.B. 134a) sind Geräte, die als Kältemittel und/oder Aufschäummedium teilfluorierte (H-FKW) oder fluorierte (FKW) Kohlenwasserstoffe nutzen. Sie werden in der Folge nicht mehr getrennt ausgewiesen, da sie aufgrund des hohen Treibhauspotentials der H-FKW bzw. FKW gemeinsam mit FCKW-haltigen Kühlgeräten zu behandeln sind.
- Adsorptions-Kühlgeräte arbeiten i. d. R. mit Ammoniak (NH₃) als Kältemittel und stellen weniger als 1 % der zur Behandlung anfallenden Alt-Kühlgeräte dar (RAL, 2005). Die Verwertung dieser Geräte erfolgt getrennt von der Behandlung anderer Kühlgerätearten und wird in dieser Arbeit nicht betrachtet.
- VOC-Geräte verwenden als Kälte- und Treibmittel flüchtige organische Verbindungen. VOC (volatile organic compounds = flüchtige organische Verbindungen) werden in fast allen Neugeräten eingesetzt. Sie weisen kein Ozonabbaupotential und ein vergleichsweise geringes Treibhauspotential auf.

Tabelle 3-1: Entwicklung der Kältemittel- sowie der Isolier- und Treibgasmengen pro Durchschnittskühlgerät (ZVEI, 1998)

Kühlgeräte	Vor 1988	1988 – 1993	Ab 1994	Ab 1997
Kältemittel	R 12	R 12	R 134a	R 600a (Isobutan)
Durchschnittl. Menge	140 g	105 g	95 g	36 g
Isolier- und Treibgas	R 11	R 11	R 134a	(Cyclo-)Pentan
Durchschnittl. Menge	500 g	345 g	230 g	270 g

Das Montrealer Protokoll von 1987 regelt den weltweiten Ausstieg aus der Produktion und Verwendung der Ozon schädigenden FCKW. Die Verwendung von FCKW für Kühlgeräte ist in Österreich seit 1995 verboten. Danach kamen zum Teil H-FKW als Kühl- und Treibmittel zum Einsatz, da diese aber ebenfalls treibhauswirksam waren, werden seit 1997 fast nur noch VOC-Neugeräte auf den Markt gebracht. Die durchschnittliche Lebensdauer eines Kühlgerätes liegt zwischen 10 und 20 Jahren, daher wird in den nächsten Jahren der Anteil von VOC-Alt-Kühlgeräten an den gesamten zur Behandlung anfallenden Kühlgeräten kontinuierlich steigen.

Aus Abbildung 3-1 erkennt man, dass im Jahr 2007 der Anteil FCKW-haltiger Alt-Kühlgeräte in etwa dem Anteil von VOC-Geräten entsprechen wird. Im Jahr 2020 werden schließlich fast nur mehr VOC-Kühlgeräte zur Behandlung anfallen.

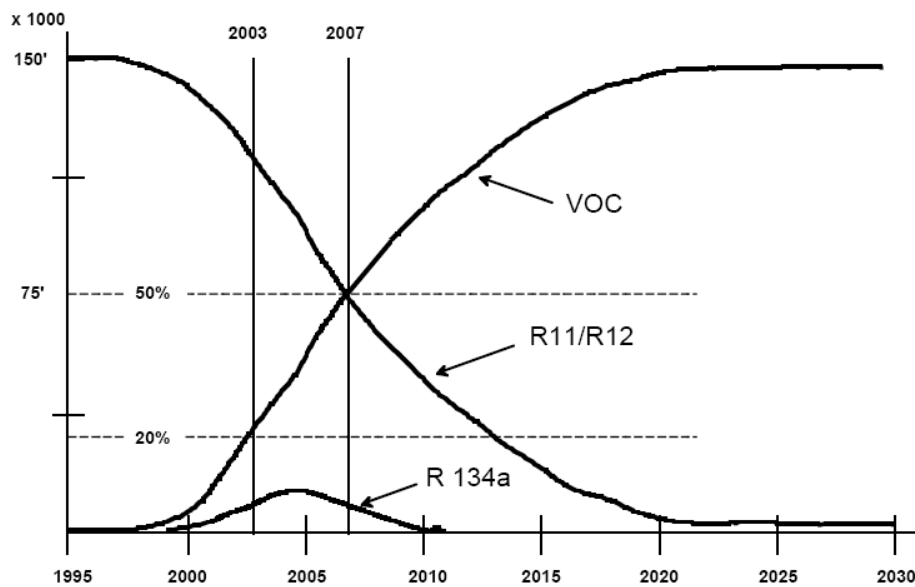


Abbildung 3-1: Entwicklung der Anteile zu entsorgender Arten von Alt-Kühlgeräten (S.EN.S, 2000)

3.2.2 Stoffliche Zusammensetzung von Alt-Kühlgeräten

3.2.2.1 FCKW-haltige Alt-Kühlgeräte

Die statistischen Kenngrößen für die durchschnittlichen Materialfraktionen eines FCKW-haltigen Alt-Kühlgerätes sind in Tabelle 3-2 dargestellt. Die Auswahl der verwendeten Literaturangaben erfolgte hinsichtlich einer möglichst großen Datenbasis und einem zu Österreich vergleichbaren Alt-Kühlgeräteartenaufkommen.

Tabelle 3-2: Statistische Auswertung der Quellen über die Zusammensetzung eines FCKW-haltigen Alt-Kühlgerätes (Verwendete Quellen in Tabelle 9-1)

Angaben in Gewichts%	Mittelwert	Median	s	Maximum	Minimum
Eisen	44,21	43,40	6,66	53,03	33,04
NE-Metalle	6,36	6,23	2,31	12,00	4,00
Kunststoff	19,44	15,13	8,44	34,00	11,00
Glas	2,04	2,19	0,99	3,47	0,50
Öl	0,88	0,65	0,59	2,00	0,46
PUR-Schaum	9,46	10,00	1,54	11,10	6,45
FCKW (Summe)	0,96	0,90	0,21	1,30	0,80
Reststoffe	3,48	2,50	2,69	7,56	0,96
Elektrotechnik	0,85	0,60	0,59	1,90	0,29
Kompressor	19,31	19,26	4,37	25,00	11,56
Gewicht [kg]	41,78	41,05	2,21	45,00	40,00

Die Ermittlung der durchschnittlichen Zusammensetzung machte in manchen Fällen eine Umklassifizierung der angegebenen Materialgruppen notwendig, da nur so eine detaillierte Aufgliederung in einheitliche Materialfraktionen möglich war. In Tabelle 3-3 sind die ermittelten und auf 100 % bezogenen Materialfraktionen für ein FCKW-haltiges Durchschnittskühlgerät angegeben.

Tabelle 3-3: Darstellung der ermittelten durchschnittlichen Zusammensetzung eines FCKW-haltigen Kühlgerätes (Medianwerte aus Tabelle 3-2 wurden herangezogen)

Fraktionen	[Gewichts%]		
Eisen	43,04		NE-Metalle* 100%
NE-Metalle	6,18		Cu 11%
Kunststoff	15,00		Al 89%
Glas	2,17		
Öl	0,64		Kompressor* 100%
PUR-Schaum	9,92		Fe 90%
FCKW (Summe)	0,89		Rest (v.a. Cu) 10%
Reststoffe	2,48		
Elektrotechnik	0,60		FCKW* 100%
Kompressor	19,10		Kühlmittel 30%
Gesamt	100 %		Treibmittel 70%
Durchschn.	41,0		*Aufteilung wurde aus Literatur-
Gewicht [kg]	(gerundet)		angaben ermittelt (siehe Tabelle 9-1)

3.2.2.2 VOC-Kühlgeräte

Die durchschnittliche Zusammensetzung eines VOC-Gerätes wurde anhand von Herstellerdaten für Neugeräte ermittelt.

Tabelle 3-4: Durchschnittliche Zusammensetzung eines Neu-VOC-Kühlgerätes (Quelle: Miele, 2003 zitiert in Hug, 2006 und in Sander et al., 2004)

Fraktionen	[Gewichts%]		
Eisen	57,40		NE-Metalle* 100%
NE-Metalle	3,73		Cu 11%
Kunststoff	26,43		Al 89%
Glas	1,61		
PUR-Schaum	8,81		*Die Aufteilung der NE-Metalle
Reststoffe	1,51		wurde aus den Daten für FCKW-
Elektrotechnik	0,50		haltige Kühlgeräte übernommen



Die in Tabelle 3-4 dargestellten Materialfraktionen werden in weiterer Folge als Modellzusammensetzung für ein VOC-Kühlgerät verwendet. Es fällt auf, dass diese Geräte verglichen mit FCKW-Kühlgeräten einen höheren Kunststoffanteil und einen kleineren Nicht-Eisen-Metallanteil aufweisen. Als durchschnittliches Gewicht wird für ein VOC-Kühlgerät, aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit, ebenfalls 41,0 kg angesetzt.

3.3 Betrachtete Verwertungssysteme für FCKW-haltige Alt-Kühlgeräte

Die Auswahl der Modellverfahren erfolgte im Hinblick auf die derzeit in Österreich betriebenen Behandlungssysteme für Alt-Kühlgeräte. Dabei können zwei Grundtypen unterschieden werden: Einerseits ein Verfahren, das darauf abzielt eine sehr hohe stoffliche Verwertungsquote zu erreichen und andererseits ein Verfahren, das eine teilweise stoffliche und thermische Verwertung der anfallenden Materialfraktionen durchführt. Die Sammlung und der Transport der Alt-Kühlgeräte zur Behandlungsanlage werden nicht betrachtet, da sie nicht spezifisch für einen Verfahrenstyp sind. Eine Beschädigung der Kühlgeräte (speziell der Kühlkreisläufe) vor der Anlieferung ist aber jedenfalls durch schonenden Umgang zu vermeiden, da es sonst zu bedeutenden FCKW-Freisetzungen in die Atmosphäre kommen kann (Jorde, 1997).

Beiden Grundtypen gemeinsam ist die möglichst vollständige Erfassung und Vernichtung der anfallenden FCKW. Die Absaugung des Kältemittels aus dem Kühlkreislauf erfolgt für beide Systeme verfahrenstechnisch praktisch identisch. Unterschiede bezüglich der Erfassung der FCKW ergeben sich bei der Behandlung des im Isolierschaum gebundenen Treibmittels.

Die naturwissenschaftlich-technische Beschreibung der jeweiligen Behandlungsverfahren erfolgt in zwei Schritten:

Zuerst wird anhand der verfügbaren Daten über den in Österreich eingesetzten Typ ein Grundmodell erstellt. Danach werden basierend auf diesem Modell verschiedene Verfahrensvarianten abgeleitet, wobei die Variationen des Grundmodells zur Berücksichtigung von Unsicherheiten und anderen Modellausführungen, zur Kompensation von Datenlücken sowie zur Sensitivitätsanalyse dienen.

3.3.1 Verfahren mit weitestgehender stofflicher Verwertung

Bei diesem Verfahrenstyp erfolgen zuerst eine manuelle und dann eine maschinelle Zerlegung des Alt-Kühlgerätes, wobei die entstehenden Mischfraktionen getrennt und weitgehend stofflich wiederverwertet werden. Die maschinelle Auftrennung des Materialverbundes erfolgt mit gleichzeitiger Entgasung des PUR-Schaums, was eine Kapselung und Prozessluftbehandlung notwendig macht.

Die AVE Entsorgung GmbH betreibt in Timelkam (Oberösterreich) die einzige österreichische Alt-Kühlgeräte-Aufbereitungsanlage dieses Typs. Das angewendete System wurde von der Fa. SEG Umwelt-Service GmbH entwickelt (AVE, 2003). Über dieses Verfahren sind nur qualitative Informationen und Daten öffentlich zugänglich (SEG, 2006), deswegen wurde zur Datenbeschaffung eine Anfrage an die AVE gerichtet. Die Anlagenbetreiber waren jedoch nicht bereit Informationen über ihre Anlage weiter zu geben und standen auch sonst für keinerlei Auskünfte zur Verfügung.

Die zur Beschreibung und Darstellung dieses Verfahrenstyps verwendeten Daten und Informationen stammen aus Beschreibungen verschiedener Verwertungssysteme einzelner Anlagebetreiber aus Deutschland (ZAUG Recycling GmbH, 2006, RECOOL Kühlgeräterecycling GmbH, 2006), von der RAL Gütegemeinschaft (RAL 2003, RAL 2005) und aus der Literatur (Fehrenbach et al., 1997; Eberle, 2000; Land Steiermark, 2003).

3.3.1.1 Grundmodell

Abbildung 3-2 zeigt ein Systembild des Grundmodells. Das dargestellte Verfahren entspricht dem derzeit in Österreich eingesetzten Verfahren dieses Typs zum Recycling von FCKW-haltigen Alt-Kühlgeräten.

Verfahrensbeschreibung:

Zuerst wird mittels eines Absaugautomaten das FCKW-Öl-Gemisch aus dem Alt-Kühlgerät entfernt. Dabei wird der Kältemittelkreislauf am tiefsten Punkt angestochen und das abgesaugte Gemisch in Druckgasflaschen gesammelt. Die befüllten Flaschen werden schließlich zur Auftrennung des FCKW-Öl-Gemisches abtransportiert. Die Separierung des Kältemittelgemisches erfolgt anhand einer Destillationsanlage und verschiedenen Filtersystemen. Das abgetrennte Öl kann, aufgrund der hohen Reinheit, stofflich verwertet werden, das gewonnene FCKW wird gesammelt und zu einer Hochtemperatur-Spaltanlage weiter transportiert. Der bei diesem Prozess anfallende Destillationsrückstand wird verbrannt.

Nachdem die Absaugung des Kältemittelgemisches erfolgt ist, wird der entleerte Kompressor ausgebaut. Zusätzlich werden auch Glasplatten, Kabel, eventuell vorhandene Quecksilberschalter und Kondensatoren entfernt.

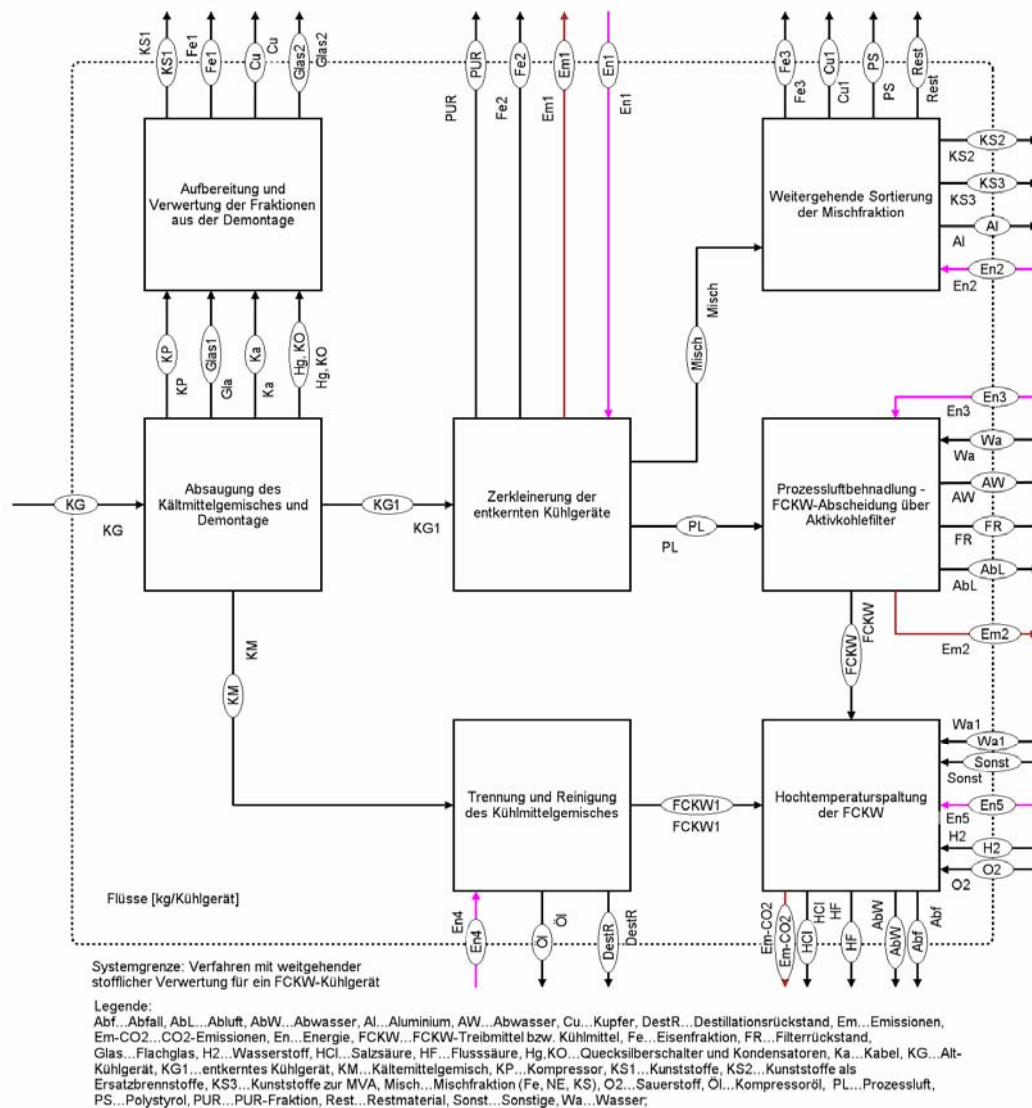


Abbildung 3-2: Systembild des Grundmodells der Verfahren mit weitestgehender stofflicher Verwertung

Im nächsten Schritt werden die vorbehandelten (entkernten) Alt-Kühlgeräte komplett zerlegt. Die Zerkleinerung erfolgt in einem Shredder mit geschlossener Prozesslufterhaltung. Nach der Zerstörung des Materialverbundes, beginnt die Auftrennung in einzelne Stofffraktionen. Die PUR-Fraktion wird dabei teilweise entgast und belädt somit die Prozessluft mit FCKW. Eine möglichst vollständige Entgasung wird durch das Zermahlen der PUR-Flocken bei gleichzeitiger Erwärmung der Prozessluft erreicht. Die in der Prozessluft enthaltenen FCKW werden über Aktivkohle-Filterssysteme erfasst, dann mithilfe erwärmter Luft desorbiert, später wieder kondensiert und in Behälter abgefüllt. Die vollen FCKW-Behälter werden ebenfalls zur Hochtemperatur-Spaltanlage gebracht und dort thermisch in Flusssäure, Salzsäure und feste Rückstände aufgetrennt. Das entgaste PUR-Mehl wird in Säcke abgefüllt und als Öl- und Chemikalienbindemittel wiederverwertet.

Weiters wird das zerleinerte Restmaterial in unterschiedliche Fraktionen aufgeteilt. Nach einer Eisenabtrennung durch einen Magnetabscheider, wird die Restfraktion in Säcke abgefüllt und in einer externen Anlage weiter behandelt. Das dort angewandte Sortierverfahren ermöglicht eine sehr effiziente Auftrennung in verschiedene Fraktionen. Die angelieferte Mischfraktion wird über Siebe, Wirbelstrom-Metallabscheider, Magnetabscheider, Windsichtungen, Schwimm-Sink-Verfahren u. a. in die Fraktionen Eisen, Nicht-Eisen-Metalle, Polystyrol, PUR und sonstige Kunststoffe getrennt. Die hier anfallende PUR-Fraktion wird ebenfalls als Öl- und Chemikalienbindemittel verwertet. Außer für die Fraktion „sonstige Kunststoffe“, welche thermisch verwertet wird, erfolgt für alle Fraktionen eine stoffliche Verwertung.

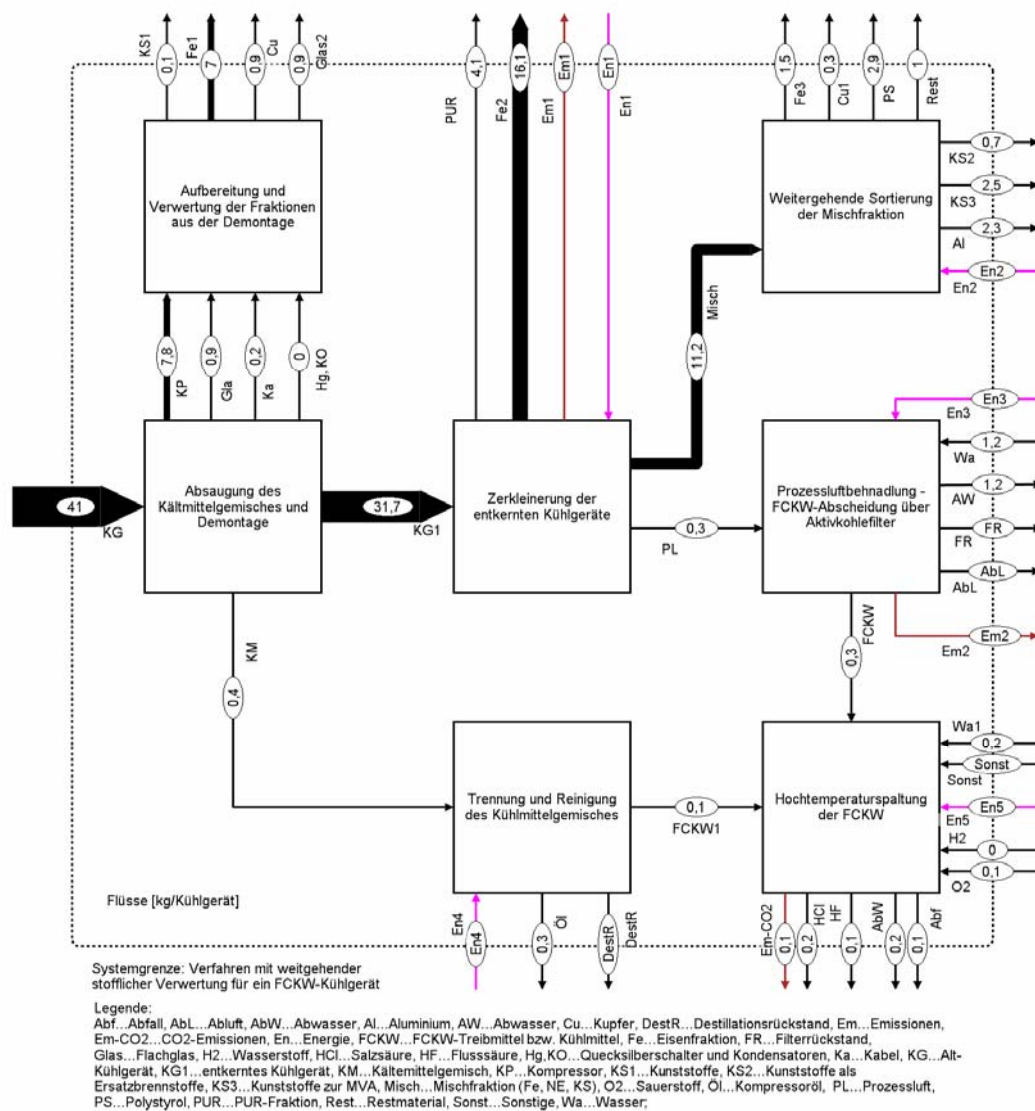


Abbildung 3-3: Darstellung der Material- und Energieflüsse für das Grundmodell des Systems mit weitestgehender stofflicher Verwertung



Abbildung 3-3 zeigt die Materialströme für das Grundmodell bei optimalen Annahmen bezüglich der erzielbaren Sortiereffizienzen und Verwertbarkeit der anfallenden Materialfraktionen. Die Darstellung erfolgt für den Verfahrensinput von einem Kühlgerät mit 41 kg. Die Aufteilung der Materialfraktionen in den einzelnen Prozessschritten und die Ermittlung der Output-Fraktionen erfolgte auf der Basis von Monitoringdaten aus einer Studie im Auftrag der RAL Gütegemeinschaft auf dem Gelände der AVE Timelkam (RAL, 2005).

3.3.1.2 Varianten des Grundmodells

Das zuvor beschriebene Basisverfahren stellt die Grundlage für die folgenden Varianten dar. Für die betrachteten Modellvarianten werden nur noch die jeweiligen Unterschiede zum Basismodell und die geänderten Zahlenwerte erläutert.

Die verschiedenen Varianten unterscheiden sich somit nur durch die explizit angeführten Abweichungen vom Grundmodell, ansonsten entsprechen sie diesem.

Variante Cryokondensation

Dieses Verfahren unterscheidet sich durch die Art der Erfassung und Verflüssigung der FCKW in der Prozessluft vom Grundmodell. Das freigesetzte FCKW (R11) wird mittels einer Tiefkühlkondensation verflüssigt und in Druckgasflaschen abgefüllt. Die Abkühlung erfolgt dabei mit Hilfe von flüssigem Stickstoff.

Variante mit geringerer Sortiereffizienz – Verbrennung des Polystyrols

Die Verfahrensschritte dieser Variante sind mit denen des Grundmodells identisch, allerdings ist die Sortenreinheit der Hartkunststofffraktionen niedriger, dadurch kann keine stoffliche Verwertung des Polystyrols vorgenommen werden. Es erfolgt eine thermische Verwertung dieser Fraktion in der MVA. Es werden also alle Kunststofffraktionen, außer der PUR-Fraktion, thermisch verwertet.

Variante mit thermischer Verwertung des Polystyrols in der Mitverbrennung

Bei dieser Variante wird die sortenreine Polystyrolfraktion nicht stofflich verwertet, sondern in der industriellen Mitverbrennung als Ersatzbrennstoff genutzt. Der Wirkungsgrad für diese thermische Verwertung beträgt 85 %.

Variante mit Berücksichtigung von Fremdstoffen in der Fraktion „PUR-Mehl“

Durch die Aufprallkräfte im Querstromzerspaner wird ein bestimmter Anteil der Metalle als Pulver abgerieben und anschließend mit dem PUR-Mehl ausgetragen. Auf diese Weise weist die PUR-Mehl-Fraktion ca. das Doppelte des Gewichts des im Kühlgerät enthaltenen PUR-Schaums auf (Hornberger et al., 2005). Vor allem die Aluminiumbeschichtung auf dem Abschlusskarton der Schäumung steht nicht mehr für eine

Verwertung als Sekundäraluminium zur Verfügung. Sie wird im Querstromzerspaner zerrieben und mit dem PUR-Mehl ausgetragen.

Der Materialaustrag über die PUR-Fraktion soll anhand dieser Variante betrachtet werden.

Variante mit thermischer Verwertung der PUR-Isolierung

Die anfallende PUR-Fraktion wird wie beim Grundmodell weiter verarbeitet und in Säcke abgefüllt. Danach wird dieses Material jedoch nicht als Ölbinder wiederverwertet sondern in einer Sonderabfallverbrennungsanlage verbrannt.

Variante mit Berücksichtigung der Transportleistungen

Diese Variante dient dazu den Einfluss der verfahrensinternen Transportprozesse auf die Gesamtbilanzen abzuschätzen. Es werden alle Transporte nach der Anlieferung der Alt-Kühlgeräte beim Verwertungsbetrieb berücksichtigt. Das sind, die Transporte der FCKW zur Reinigung bzw. zur Hochtemperaturspaltanlage und die Weiterleitung der Mischfraktion (nach PUR- und Fe-Abscheidung) zu einer externen Sortieranlage.

Variante „Lesni-System“

Die erste Stufe dieses Systems (Demontage) entspricht der des Grundmodells. Der wesentliche Unterschied dieses Verfahrens zum beschriebenen Grundmodell liegt in der Art der Prozessluftbehandlung. Das FCKW wird abgetrennt und gleich anschließend in einer katalytischen Reaktion vernichtet (NaCl und NaF entstehen als Restprodukte). Aufgrund der mangelhaften Datenverfügbarkeit erfolgt in dieser Arbeit aber keine weitere Betrachtung dieses Systems, es ist hier also nur der Vollständigkeit halber angeführt.

3.3.2 Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung

Wie bei den Verfahren mit weitestgehender stofflicher Verwertung, wird auch bei diesem Verfahrenstyp zuerst das FCKW-Öl-Gemisch aus dem Kältemittelkreislauf des Alt-Kühlgerätes abgesaugt. Danach erfolgt eine manuelle Entfernung aller demontierbaren Bestandteile des Kühlgerätes. Die so vorbehandelten Kühlgeräte werden schließlich in einem Shredder mit geschlossener Prozesslufterhaltung zerkleinert und in einem Drehrohrofen thermisch verwertet. Die anfallende Verbrennungsschlacke wird gesammelt und eine Eisenfraktion daraus abgetrennt.

In Österreich wird dieser Verfahrenstyp von der Stadt Wien zur Behandlung der anfallenden Alt-Kühlgeräte eingesetzt. Die Absaugung des Kältemittels und die anschließende Demontage erfolgen in der Abfallbehandlungsanlage (ABA) Rinterzelt der Magistratsabteilung (MA) 48. Die vorbehandelten Kühlgeräte werden dann bei der



Fernwärme Wien geshreddert und in der Verbrennungsanlage für gefährliche Abfälle thermisch verwertet. Die anschließende Eisenabtrennung aus der Verbrennungsschlacke der Kühlgeräte wird wieder auf dem Gelände der ABA Rinterzelt vorgenommen.

Die Daten und Informationen über dieses Verfahren wurden zum Teil aus der Literatur entnommen (Gabriel, 2004; MA 48, 1996;) und zum Teil in Gesprächen, praktischen Versuchen und Analysen gemeinsam mit der MA 48 und der Fernwärme Wien erarbeitet.

3.3.2.1 Grundmodell

Das Grundmodell dieses Verfahrenstyps entspricht dem derzeitigen Alt-Kühlgeräte-Behandlungsverfahren der Stadt Wien. Eine Darstellung des Verwertungssystems ist in Abbildung 3-4 zu sehen.

Verfahrensbeschreibung:

Als erstes erfolgt eine Absaugung des FCKW-Öl-Gemisches. Die Entfernung des Kältemittelgemisches erfolgt genau so, wie bei den Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung. Das gesammelte Gemisch wird dann ebenfalls zur Auftrennung gebracht und schließlich zur Hochtemperatur-Spaltung weiter transportiert.

Nach der Entfernung des Kühlmittelgemisches wird der Kompressor ausgebaut. Glasplatten, Kabel, Metallfächer, Kupferteile, Kunststoffabdeckungen bzw. demontierbare Kunststoffteile, Kühlrippen, Kondensatoren und Quecksilberschalter werden ebenfalls entfernt, die Demontagetiefe ist bei diesem Verfahren relativ hoch.

Die übrig gebliebenen „entkernten“ Kühlgerätegehäuse werden anschließend gesammelt und zur Verbrennungsanlage für gefährliche Abfälle der Fernwärme Wien überstellt. Dort erfolgt eine Zerkleinerung der Gehäuse im Shredder. Die anfallende Mischfraktion wird über ein Förderband in den Aufgabebunker des Drehrohrofens transportiert. Die FCKW-beladene Prozessluft aus dem Shredder, dem Förderband und dem Bunker wird abgesaugt und als Verbrennungsluft dem Drehrohrofen zugeführt.

Bei der thermischen Verwertung der Shredder-Fraktion werden die in der Isolierung und in der Prozessluft enthaltenen FCKW zerstört. Die freigesetzte Energie wird über eine Kraft-Wärme-Kopplung genutzt, es wird also Strom und Wärme erzeugt. Das Rauchgas wird durch eine weitergehende Rauchgaswäsche nach dem Stand der Technik gereinigt. Der bei der anschließenden Abwasserreinigung entstehende Filterkuchen wird unterirdisch deponiert. Die Flugasche, die beim Verbrennungsprozess entsteht wird ebenfalls unterirdisch abgelagert. Die anfallende Verbrennungsschlacke wird in Containern gesammelt, später erfolgt dann eine Eisenabtrennung in der ABA Rinterzelt. Die verbliebene Rest-Schlacke wird deponiert.

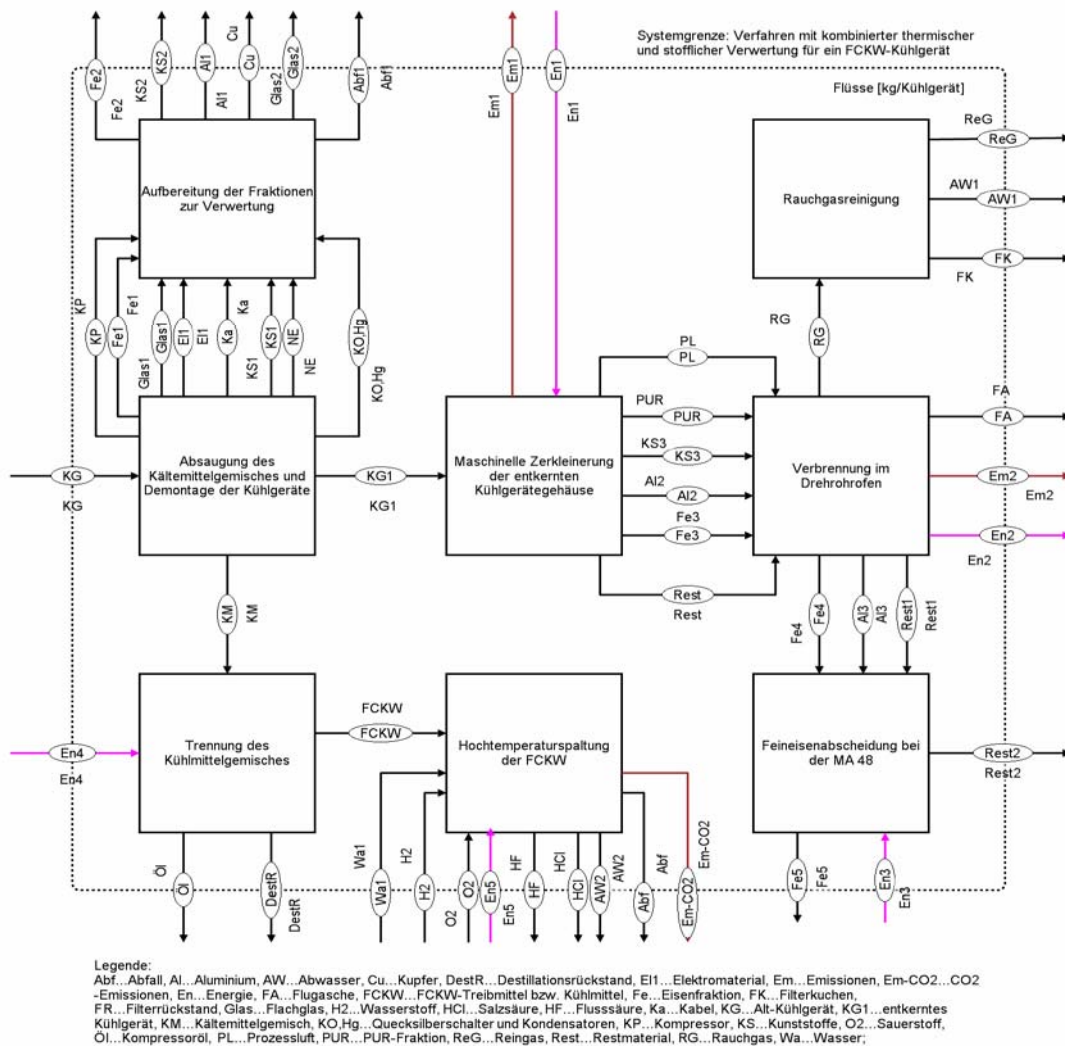


Abbildung 3-4: Systembild des Grundmodells der Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung

In Abbildung 3-5 sind die Materialflüsse für das Grundmodell dieses Behandlungstyps dargestellt. Die Output-Flüsse aus den einzelnen Prozessen wurden anhand der zuvor erwähnten Quellen ermittelt.

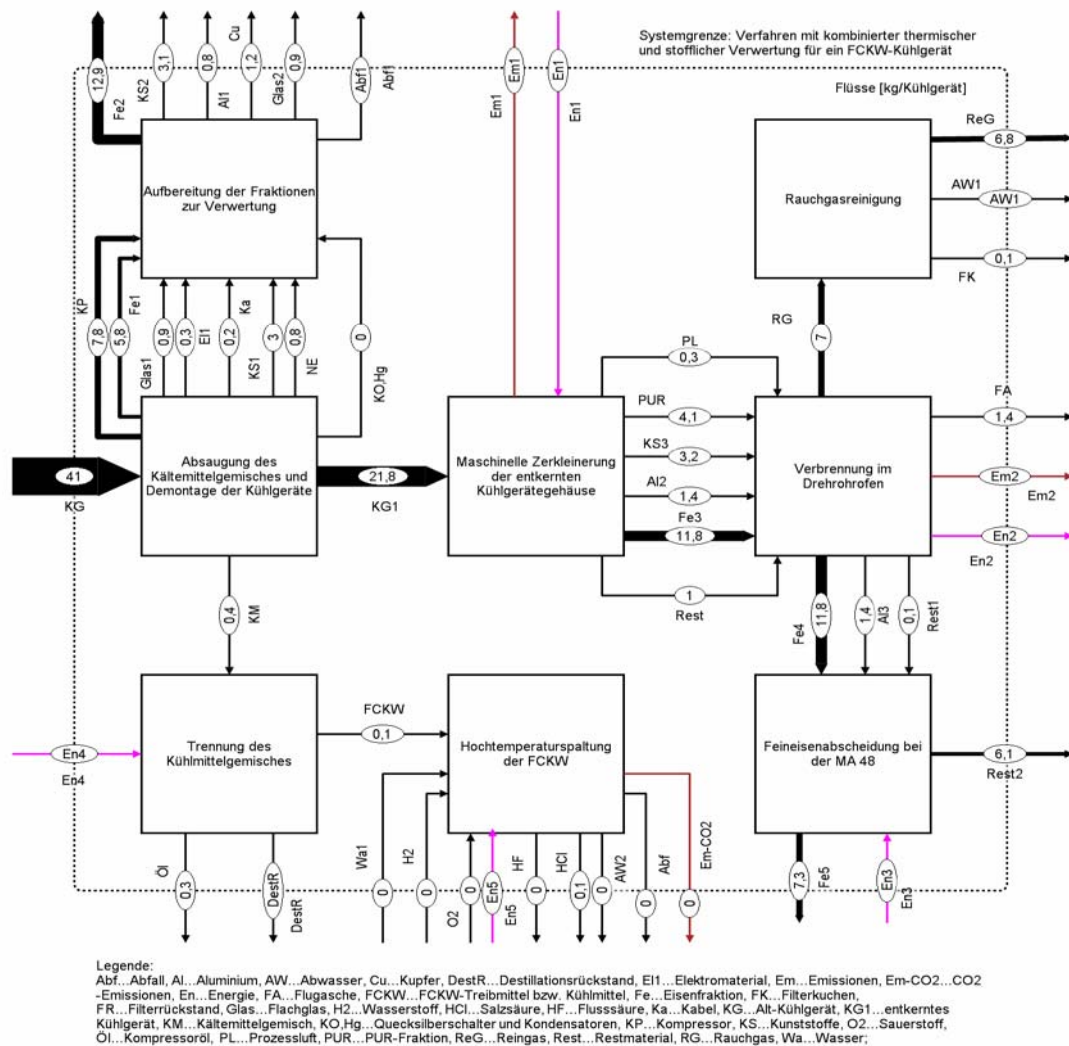


Abbildung 3-5: Darstellung der Material- und Energieflüsse für das Verfahren mit stofflicher und thermischer Verwertung FCKW-haltiger Alt-Kühlgeräte

3.3.2.2 Varianten des Grundmodells

Die Beschreibung der verschiedenen Variationen erfolgt jeweils nur hinsichtlich der Unterschiede zum Basisverfahren, alle nicht explizit angeführten Verfahrensteile entsprechen somit denen des Grundmodells.

Variante mit NE-Metall-Abscheidung

Die Eisen- und Nicht-Eisen-Metallabscheidung aus der Verbrennungsschlacke erfolgt effizienter. Durch die Installation einer neuen Sortieranlage wird eine Abtrennung von Nicht-Eisen-Metallen und eine praktisch vollständige Eisenabscheidung ermöglicht. Diese Variante wird in drei Ausführungen betrachtet: Bei der ersten erfolgt die Aluminiumabscheidung mit einer theoretisch möglichen Effizienz von 35 % (Pretz et al., 2000) und bei der zweiten erfolgt die Abscheidung mit einem praktisch bereits er-

reichten Anteil von 15 % (Neubacher et al., 2003). Die dritte Abwandlung dieser Variante geht von einer Aluminiumrückgewinnungsquote von 50 % aus, diese Annahme soll betrachtet werden, da bei der Ermittlung der oben angeführten Zahlen von sehr feinen Aluminiumteilchen ausgegangen wurde, bei der Kühlgerätebehandlung aber durchaus größere Aluminiumstücke anfallen und somit auch die Rückgewinnungsquote höher sein sollte.

Diese Varianten sind vor allem für die zukünftige Entwicklung dieses Verfahrenstyps von besonderem Interesse, da bei der ABA Rinterzelt mittelfristig eine neue Schlacke-Sortieranlage installiert werden soll.

Variante mit Berücksichtigung der Transportwege

Es werden alle Transportleistungen nach der Anlieferung der Alt-Kühlgeräte beim Verwertungsbetrieb berücksichtigt. Das sind, die Transporte der FCKW zur Reinigung bzw. zur Hochtemperaturspaltanlage sowie die Transporte zwischen ABA Rinterzelt und Fernwärme Wien. Diese Variante soll den Einfluss der Transporte auf die Gesamtenergiebilanz für das Verfahren betrachten.

3.4 Verwertungssysteme für VOC-Alt-Kühlgeräte

In Zukunft wird der Anteil der VOC-Geräte an den zur Behandlung anfallenden Alt-Kühlgeräten immer größer werden. Die in Kapitel 3.3 betrachteten Verfahren erfüllen im Wesentlichen auch die technischen Anforderungen an Verfahren zur Behandlung von VOC-Geräten.

Die ökologische Relevanz der verwendeten VOC ist bei weitem nicht so gravierend wie die der FCKW. Flüchtige organische Kohlenwasserstoffe werden innerhalb weniger Tage bis Wochen in der Troposphäre abgebaut und tragen daher weder zum Treibhauseffekt noch zum Abbau der stratosphärischen Ozonschicht bei. Sie sind aber stark an der Bildung von bodennahem Ozon beteiligt und können auch gesundheits-schädigende Wirkungen haben.

Als Treibmittel in den Isolationsschäumen der VOC-Geräte wird heute vor allem Cyclopentan verwendet. Dieses verdampft bei 20°C bereits relativ schnell und kann gesundheitsschädliche Konzentrationen entwickeln, welche beim Einatmen zu Vergiftungen führen können. Besonders hervorzuheben ist die hohe Entzündungs- und Explosionsgefahr von Pentan, die Explosionsgrenzen in Luft liegen bei 1,5 – 8,7 Volumprozent.



Die in Kapitel 3.3 dargestellten Modell-Behandlungsverfahren für FCKW-haltige Alt-Kühlgeräte müssen somit vor allem hinsichtlich ihrer Eignung zur Gewährleistung des Arbeitsschutzes und des Explosionsschutzes überprüft bzw. angepasst werden.

3.4.1 Verfahrenstyp mit weitgehender stofflicher Verwertung

Die Behandlung der angelieferten VOC-Geräte erfolgt in Chargen, das heißt es wird immer eine größere Anzahl an Alt-Kühlgeräten gemeinsam verwertet. Für das Aufbereitungsverfahren eines durchschnittlichen VOC-Gerätes sind in Abbildung 3-6 bereits die Materialströme dargestellt.

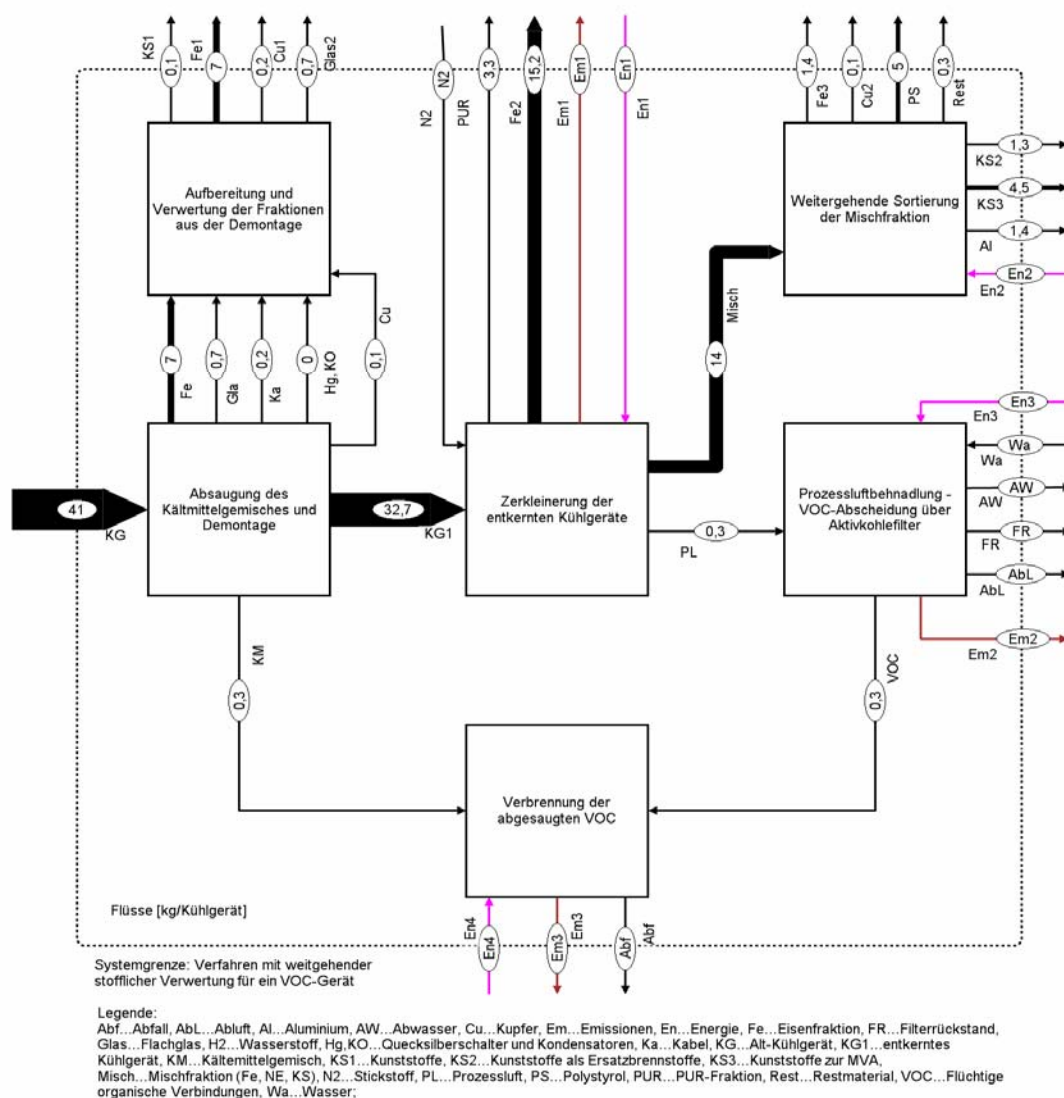


Abbildung 3-6: Materialströme für das Aufbereitungsverfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung für VOC-Geräte

Unterschiede zum Behandlungsverfahren für FCKW-haltige Alt-Kühlgeräte (siehe 3.3.1) treten nur hinsichtlich der Vernichtung der Kühl- und Treibmittel und bei der Entgasung des Isolierschaums auf. Der Sauerstoffgehalt der Prozessluft bei der Entgasung der PUR-Isolierung muss nämlich zur Vermeidung explosiver VOC-Gasgemische ständig gesteuert werden, was durch die Zugabe von Stickstoff geschieht. Die mit Pentan beladene Prozessluft wird abgesaugt und das Pentan wird nach der Abscheidung in Druckgasflaschen gesammelt und später verbrannt.

Alle anderen Verfahrensschritte entsprechen jenen der Behandlung von FCKW-haltigen Alt-Kühlgeräten.

Eine Betrachtung von verschiedenen Variationen des Grundmodells erfolgt auch für VOC-Geräte. Die untersuchten Abwandlungen entsprechen jenen die bereits für FCKW-haltige Geräte beschrieben wurden (siehe 3.3.1.2).

3.4.2 Verfahrenstyp mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung

Das Verfahren zur Verwertung der VOC-Alt-Kühlgeräte entspricht beinahe vollständig dem Verfahren zur Behandlung FCKW-haltiger Kühlgeräte (siehe 3.3.2). Der einzige Unterschied besteht bei der Verwertung des abgesaugten Kältemittels aus dem Kühlmittelkreislauf, es wird nicht mittels Hochtemperaturspaltung verwertet, sondern verbrannt. Eine Zugabe von Stickstoff zur Prozessluft ist voraussichtlich nicht notwendig, da die VOC-Konzentrationen aufgrund des großen abgesaugten Luftstroms niedrig sind. Eine erste Abschätzung zeigt, dass sie mindestens eine Zehnerpotenz unter dem Bereich explosiver VOC-Luft-Gemische liegen.

Die Prozessluft aus dem Shredder wird abgesaugt und als Verbrennungsluft in den Ofen eingeblasen, wo die flüchtigen Kohlenwasserstoffe unter kontrollierten Bedingungen thermisch verwertet werden.

Abbildung 3-7 zeigt das Grundmodell dieses Verfahrens bereits unter Angabe der einzelnen Materialströme.

Die Varianten des Grundmodells entsprechen auch hier jenen, die bereits für die Verwertung von FCKW-haltigen Kühlgeräten durch Verfahren dieses Typs beschrieben wurden (siehe 3.3.2.2.).

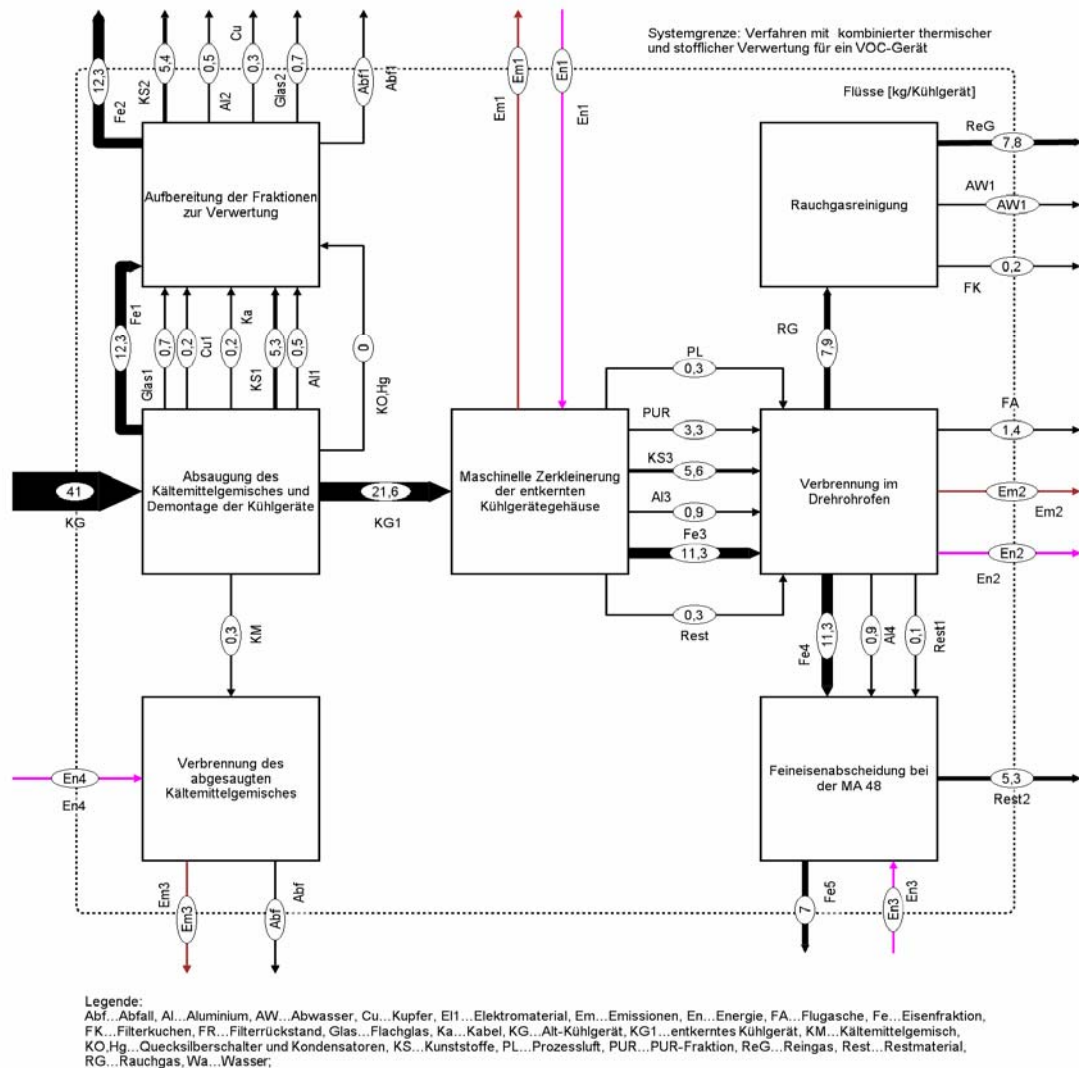


Abbildung 3-7: Darstellung der Stoffflüsse des Grundmodells der Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung von VOC-Geräten

3.5 Vergleich der verschiedenen Verwertungssysteme für Alt-Kühlgeräte

Der Vergleich der ausgewählten Verwertungsverfahren wird basierend auf der durchschnittlichen Zusammensetzung eines Alt-Kühlgerätes vorgenommen. Die durchschnittliche Zusammensetzung eines FCKW-haltigen Alt-Kühlgerätes kann aus Tabelle 3-3 entnommen werden, die dort angegebenen Fraktionen stellen den Verfahrensinpurt für die Verfahren zur Behandlung FCKW-haltiger Geräte dar. Der Input der Verwertungsverfahren von VOC-Geräten ist aus Tabelle 3-4 ersichtlich.

3.5.1 Auswahl der relevanten Kennwerte für den Systemvergleich

Unterschiede zwischen den betrachteten Behandlungssystemen können hinsichtlich des Energieverbrauchs, des Ressourcenverbrauchs und der Emissionen auftreten. Da die Verwertungswege der Eingangsfractionen für jedes Behandlungsverfahren unterschiedlich sind, ist es nicht möglich die jeweiligen Outputs direkt miteinander zu vergleichen.

Eine gemeinsame Basis für den Vergleich der einzelnen Verwertungssysteme stellt die Energie dar. Alle Inputs und Outputs werden in Energieflüsse umgerechnet, das passiert anhand des kumulierten Energieaufwandes (KEA) zur Bereitstellung eines Gutes. Anschließend wird für jedes Verfahren eine Energiebilanz berechnet, dabei werden einander Energieaufwand und Energiegewinn gegenübergestellt (siehe Abbildung 3-8).

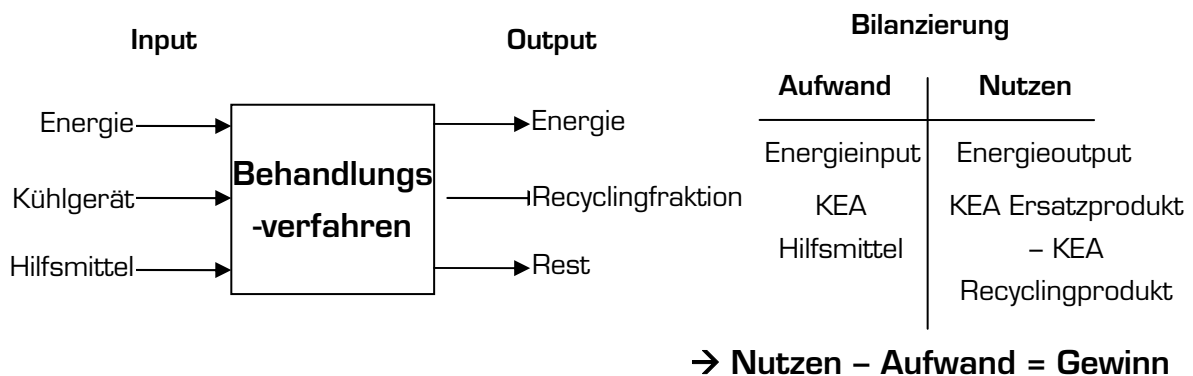
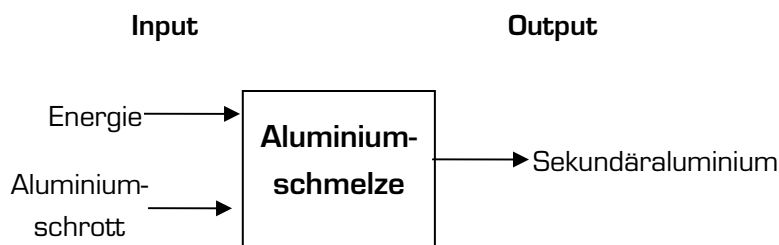


Abbildung 3-8: Schematische Darstellung der energetischen Verfahrensbilanzierung

Für jede Recyclingfraktion wird ein Ersatzprodukt bestimmt, das durch die zurück gewonnenen Outputs substituiert wird. Die Energiegutschrift erfolgt jeweils für das Ersatzprodukt, da dieses aufgrund der Verwertung der Kühlgerätefraktion nicht erzeugt werden muss (siehe dazu Abbildung 3-9).



$$\text{Gutschrift} = \text{KEA Primäraluminium} - \text{KEA Sekundäraluminium}$$

Abbildung 3-9: Exemplarische Ermittlung der Gutschrift für die Recyclingfraktion "Aluminiumschrott"



Die verschiedenen Verfahren erzeugen Emissionen in unterschiedlichem Ausmaß. Von besonderem Interesse sind dabei produktbedingt die FCKW-Emissionen. Eine Betrachtung der Emissionen erfolgt außerdem für HF, HCl, CO₂ und feste Abfälle. Die NO_x-Emissionen der betrachteten Behandlungsverfahren sind im Wesentlichen identisch und werden deshalb nicht genauer untersucht.

3.5.1.1 Kumulierter Energieaufwand (KEA)

Der KEA stellt die Summe der kumulierten Energieaufwendungen für die Bereitstellung eines Gutes dar.

Wie bereits erwähnt, wird der KEA in dieser Arbeit zur Bestimmung der Energiegutschrift für die Ersatzprodukte (= Gut, welches durch die wiederverwertete Kühlgeräte-Fraktion ersetzt werden kann → Nutzengleichheit) verwendet.

Eine Zusammenstellung der verwendeten Werte für den KEA der einzelnen Güter findet sich im Anhang in der Tabelle 9-2.

3.5.1.2 Emissionen

Eine Darstellung der Emissionen erfolgt sowohl einzeln für die unten angeführten Substanzen als auch in Form aggregierter Kennwerte.

FCKW und FKW

Die direkt im Zuge des Behandlungsverfahrens freigesetzten FCKW bzw. FKW werden anhand mehrerer Szenarien abgeschätzt. Modellhaft wird angenommen, dass in allen FCKW-Kühlgeräten als Kältemittel R12 und als Treibmittel R11 eingesetzt wurde. Die Bilanzierung erfolgt nur für direkte Emissionen im Zuge des Kühlgeräte-Behandlungsverfahrens.

HF und HCl

Bei der Zerstörung von FCKW entstehen als Spaltprodukte HCl und HF, diese können dann eventuell in die Atmosphäre entweichen. Direkte HCl-Emissionen können auch bei der Verbrennung von Polyvinylchlorid (PVC) auftreten.

Bei der Bilanzierung des Ausstoßes an HF und HCl werden auch Emissionen die für die Bereitstellung eines bestimmten Gutes auftreten berücksichtigt.

CO₂

CO₂ wird in erster Linie bei der Verbrennung der im Kühlgerät enthaltenen Kunststoffe freigesetzt. Die Bilanzierung der CO₂-Emissionen erfolgt sowohl für den direkten Ausstoß von CO₂ aus dem Behandlungsverfahren als auch für indirekte CO₂-Emissionen aufgrund der Vorkette zur Bereitstellung verschiedener Güter.

Feste Abfälle

Alle festen Output-Materialien aus einem Behandlungsverfahren, die nicht verwertet sondern deponiert werden, werden über die Aufstellung der festen Abfälle erfasst.

Aggregierte Kennwerte

Für die Emissionen aus den Kühlgerätebehandlungsverfahren werden drei Summenkennwerte herangezogen. Das Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP) in kg CO₂-Äquivalente, das Ozonabbaupotential (Ozone Depletion Potential, ODP) in R11-Äquivalente und das Versauerungspotential (Acidification Potential, AP) in SO₂-Äquivalente. Für weitergehende Informationen hinsichtlich der verschiedenen Kennwerte wird auf die einschlägige Literatur verwiesen.

3.5.2 Bestimmung von Ersatzprodukten für die wiederverwerteten Materialien

Um einen Verfahrensvergleich zu ermöglichen ist es notwendig, für Stoffe, die nur in einem Verfahren zur Wiederverwendung gelangen, dem jeweiligen Verfahren eine Gutschrift zu erteilen. Diese Gutschrift muss sich nach dem jeweils durch das wiederverwertete Material ersetzten Gut richten, da dieses nicht erzeugt werden muss.

3.5.2.1 PUR-Isolierung

Der Hauptverwertungsweg für die anfallende PUR-Fraktion aus der Isolierung der Alt-Kühlgeräte besteht in der Verwendung als Ölbindemittel.

Der Markt für Ölbindemittel ist unübersichtlich und es lässt sich für PUR kein Ersatzprodukt schlüssig bestimmen. Einerseits liegt das daran, dass die Menge an innerbetrieblich produzierten und verwendeten Bindemitteln nicht durch den Markt erfasst wird (GMAG, 2006). Andererseits kann davon ausgegangen werden, dass ca. 70 % der Öl- und Chemikalienbindemittel aus ehemaligen Abfällen hergestellt werden und oft keine genauen Angaben über die „Produktionsmengen“ verfügbar sind (GÖC, 2006).

Im Zuge dieser Studie wird als Ersatzprodukt für die Öl- und Chemikalienbindemittel aus der anfallenden PUR-Fraktion ein Bindemittel auf der Basis von Sägeabfällen bei der Holzverarbeitung gewählt. Diese Ölbindemittel werden der gleichen Ölbindemittel-Klasse zugeordnet, wie die Produkte aus wiederverwerteten PUR (III R). Außerdem ist für beide Abfallstoffe auch eine Wiederverwertung als Pressplatten möglich.

Die Umrechnung der Menge an PUR auf die Ersatzmenge an Holzabfall erfolgt über die Saugleistung der produzierten Ölbindemittel. Tabelle 3-5 zeigt die Produkte, die zur Berechnung des Äquivalenzfaktors herangezogen wurden.

Aus den Angaben in Tabelle 3-5 ergibt sich ein Umrechnungsfaktor von 1,4. Somit kann also 1 kg „PUR-Ölbinder“ durch 1,4 kg „Holz-Ölbinder“ ersetzt werden.



Generell kann man annehmen, dass PUR andere Abfälle verdrängt, aber dadurch kaum Primärressourcen direkt eingespart werden.

Tabelle 3-5: Zur Ermittlung des Umrechnungsfaktors verwendete Ölbindemittel der Kategorie III R

Produkte auf PUR-Basis*	kg Heizöl / kg Binder	Produkte auf Holz-Basis*	kg Heizöl / kg Binder
Bereich	0,53 – 1,81	Bereich	0,42 – 1,22
Durchschnittswert	1,17	Durchschnittswert	0,82
*Produkte und Beschreibungen wurden der „Liste der geprüften Ölbinden“ entnommen (Umweltbundesamt Deutschland, 2004)			

3.5.2.2 Polystyrol (PS)

Polystyrol gehört zu den Thermoplasten und macht den Hauptanteil der Kunststofffraktion bei Alt-Kühlgeräten aus (ca. 70 %). Es ist mischungsunverträglich und muss daher für eine Wiederverwertung sortenrein vorliegen. Da die Kunststoffe in Elektroaltgeräten mit verschiedensten Zuschlagstoffen (Flammhemmer, Weichmacher....) versehen sind, können aus der wieder gewonnenen Fraktionen meist keine Produkte mit höheren Qualitätsansprüchen hergestellt werden. Besonders für nicht besonders teure Kunststoffe wie Polystyrol ist eine stoffliche Verwertung durch die Herstellung von dickwandigen Recyclingprodukten für einfache Anwendungen am wahrscheinlichsten.

Für diese Studie wird aus diesen Gründen als Verwertungsweg die Herstellung von Formprofilen (Gartenbänke, Zaunlatten, Blumentöpfe...) angesetzt, das entsprechende Ersatzprodukt stellen Profileteile aus gehobeltem Holz dar. Die Umrechnung von PS auf gehobeltes Holz erfolgt über das Volumen (siehe dazu auch Fehrenbach et al., 1997).

3.5.2.3 Metallfraktionen

Die Verwertung der anfallenden Metalle erfolgt durch Einschmelzung dieser in der betreffenden Metallhütte bzw. im Stahlwerk.

Eisenfraktion → Elektro Stahl: Ersatzprodukt ist Oxygenstahl. Oxygenstahl wird hauptsächlich aus Primärroheisen hergestellt, wohingegen beim Elektro Stahl das dominierende Ausgangsprodukt Eisenschrott ist.

Ein qualitativer Unterschied zwischen dem Eisen in der Schlacke aus einem Verbrennungsprozess und unverbranntem Eisenschrott ist nach Auskunft der Stahlindustrie nur hinsichtlich verschiedener Verunreinigungen und Anhaftungen an der angelieferten Eisenfraktionen gegeben. Die Rohstoffqualität an sich wird aber durch die Verbrennung nicht negativ beeinflusst (Neubacher et al., 2003 und VOEST-ALPINE Stahl, 2006).

Kupferfraktion → Sekundärkupfer: Ersatzprodukt ist Primärkupfer, dieses müsste sonst aus Primärrohstoffen gewonnen werden.

Aluminiumfraktion → Sekundäraluminium: Ersatzprodukt ist Primäraluminium, dieses müsste ansonsten in einem energieintensiven Prozess aus Primärrohstoffen gewonnen werden.

Die Rückgewinnung von metallischem Aluminium aus Verbrennungsschlacken bedingt eine vorherige Abtrennung des Feinanteiles aus der Schlacke. Theoretisch können dadurch nur mehr 35 % des eingebrachten metallischen Aluminiums tatsächlich zurück gewonnen werden, in Versuchen waren es sogar nur 11 – 15 % (Pretz et al., 2000). Es ist aber wahrscheinlich, dass für das Aluminium aus Kühlgeräten wesentlich höhere Rückgewinnungsquoten erzielt werden können, da hier größere Aluminiumstücke in der Schlacke auftreten und diese leichter abtrennbar und verwertbar sind.

Auch wenn keine Verbrennung erfolgt, ist es fraglich ob 100 % des Aluminiums im Kühlgerät verwertet werden können, da ein Teil des Aluminiums als Kartonbeschichtung vorliegt. Dieser Karton befindet sich im Verbund mit der PUR-Schäumung, was eine Abtrennung der Aluminiumbeschichtung zusätzlich erschwert. Weitere Betrachtungen bezüglich der Annahmen über die Verwertbarkeit und Form des Aluminiums im Kühlgerät erfolgen in Kapitel 4.2.3.3.

3.5.2.4 Flachglas

Bei der Glaserzeugung können bis zu 20 % Alt-Flachglas mit eingeschmolzen werden. Durch den Einsatz von Glasscherben wird der Energieaufwand bei der Glasherstellung verringert, als Faustregel gilt, dass 10 % Scherbeneinsatz eine Energieeinsparung von 3 % bringen (Bundesverband Glasindustrie e.V., 2006).

Als Ersatzprodukt für Flachglas wird somit die Energie- und Rohstoffeinsparung, die durch den Scherbeneinsatz bei der Glaserzeugung erzielt wird, angesetzt.

3.5.2.5 Erfasste FCKW und FKW

Erfasste FCKW und FKW müssen zerstört werden. Die Verwertung bzw. Zerstörung der rückgewonnenen FCKW bzw. FKW erfolgt mittels Hochtemperaturspaltung. Dabei entstehen unter anderem technisch reine Salzsäure und Flusssäure. Für diese werden als Ersatzprodukte konventionell hergestellte Fluss- und Salzsäure angesetzt.

3.5.2.6 Elektrischer Strom und Wärme

Für den erzeugten bzw. verbrauchten Strom wird als Ersatzprodukt elektrischer Strom gemäß dem deutschen Strommix festgelegt. Hier wird aus Gründen der Konsistenz



nicht der österreichische Strommix angesetzt, da in der Vorkette der bereitgestellten Güter ebenso der deutsche Strommix verwendet wird. Der KEA für die Bereitstellung von 1 MJ elektrischem Strom beträgt 2,993 MJ (Öko-Institut, 2000).

Durch die Wärmenutzung bei der Verbrennung werden Primärrohstoffe eingespart, als Ersatzprodukt wird die Wärmeerzeugung durch die Verbrennung von Öl mit einem thermischen Wirkungsgrad von 85 % angesetzt.



4 Ergebnisse und Interpretation

Für die Beschriftung der Grafiken und Tabellen werden in diesem Kapitel Abkürzungen der beiden Verfahrenstypen verwendet. Die Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung werden als WS-Typ abgekürzt und die Abkürzung für die Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung lautet ST-Typ.

4.1 Bilanzierung der verschiedenen Behandlungsverfahren

4.1.1 Energetische Bilanzierung der Verwertungsmodelle

Die Bilanzierung der einzelnen Verfahrensmodelle erfolgt nach dem in Kapitel 3.5 beschriebenen Prinzip. Anhand von Tabelle 4-1 bis Tabelle 4-5 wird die Bilanzierung beispielhaft für das Grundmodell der Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung von FCKW-haltigen Alt-Kühlgeräten erläutert.

4.1.1.1 FCKW-haltige Alt-Kühlgeräte

Verfahrensmodelle mit weitgehender stofflicher Verwertung (WS-Typ)

Für das Grundmodell dieses Verfahrenstyps erfolgt eine genaue Beschreibung und Darstellung der Bilanzierung. Die Bilanzierung für die einzelnen Varianten wird nur noch für die jeweils abweichenden Verfahrensteile angeführt.

Grundmodell:

Tabelle 4-1: Gutschriften aufgrund der stofflichen Verwertung von Outputfraktionen aus dem Grundmodell des WS-Typs

stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/m ³]	KEA [MJ/KG]
Flachglas	2,17	0,89	20 % bei Flachglasherstellung*	2872		2,55
Öl**	0,64	0,26				-
PUR	9,92	4,07	Holzmehl	304		1,76
Fe-Fraktion	60,23	24,69	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	10005		247,02
Kupfer	2,89	1,18	Cu _{prim} - Cu _{sek}	43709		51,78
Aluminium	5,50	2,25	Al _{prim} - Al _{sek}	169446		382,02
Polystyrol	7,03	2,88	Schnittholz (geh.)		7184	19,72
Summe						704,86

*Die 20 %ige Energieeinsparung durch den Einsatz von Altglasscherben bei der Flachglasherstellung stellt eine Schätzung dar.

**Die Verwertung des Kälteöls bleibt unberücksichtigt, einerseits ist das Ersatzprodukt unklar und andererseits gibt es hinsichtlich der Öl-Rückgewinnung ohnehin keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellen.

In Tabelle 4-1 sind alle Fraktionen angeführt, die direkt einer stofflichen Verwertung zugeführt werden. Die Gutschriften ergeben sich dabei aufgrund des jeweiligen Ersatzproduktes. Die äquivalenten Mengen an Outputmaterial und Ersatzprodukt werden auf Grundlage der Erzielung des gleichen Nutzens ermittelt (siehe dazu 3.5.2). Aus Tabelle 4-1 ist ersichtlich, dass beim vorliegenden Verfahrensmodell der überwiegende Anteil (ca. 97 %) der Gutschriften für stoffliche Verwertung durch die Metallfraktionen aus dem Alt-Kühlgerät zu Stande kommt.

Die Gutschriften, die sich aus der Verbrennung mit gleichzeitiger Wärmenutzung ergeben sind in Tabelle 4-2 angeführt. Es werden auch Fraktion mitberücksichtigt die bereits vorher einer stofflichen Verwertung zugeführt wurden (PUR, Polystyrol). Es wird davon ausgegangen, dass diese am Ende ihrer Lebensdauer schließlich ebenfalls verbrannt werden. Für die Verbrennung in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) wird ein Wirkungsgrad von 70 % angesetzt, die Verbrennung in einer Verbrennungsanlage für gefährliche Abfälle erfolgt mit einem Wirkungsgrad von 50 % und für die industrielle Mitverbrennung von Kunststoffen sowie für die Ölfeuerung wird ein Wirkungsgrad von 85 % angenommen.

Die Berechnung der KEA-Gutschrift erfolgt über das Ersatzprodukt Heizöl_{schwer} und errechnet sich nach folgender Formel:

$$\text{KEA Gutschrift} = (\text{Kunststoffmenge} / \text{Umrechnungsfaktor}) * \text{Heizwert Öl} * \text{KEA Öl}$$

Kunststoffmenge = Kunststofffraktion in kg

Heizwert Öl = 40,5 MJ/kg

KEA Öl = 1,14 MJ/MJ

*Umrechnungsfaktor = Heizwert Öl * $\eta_{\text{Öl}}$ / Heizwert Kunststoff * $\eta_{\text{Kunststoff}}$*

Heizwert Kunststoff (siehe Tabelle 4-2)

$\eta_{\text{Öl}}$, $\eta_{\text{Kunststoff}}$ – Wirkungsgrade bei der Verbrennung

Tabelle 4-2: Gutschriften aufgrund der thermischen Verwertung von Outputfraktionen aus dem Grundmodell des WS-Typs

therm. Verwertung von	[%]	kg/Kühlgerät	Ersatzbrennstoff	HW KS [MJ/kg]	kg KS / kg Öl	KEA [MJ/KG]
Polystyrol	7,03	2,88	Öl ($\eta_{\text{Öl}}=0,85$; $\eta_{\text{KS}} = 0,7$)	39,6	1,24	107,19
Kunststoffe in der Industrie.	1,77	0,73	Öl ($\eta_{\text{Öl}}=0,85$; $\eta_{\text{KS}} = 0,85$)	40,0	1,01	33,18
Kunststoffe in der MVA	6,49	2,66	Öl ($\eta_{\text{Öl}}=0,85$; $\eta_{\text{KS}} = 0,7$)	30,0	1,64	74,95
PUR-Ölbindemittel im Drehrohr	9,92	4,07	Öl ($\eta_{\text{Öl}}=0,85$; $\eta_{\text{KS}} = 0,5$)	25,0	2,75	68,17
Summe						283,48



Die erfassten und abgefüllten FCKW aus den Alt-Kühlgeräten werden in einem Hochtemperaturspaltprozess verwertet. Als Produkte entstehen bei diesem Prozess unter anderem Flusssäure und Salzsäure (siehe dazu Tabelle 9-5). Der KEA von Flusssäure ist negativ, weil zur Gewinnung von 1 kg Flusssäure aus Flussspat ca. 2,5 kg Schwefelsäure notwendig sind. Da bei der Herstellung von Schwefelsäure viel nutzbare Wärme frei wird, besitzt sie einen negativen KEA und in weiterer Folge ergibt sich dadurch auch für Flusssäure ein negativer KEA. Eine Verminderung der Gutschrift für die Erzeugung eines Produktes erscheint aber nicht gerechtfertigt und deswegen wird der KEA von HF in Tabelle 4-3 gleich Null gesetzt.

Tabelle 4-3: Gutschriften für die Spaltprodukte aus der FCKW-Hochtemperaturspaltung beim Grundmodell des WS-Typs

FCKW-Spaltprodukte	kg/kg FCKW	kg/Kühlgerät	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/KG]
HF	0,33	0,12	0	0,00
HCl	0,61	0,22	17300	3,82
Summe				3,82

Insgesamt ergeben sich die Gutschriften bei diesem Modell somit zu 992,16 MJ/Kühlgerät.

In Tabelle 4-4 ist der Energiebedarf der verschiedenen Prozessschritte aufgelistet. Eine detaillierte Aufgliederung und die verwendeten Quellen finden sich im Anhang in Tabelle 9-4.

Tabelle 4-4: Abzüge für den Energieverbrauch der einzelnen Behandlungsschritte beim Grundmodell des WS-Typs

Prozess	Energiebedarf [MJ/KG]	Energieform	KEA [MJ/KG]
Shredder	9,0	el. Strom	26,9
Prozessluftbehandlung	12,2	el. Strom und Wärme	15,0
Zerkleinerung und Materialauftrennung	9,8	el. Strom	29,4
Trennung (SEG)	2,1	el. Strom	6,3
FCKW-Spaltung	0,39	el. Strom	1,18
Summe			78,78

Schließlich müssen auch noch die verwendeten Hilfsmaterialien in der Bilanzierung berücksichtigt werden. In Tabelle 4-5 sind diese angeführt, wobei bei diesem Modell nur bei der Hochtemperaturspaltung Hilfsstoffe benötigt werden (siehe Tabelle 9-5).

Tabelle 4-5: Abzüge aufgrund des Verbrauches an Hilfsmitteln beim Grundmodell des WS-Typs

Hilfsmittel	kg/Kühlgerät	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/KG]
O ₂	0,14	1197	0,17
H ₂	0,01	152789	2,23
Summe			2,40

Der Gesamtabzug beträgt für das Grundmodell der Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung 81,18 MJ/Kühlgerät.

Die Gegenüberstellung der Gutschriften und Abzüge für dieses Grundmodell zeigt, dass die Behandlung eines Alt-Kühlgerätes zu einer Energieeinsparung von 911 MJ führt. Diese Einsparung entspricht 22,3 l Dieselkraftstoff pro Kühlgerät. Bezogen auf den Gesamtenergieverbrauch zur Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Kühlgerätes stellt das 2,4 % dar (siehe dazu Truttmann und Rechberger, 2006)

Varianten:

Für die verschiedenen Varianten des Grundmodells (siehe Kapitel 3.3.1.2) können die Bilanzierungsergebnisse aus Tabelle 4-6 entnommen werden. Eine Darstellung und Beschreibung der jeweils vom Grundmodell abweichenden Verfahrensteile findet sich im Anhang in Tabelle 9-11.

Tabelle 4-6: Bilanzierungsergebnisse für die Varianten des WS-Typs

Varianten	Gutschriften			Abzüge			Gesamt	
	Angaben in MJ/KG	Stoffliche Verwertung	Therm. Verwertung	FCKW-Spaltprodukte	Energieverbrauch	Hilfsmaterialien		Sonstige
Cryokondensation		704,86	283,48	3,82	85,84	2,4	-	903,92
PS-Verbrennung		685,14	283,48	3,82	78,78	2,4	-	891,26
PUR+Fremdstoffe		622,15	283,48	3,82	78,78	2,4	-	828,27
PUR-Verbrennung		703,09	283,48	3,82	78,78	2,4	-	909,21
Transport		704,86	283,48	3,82	78,78	2,4	17,4	893,58
PS-Mitverbrennung		685,14	306,45	3,82	78,78	2,4	-	914,23

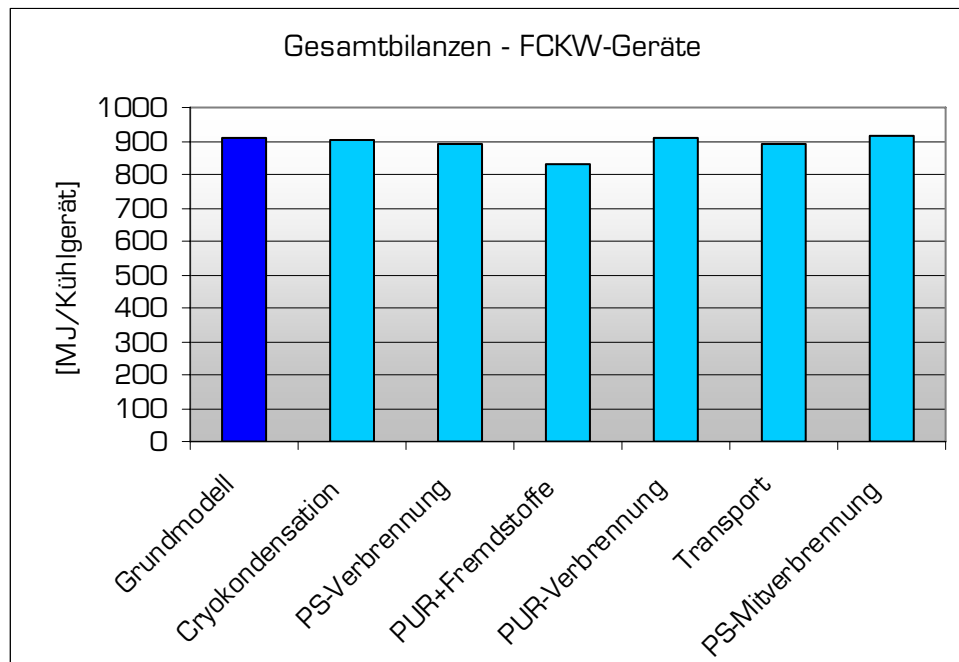


Abbildung 4-1: Erzielter Energiegewinn der Verfahrensmodelle des WS-Typs für FCKW-Geräte

Die Modelle der Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung in Abbildung 4-1 weisen alle einen ähnlichen Energiegewinn auf. Der Großteil der Gutschrift ergibt sich aufgrund der vollständigen Verwertung der Metalle, die im Kühlgerät enthalten sind. Das ist auch der Grund warum die Variante PUR+Fremdstoffe schlechter abschneidet, denn hier kann der Metallabrieb im PUR-Mehl nicht mehr zur Produktion von Sekundärmetallen herangezogen werden.

Verfahrensmodelle mit kombinierter stofflicher und therm. Verwertung (ST-Typ)

Auch für diesen Verfahrenstyp wird zunächst die Bilanzierung des Grundmodells ausführlich (Vorgangsweise und Erläuterungen siehe vorherige Bilanzierung des anderen Grundmodells) angeführt, danach erfolgt eine Betrachtung der Bilanzierungsergebnisse für die einzelnen Verfahrensvarianten. Die Kunststoffe, die nicht in der 1. Stufe demontiert werden, werden gemeinsam mit den restlichen Fraktionen des entkernten Kühlgerätegehäuses in einer Soderabfall-verbrennungsanlage thermisch verwertet (Wirkungsgrad 50 %). Die Kunststofffraktionen aus der Demontage werden in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) verbrannt, die Nutzung der Wärmeenergie erfolgt dabei mit einem Wirkungsgrad von 70 %.

Grundmodell:

Tabelle 4-7: Gutschriften bei der Bilanzierung des Grundmodells des ST-Typs

stoffliche Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/m ³]	KEA [MJ/KG]
Flachglas	2,17	0,89	20 % bei Flachglasherstellung*	2872		2,55
Öl**	0,64	0,26				-
Fe-Fraktion (verwertet)	49,21	20,17	Stahl _{ox} – Stahl _{el}	10005		201,8
Fe-Fraktion (nicht vw.)	11,02	4,52	keine			0
Kupfer	2,89	1,18	Cu _{prim} – Cu _{sek}	43709		51,78
Aluminium (verwertet)	2,01	0,83	Al _{prim} – Al _{sek}	169446		139,94
Aluminium (nicht vw.)	3,49	1,42	keine			0
Summe						396,07
*Die 20 %ige Energieeinsparung durch den Einsatz von Altglasscherben bei der Flachglasherstellung stellt eine Schätzung dar.						
**Die Verwertung des Kälteöls bleibt unberücksichtigt, einerseits ist das Ersatzprodukt unklar und andererseits gibt es hinsichtlich der Öl-Rückgewinnung ohnehin keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellen.						
Therm. Verwertung	[%]	kg/KG	Ersatzbrennstoff	HW KS [MJ/kg]	kg KS / kg Öl	KEA [MJ/KG]
Kunststoffe - Gehäuse	7,76	3,18	Öl ($\eta_{\text{öl}}=0,85$; $\eta_{\text{KS}} = 0,5$)	35,6*	1,94	75,87
Kunststoffe - Demontage	7,54	3,09	Öl ($\eta_{\text{öl}}=0,85$; $\eta_{\text{KS}} = 0,7$)	35,6*	1,38	103,22
PUR-Isolierung	9,92	4,07	Öl ($\eta_{\text{öl}}=0,85$; $\eta_{\text{KS}} = 0,5$)	25,0	2,75	68,17
Summe						247,26
*Die Mischfraktion Kunststoffe besitzt anteilig den Heizwert der einzelnen Fraktionen aus Tabelle 4-2						
FCKW-Spaltprodukte	kg/kg FCKW	kg/KG	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/KG]		
HF*	0,33	0,04	0	0,00		
HCl	0,61	0,07	17300	1,16		
Summe				1,16		
*KEA von HF wird wieder gleich Null gesetzt.						

Die Gutschriften für dieses Grundmodell ergeben sich insgesamt zu 644,49 MJ pro Kühlgerät.



Tabelle 4-8: Abzüge bei der Bilanzierung des Grundmodells des ST-Typs

Prozess	Energiebedarf [MJ/KG]	Energieform	KEA [MJ/KG]
Shredder	12,96	el. Strom	38,79
Absaugung	1,58	el. Strom	4,74
Förderbänder	1,44	el. Strom	4,31
Sortierung+Trennung	0,12	el. Strom	0,35
FCKW-Spaltung	0,12	el. Strom	0,36
Summe:			48,55
Hilfsmittel	kg/Kühlgerät	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/KG]
O ₂	0,043	1197	0,05
H ₂	0,004	152789	0,68
Summe			0,73

Für Grundlagen zur obigen Tabelle siehe Tabelle 9-4 und Tabelle 9-5.

Die Abzüge für das Grundmodell der Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung betragen 49,28 MJ pro Kühlgerät. Insgesamt ergibt sich für dieses Verfahren somit eine Energieeinsparung von 595 MJ pro Kühlgerät. Diese Einsparung entspricht 14,6 l Dieselkraftstoff pro Kühlgerät. Das macht 1,6 % des Gesamtenergieverbrauches (bezogen auf den ganzen Lebenszyklus) eines Kühlgerätes aus.

Varianten:

In Tabelle 4-9 sind die Ergebnisse der Bilanzierung für die einzelnen Verfahrensvarianten dargestellt. Bei der Betrachtung dieser Tabelle fällt auf, dass die Effizienz der Metallrückgewinnung aus der Schlacke einen großen Einfluss auf das Ausmaß der Energieeinsparung durch die Behandlung hat.

Tabelle 4-9: Bilanzierungsergebnisse für die Modellvarianten des ST-Typs

Varianten	Gutschriften			Abzüge			Gesamt
	Stoffliche Verwertung	Therm. Verwertung	FCKW-Spaltprodukte	Energieverbrauch	Hilfsmaterialien	Sonstige	
Sortierung (Effizienz 50 %)	564,00	247,26	1,16	48,72	0,73	-	762,97
Sortierung (Effizienz 35 %)	526,72	247,26	1,16	48,72	0,73	-	725,69
Sortierung (Effizienz 15 %)	477,58	247,26	1,16	48,72	0,73	-	676,55
Transport	396,07	247,26	1,16	48,55	0,73	2,24	592,98

Eine Darstellung der Bilanzierung für die vom Grundmodell abweichenden Anteile findet sich in Tabelle 9-12.

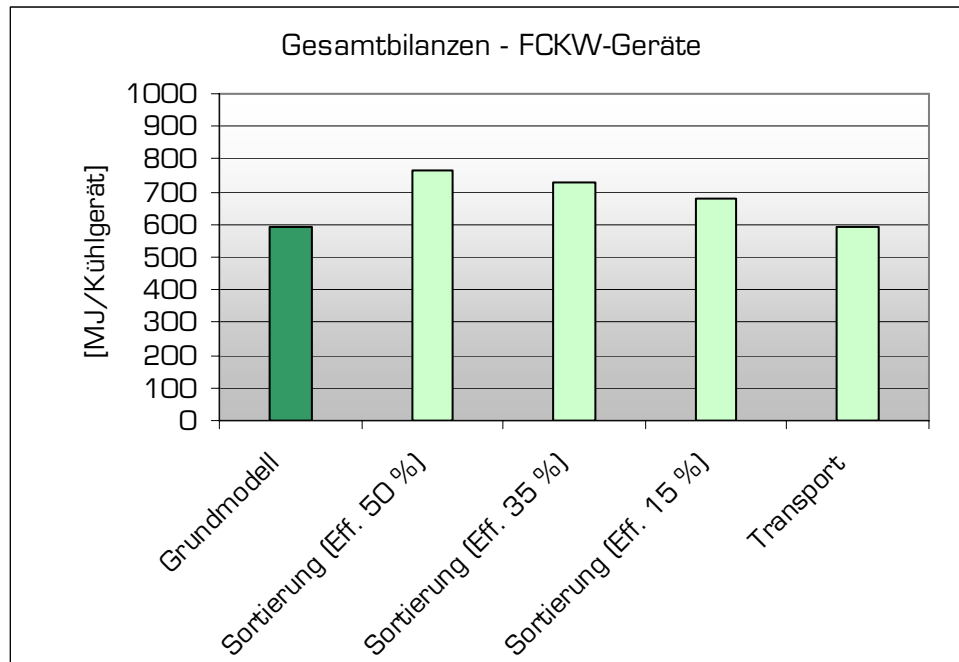


Abbildung 4-2: Erzielter Energiegewinn der Verfahrensmodelle des ST-Typs für FCKW-Geräte

Bei der Betrachtung von Abbildung 4-2 fällt auf, dass für die Modellvarianten mit einer effizienteren Metallrückgewinnung der Energiegewinn wesentlich höher ist als für das Grundmodell. Die größte Rolle bei den Metallen spielt dabei Aluminium, welches einen großen „ökologischen Rucksack“ besitzt und deswegen starken Einfluss auf das Bilanzierungsergebnis hat.



4.1.1.2 VOC-haltige Alt-Kühlgeräte

Die energetische Bilanzierung der einzelnen Verfahren erfolgte im vorigen Abschnitt für ein durchschnittliches FCKW-haltiges Alt-Kühlgerät (Tabelle 3-3). In diesem Abschnitt werden nun die Verfahrensmodelle hinsichtlich der Behandlung eines durchschnittlichen VOC-Kühlgerätes (Tabelle 3-4) betrachtet. Die Vorgehensweise bei der Bilanzierung entspricht jener aus Kapitel 4.1.1.1. In der Folge sind nur die Ergebnistabellen der Bilanzierung für VOC-Geräte angeführt.

Verfahrensmodelle mit weitgehender stofflicher Verwertung (WS-Typ)

In Tabelle 4-10 sind die Ergebnisse der Bilanzierung für die einzelnen Modelle dargestellt. Als Hilfsstoff kommt bei den Modellen dieses Typs Stickstoff zum Einsatz, dieser ist für die Einhaltung nicht explosiver VOC-Konzentrationen in der Prozessluft notwendig. Da keine Daten zur benötigten Menge verfügbar waren und ein starker Einfluss auf das Gesamtergebnis ausgeschlossen werden kann, bleibt der Stickstoffverbrauch in den Bilanzierungen unberücksichtigt. Die Bilanztabellen für das Grundmodell und die einzelnen Varianten finden sich im Anhang in der Tabelle 9-28 bzw. in der Tabelle 9-29.

Tabelle 4-10: Energiebilanzen der verschiedenen Behandlungsmodelle des WS-Typs für VOC-Geräte

Modelle	Gutschriften *		Abzüge			Gesamt
	Stoffliche Verwertung	Therm. Verwertung	Energieverbrauch	Hilfsmaterialien	Sonstige	
Angaben in MJ/KG						
Grundmodell	515,78	431,59	77,60	0	-	869,76
Cryokondensation	515,78	431,59	84,66	0	-	862,71
PS-Verbrennung	481,38	431,59	77,60	0	-	835,37
PUR+Fremdstoffe	458,25	431,59	77,60	0	-	812,24
PUR-Verbrennung	514,33	431,59	77,60	0	-	868,32
Transport	515,78	431,59	77,60	0	16,67	853,30
PS-Mitverbrennung	481,38	471,66	77,60	0	-	875,44

*Die Verbrennung der VOC wird nicht in die Bilanzierung eingeschlossen (Tatsächliche Verwertungswege unklar, Energiegewinn gering und für beide Verfahrenstypen gleich).

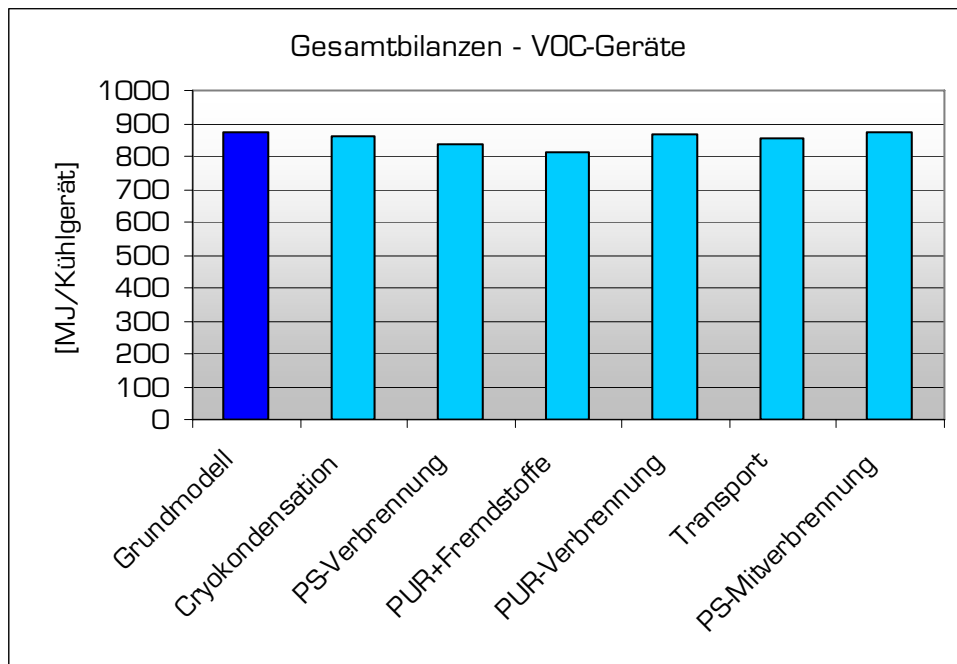


Abbildung 4-3: Energiegewinn der Verfahrensmodelle des WS-Typs für VOC-Geräte

Der Energiegewinn den die einzelnen Modelle zur Behandlung von VOC-Kühlgeräten erzielen ist etwas niedriger als der für FCKW-Kühlgeräte ermittelte (Abbildung 4-3). Das liegt an der Zusammensetzung von VOC-Kühlgeräten (siehe Tabelle 3-4), diese haben einen geringeren Metallanteil, vor allem was Aluminium und Kupfer betrifft. Die Variante „PS-Mitverbrennung“ schneidet am besten ab, wobei der Unterschied zum Bilanzierungsergebnis des Grundmodells nur sehr klein ist.

Verfahrensmodelle mit kombinierter stofflicher und therm. Verwertung (ST-Typ)

Die Ergebnisse für die Modellbilanzen sind in Tabelle 4-11 dargestellt. Wie zuvor finden sich auch für diesen Verfahrenstyp die Bilanzierungstabellen des Grundmodells sowie der Modellvarianten im Anhang (siehe Tabelle 9-30 und Tabelle 9-31).

Tabelle 4-11: Energiebilanzen für die Verfahrensmodelle des ST-Typs für VOC-Geräte

Modelle	Gutschriften*		Abzüge		Gesamt
	Stoffliche Verwertung	Therm. Verwertung	Energieverbrauch	Sonstige	
Angaben in MJ/KG					
Grundmodell	290,90	368,46	48,19		611,17
Sortierung (Effizienz 50 %)	406,93	368,46	48,36	-	727,03
Sortierung (Effizienz 35 %)	385,39	368,46	48,36	-	705,49
Sortierung (Effizienz 15 %)	356,20	368,46	48,36	-	676,30
Transport	290,90	368,46	48,19	1,57	609,60

*Die Verbrennung der VOC wird nicht in die Bilanzierung eingeschlossen (Tatsächliche Verwertungswege unklar, Energiegewinn gering und für beide Verfahrenstypen gleich).

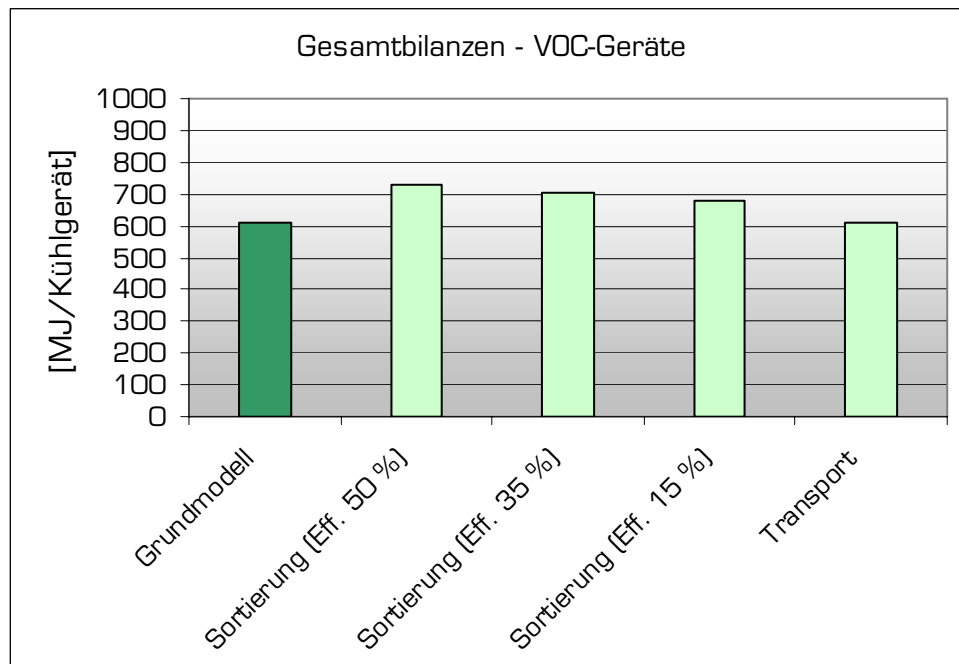


Abbildung 4-4: Erzielter Energiegewinn der Verfahrensmodelle des ST-Typs für VOC-Geräte

Die Ergebnisse aus Abbildung 4-4 für die verschiedenen Verfahrensmodelle ähneln, relativ zueinander, denen für FCKW-Kühlgeräte. Der Effekt der Metallrückgewinnung ist hier aufgrund der geänderten Zusammensetzung etwas geringer, spielt aber trotzdem eine große Rolle. Die thermische Verwertung der Kunststoffe rückt etwas stärker in den Vordergrund, dadurch sind auch die Differenzen zwischen den Bilanzierungsergebnissen der einzelnen Modelle weniger ausgeprägt als bei den Behandlungsmodellen von FCKW-Kühlgeräten.

4.1.2 Emissionen aus den einzelnen Behandlungsverfahren

Die verschiedenen Behandlungsmodelle unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Emissionen. Die Betrachtung der Emissionen erfolgt zuerst jeweils für die Grundmodelle der beiden Verfahrenstypen und wird dann auch für die einzelnen Modellvarianten vorgenommen. Da die Emissionen bei der Behandlung von FCKW-Kühlgeräten und VOC-Kühlgeräten unterschiedlich sind, erfolgt für diese ebenfalls eine getrennte Bilanzierung. Die direkten VOC-Emissionen werden in dieser Studie nicht betrachtet, da deren Treibhauspotential ohnehin gering ist und selbst bei Freilassung sämtlicher VOC aus der zweiten Behandlungsstufe davon auszugehen ist, dass dadurch nur ein sehr geringer Anstieg bei den gesamten nationalen VOC-Emissionen zu verzeichnen wäre².

4.1.2.1 CO₂

Die Bilanzierung der Kohlendioxid-Emissionen erfolgt gemeinsam für die Vorkette der eingesparten bzw. verbrauchten Güter und für die direkten Emissionen aus dem jeweiligen Verfahren. Die Ermittlung der CO₂-Bilanzen erfolgt damit nach dem gleichen Prinzip wie die Ermittlung der Energiebilanzen in Kapitel 4.1.1.

Die CO₂-Emissionen die im Zuge der Bereitstellung eines Produktes auftreten sind in Tabelle 9-2 zusammengestellt. Der Ausstoß an CO₂ aufgrund der Verbrennung von Kunststoffen bzw. Heizöl findet sich in Tabelle 9-3.

4.1.2.1.1 FCKW-Kühlgeräte

Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung

Grundmodell:

Die Bilanzierung hinsichtlich der CO₂-Emissionen des Grundmodells der Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung ist in den folgenden Tabellen angeführt. Einsparungen beim Ausstoß an CO₂ ergeben sich einerseits aufgrund der stofflichen Verwertung von Outputmaterialien und andererseits aufgrund der Nutzung der freigesetzten Energie aus thermischen Prozessen.

In Tabelle 4-12 ist die CO₂-Einsparung aufgrund der stofflichen Verwertung verschiedener Fraktionen aufgelistet. Holz wird dabei als CO₂-neutral angesetzt, da bei der Verbrennung von Holz so viel CO₂ freigesetzt wird, wie vorher in der Biomasse gebunden wurde.

² In Hornberger et al., (2005) wird der Gesamtanstieg der VOC-Emissionen in Deutschland bei vollständiger Freilassung der VOC aus der zweiten Behandlungsstufe (VOC in der Isolierung) von VOC-Kühlgeräten mit 0,003% angegeben. Wenn ausschließlich VOC-Kühlgeräte zur Behandlung anfallen würden, würde sich dieser Anteil auf 0,03 % erhöhen.

Tabelle 4-12: CO₂-Einsparung durch stoffliche Verwertung beim Grundmodell des WS-Typs

stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung CO ₂	CO ₂ [kg/kg]	CO ₂ [kg/KG]
Flachglas	2,17	0,89	20 % bei Flachglasherstellung*	0,21	0,19
Öl**	0,64	0,26			-
PUR	9,92	4,07	Holzmehl	0	0
Fe-Fraktion	60,23	24,69	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	1,09	26,81
Kupfer	2,89	1,18	Cu _{prim} - Cu _{sek}	3,68	4,36
Aluminium	5,50	2,25	Al _{prim} - Al _{sek}	10,79	24,33
Polystyrol	7,03	2,88	Schnittholz (geh.)	0	0
Summe					55,69

*Die 20 %ige Kohlendioxideinsparung durch den Einsatz von Altglasscherben bei der Flachglasherstellung stellt eine Schätzung dar.
 **Die Verwertung des Kälteöls bleibt unberücksichtigt.

Tabelle 4-13 zeigt die Einsparung an CO₂ durch die thermische Verwertung der angeführten Fraktionen. Es werden dabei nicht nur die CO₂-Emissionen, die bei der Verbrennung von Heizöl entstehen würden eingespart, sondern auch die Emissionen, die bei der Bereitstellung des Heizöls auftreten würden.

Tabelle 4-13: CO₂-Einsparung durch therm. Verwertung beim Grundmodell des WS-Typs

therm. Verwertung	[%]	kg/KG	kg KS / kg Öl*	CO ₂ [kg/kg]	CO ₂ -Vorkette-Öl [kg/KG]	CO ₂ [kg/KG]
Polystyrol	7,03	2,88	1,24	3,079	1,00	8,16
Kunststoffe-Industrie.	1,77	0,73	1,01	3,079	0,31	2,52
Kunststoffe.-MVA	6,49	2,66	1,64	3,079	0,70	5,70
PUR-Ölbindemittel	9,92	4,07	2,75	3,079	0,63	5,19
Summe						21,56

*Die Ermittlung des Umrechnungsfaktors von Kunststoffen auf Öl erfolgt wieder hinsichtlich Nutzengleichheit, siehe dazu die Erläuterungen zu Tabelle 4-2.

Die industriell verwertbaren Säuren, die als Endprodukte bei der Hochtemperaturspaltung erzeugt werden, führen ebenfalls zu einer Minderung der CO₂-Emissionen. Da die Werte für Flusssäure negativ sind (Begründung siehe Erläuterungen zu Tabelle 4-3), werden diese auch in Tabelle 4-14 gleich Null gesetzt.

Tabelle 4-14: CO₂-Einsparung durch Spaltprodukte aus der FCKW-Vernichtung beim Grundmodell des WS-Typs

FCKW-Spaltprodukte	kg/kg FCKW	kg/Kühlgerät	CO ₂ [kg/kg]	CO ₂ [kg/KG]
HF	0,33	0,12	0,00*	0,00
HCl	0,61	0,22	1,18	0,26
Summe				0,26

*Der CO₂-Ausstoß wird auf Null gesetzt, da eine Bestrafung für die Bereitstellung eines Produktes nicht gerechtfertigt erscheint.

Die Einsparungen an CO₂-Emissionen betragen für dieses Verfahrensmodell somit 77,51 kg CO₂ pro Kühlgerät.

Die Kohlendioxid-Emissionen können grundsätzlich in zwei Teile gegliedert werden. Bei den Verbrennungsprozessen kommt es zu einem direkten Ausstoß an CO₂ (Tabelle 4-15) und durch den Verbrauch an Energie und Hilfsmaterialien müssen indirekte CO₂-Emissionen (Tabelle 4-16), die im Zuge der Bereitstellung dieser Güter auftreten, berücksichtigt werden.

Tabelle 4-15: Direkter Ausstoß an CO₂ im Zuge des Grundmodells des WS-Typs

Direkt (Verbrennung)	[%]	kg/Kühlgerät	CO ₂ [kg/kg]	CO ₂ [kg/KG]
Polystyrol	7,03	2,88	3,35	9,64
Kunststoffe-Industrie.	1,77	0,73	3,00	2,18
Kunststoffe.-MVA	6,49	2,66	3,00	7,98
PUR-Ölbindemittel	9,92	4,07	0,74	3,01
FCKW-Spaltung	0,89	0,36	0,36	0,13
Summe				22,94

Anmerkung: Die Grundlagen zu dieser Aufstellung finden sich in Tabelle 9-3 und in Tabelle 9-5.

Tabelle 4-16: Indirekte CO₂-Emissionen beim Grundmodell des WS-Typs

Indirekt (Energie)	Energiebedarf [MJ/KG]	CO ₂ [kg/MJ]	CO ₂ [kg/KG]
Energiebedarf - Strom	22,0	0,17	3,74
Energiebedarf - Wärme (Gas)	11,5	0,062	0,71
Summe			4,45
Indirekt (Hilfsmittel)	kg/Kühlgerät	CO ₂ [kg/kg]	CO ₂ [kg/KG]
O ₂	0,14	0,0681	0,01
H ₂	0,01	8,30	0,08
Summe			0,09



Gemeinsam betragen die direkten und indirekten Kohlendioxid-Emissionen dieses Modells 27,48 kg CO₂ pro Kühlgerät.

Die CO₂-Bilanz für das Grundmodell der Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung ergibt somit eine CO₂-Einsparung von 50 kg CO₂ pro Kühlgerät.

Modellvarianten:

Die Darstellung der Bilanzierungsergebnisse erfolgt in Tabelle 4-17 nur zusammenfassend, die Teile der Bilanzierung, die sich vom Grundmodell unterscheiden, sind im Anhang in Tabelle 9-13 angeführt. Die Varianten „Geringere Sortiereffizienz (Verbrennung des Polystyrols)“ und „Verbrennung des PUR-Mehls“ unterscheiden sich hinsichtlich der CO₂-Emissionen nicht vom Grundmodell und sind daher in der folgenden Tabelle nicht angeführt.

Tabelle 4-17: CO₂-Bilanzierungsergebnisse für die Modellvarianten des WS-Typs

Varianten	CO ₂ -Einsparung			CO ₂ -Ausstoß			Gesamt
	Angaben in kg CO ₂ / Kühlgerät	Stoffliche Verwertung	Therm. Verwertung	FCKW-Spaltprodukte	Direkt	Indirekt	
Cryokondensation	55,69	21,56	0,26	22,94	4,97		49,60
PUR+Fremdstoffe	48,94	21,56	0,26	22,94	4,54		43,28
Transport	55,69	21,56	0,26	22,94	4,54	1,28	48,75
PS-Mitverbrennung	55,69	23,32	0,26	22,94	4,54		51,79

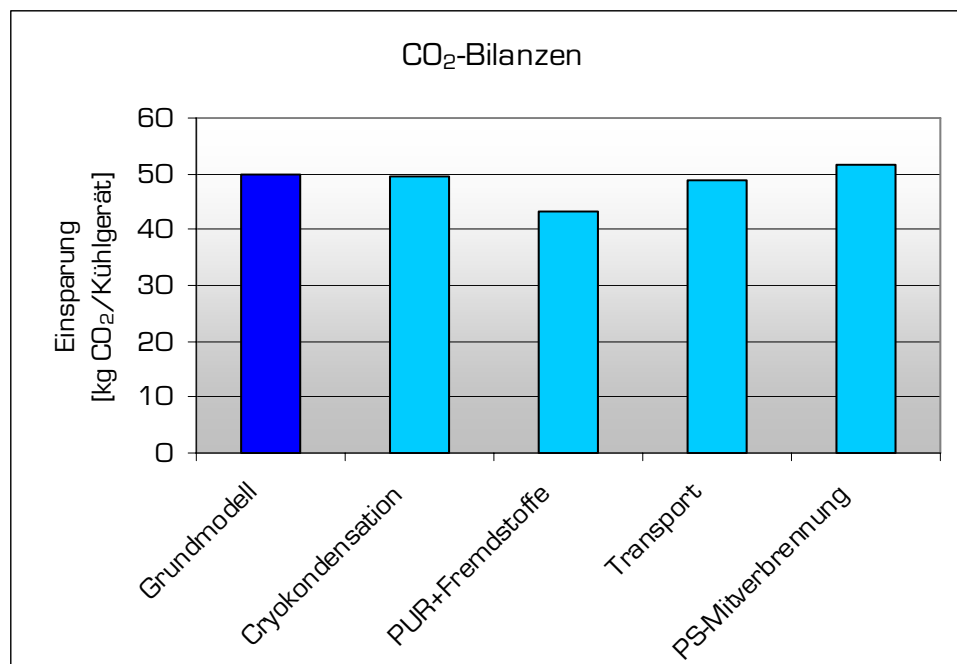


Abbildung 4-5: Reduktion der CO₂-Emissionen durch die Behandlung eines FCKW- Kühlgerätes nach den Modellen des WS-Typs

Die Ergebnisse der CO₂-Bilanz ähneln den Bilanzierungen für den KEA. Durch alle Behandlungsmodelle kommt es zu einer Einsparung an CO₂-Emissionen, wobei die größten Einsparungen wieder durch die Variante „PS-Mitverbrennung“ erzielt werden können (siehe Abbildung 4-5).

Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung

Grundmodell:

Die Bilanzierung der Kohlendioxid-Emissionen ist in Tabelle 4-18 für das Grundmodell der Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung angeführt. Die gesamte Verminderung der Kohlendioxid-Emissionen aufgrund der Verwertung der verschiedenen Fraktionen beträgt 54,24 kg CO₂ pro Kühlgerät. Der Kohlendioxidausstoß aufgrund dieses Behandlungsmodells (direkt und indirekt) beläuft sich laut Tabelle 4-18 auf 25,62 kg CO₂ pro Kühlgerät. Insgesamt ergibt sich daher eine Einsparung an CO₂-Emissionen in der Höhe von 28,6 kg CO₂ pro Kühlgerät.

Tabelle 4-18: CO₂-Bilanz für das Grundmodell des ST-Typs

CO ₂ -Einsparung					
stoffliche Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung CO ₂	CO ₂ [kg/kg]	CO ₂ [kg/KG]
Flachglas	2,17	0,89	20 % bei Flachglasherstellung *	0,21	0,19
Öl**	0,64	0,26			-
Fe-Fraktion (verwertet)	49,21	20,17	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	1,09	21,90
Fe-Fraktion (nicht vw.)	11,02	4,52	keine		
Kupfer	2,89	1,18	Cu _{prim} - Cu _{sek}	3,68	4,36
Aluminium (verwertet)	2,01	0,83	Al _{prim} - Al _{sek}	10,79	8,91
Aluminium (nicht vw.)	3,49	1,42	keine		
Summe					35,36

*Die 20 %ige Kohlendioxideinsparung durch den Einsatz von Altglasscherben bei der Flachglasherstellung stellt eine Schätzung dar.

**Die Verwertung des Kälteöls bleibt unberücksichtigt.



Fortsetzung Tabelle 4-18:

therm. Verwertung	[%]	kg/KG	kg KS / kg Öl*	CO ₂ [kg/kg]	CO ₂ -Vorkette-Öl [kg/KG]	CO ₂ [kg/KG]
Kunststoffe-Gehäuse	7,76	3,18	1,94	3,079	0,71	5,77
Kunststoffe-Demontage	7,54	3,09	1,38	3,079	0,96	7,84
PUR-Isolierung	9,92	4,07	2,75	3,079	0,63	5,19
Summe						18,80

*Die Ermittlung des Umrechnungsfaktors von Kunststoffen auf Öl erfolgt wieder hinsichtlich Nutzengleichheit, siehe dazu die Erläuterungen zu Tabelle 4-2.

FCKW-Spaltprodukte	kg/kg FCKW	kg/Kühlgerät	CO ₂ [kg/kg]	CO ₂ [kg/KG]
HF*	0,33	0,04	0,00	0,00
HCl	0,61	0,07	1,18	0,08
Summe				0,08

*KEA von HF wird gleich Null gesetzt.

CO₂-Ausstoß

Direkt (Verbrennung)	[%]	kg/Kühlgerät	CO ₂ [kg/kg]	CO ₂ [kg/KG]
Kunststoffe	15,3	6,27	3,16	19,81
PUR-Isolierung	9,92	4,07	0,74	3,01
FCKW-Spaltung	0,89	0,36	0,36	0,04
Summe				22,86

Anmerkung: Die Grundlagen zu dieser Aufstellung finden sich in Tabelle 9-3 und in Tabelle 9-5.

Indirekt (Energie)	Energiebedarf [MJ/KG]	CO ₂ [kg/MJ]	CO ₂ [kg/KG]
Energiebedarf - Strom	16,22	0,17	2,76
Summe			2,76
Indirekt (Hilfsmittel)	kg/Kühlgerät	CO ₂ [kg/kg]	CO ₂ [kg/KG]
O ₂	0,04	0,0681	0,00
H ₂	0,00	8,30	0,00
Summe			0,00

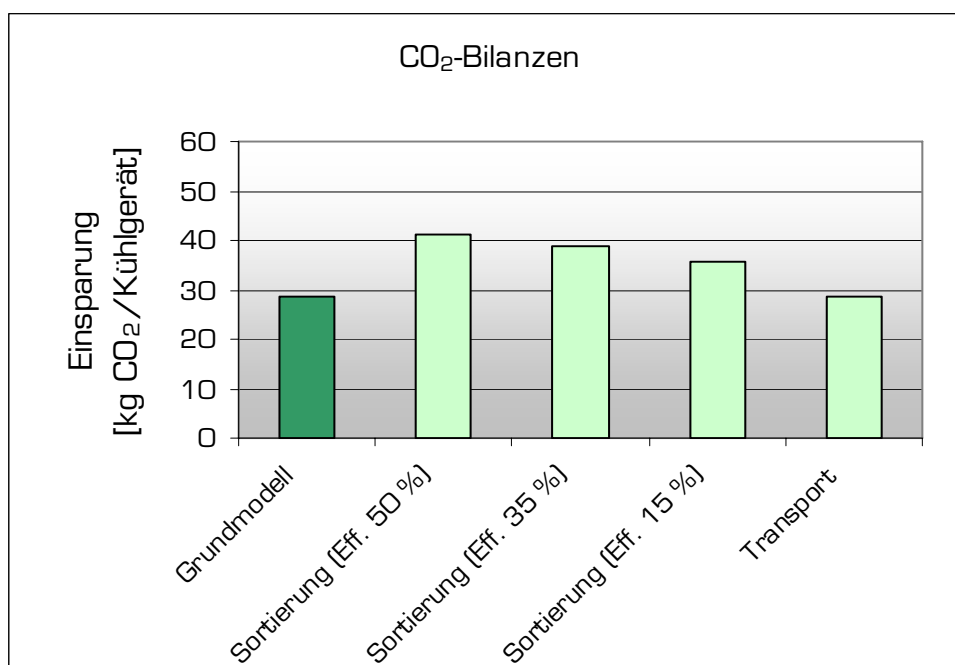
Modellvarianten:

In Tabelle 4-19 sind die Ergebnisse der Kohlendioxid-Bilanzierung für die Varianten des Grundmodells der Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung angeführt, eine Darstellung der vom Grundmodell abweichenden Bilanzierungsteile findet sich in Tabelle 9-14.

Tabelle 4-19: CO₂-Bilanzierungsergebnisse für die Modellvarianten des ST-Typs

Varianten	CO ₂ -Einsparung			CO ₂ -Ausstoß			Gesamt
	Angaben in kg CO ₂ pro Kühlgerät	Stoffliche Verwertung	Therm. Verwertung	FCKW-Spaltprodukte	Direkt	Indirekt	
Sortierung (50 %)	48,08	18,80	0,08	22,86	2,77		41,33
Sortierung (35 %)	45,71	18,80	0,08	22,86	2,77		38,95
Sortierung (15 %)	42,58	18,80	0,08	22,86	2,77		35,82
Transport	35,36	18,80	0,08	22,86	2,76	0,16	28,45

Die Reduktion an CO₂-Emissionen durch die Verfahrensmodelle des ST-Typs zeigt auch hier ein relativ ähnliches Bild (Abbildung 4-6) wie bei der Ermittlung des Energiegewinns (Abbildung 4-2). Die größten Einsparungen werden eindeutig wieder von den Modellen erzielt, die eine effizientere Metallabscheidung besitzen.


Abbildung 4-6: Reduktion der CO₂-Emissionen durch die Behandlung eines FCKW- Kühlgerätes nach den Modellen des ST-Typs

4.1.2.1.2 VOC-Kühlgeräte

Die CO₂-Bilanzierung für die Behandlung von VOC-Kühlgeräten erfolgt nach dem gleichen Muster wie für FCKW-Kühlgeräte, deswegen werden nachfolgend nur die Ergebnistabellen für die jeweiligen Modelle dargestellt.

Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung

In Tabelle 4-20 sind die Kohlendioxid-Bilanzen der verschiedenen Modelle dieses Typs zusammengefasst. Die Bilanzierung des Grundmodells und die von diesem



abweichenden Bilanzteile der Varianten finden sich im Anhang in Tabelle 9-32 bzw. in Tabelle 9-33.

Tabelle 4-20: CO₂-Bilanzierungsergebnisse für die Modelle des WS-Typs für VOC-Geräte

Modelle	CO ₂ -Einsparung		CO ₂ -Ausstoß			Gesamt
	Stoffliche Verwertung	Therm. Verwertung	Direkt	Indirekt	Sonstige	
Angaben in kg CO ₂ pro Kühlgerät						
Grundmodell	41,39	32,80	37,97	4,39		31,83
Cryokondensation	41,39	32,80	37,97	4,87		31,35
PUR+Fremdstoffe	36,38	32,80	37,97	4,39		26,82
Transport	41,39	32,80	37,97	4,39	1,23	30,60
PS-Mitverbrennung	41,39	35,88	37,97	4,39		34,91

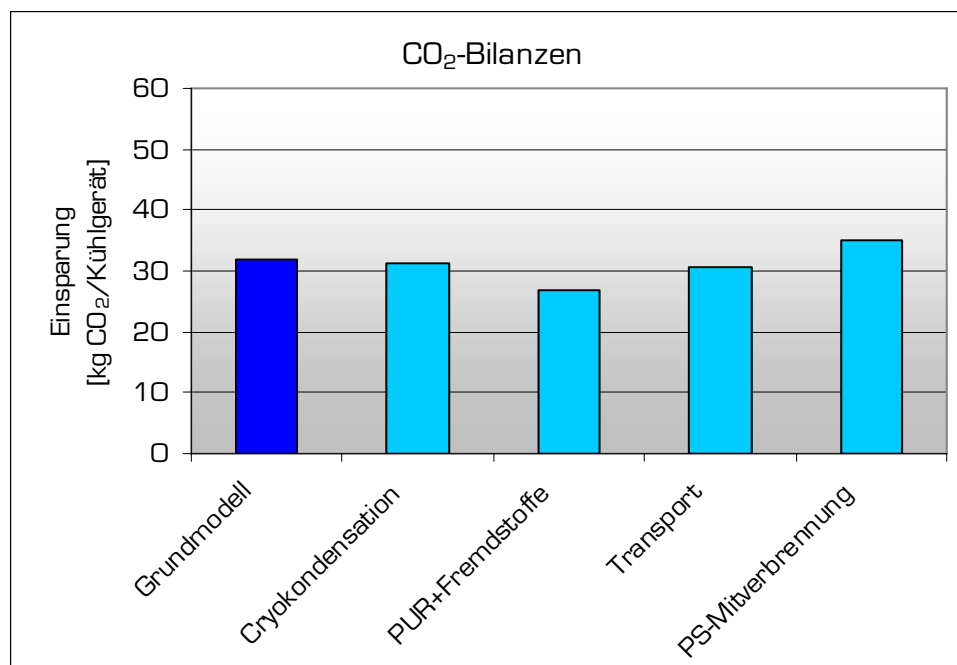


Abbildung 4-7: CO₂-Einsparung der verschiedenen Modelle des WS-Typs für VOC-Geräte

Für die Behandlung von VOC-Kühlgeräten zeigt sich in Abbildung 4-7, dass die CO₂-Einsparung für alle Modelle geringer ausfällt als bei der Behandlung von FCKW-Kühlgeräten. Der Grund dafür ist zum Teil wieder die unterschiedliche Materialzusammensetzung dieser Geräte. Der höhere Kunststoffanteil der VOC-Geräte bewirkt auch die höhere Einsparung an CO₂-Emissionen durch die Variante „PS-Mitverbrennung“. Außerdem wird Holz (Ersatzprodukt bei stofflicher Verwertung des Polystyrols) als CO₂-neutral betrachtet, dadurch sind die Einsparungen bei einer energetischen Verwertung des Polystyrols im Vergleich mit der stofflichen noch größer.

Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung

Für die Verfahrensmodelle dieses Typs sind die Ergebnisse der Kohlendioxidbilanzierung in Tabelle 4-21 aufgelistet. Die gesamte Bilanzierung des Grundmodells findet sich in Tabelle 9-34, die abweichenden Bilanzteile der Varianten sind in Tabelle 9-35 angeführt.

Tabelle 4-21: CO₂-Bilanzierungsergebnisse für die Modelle des ST-Typs für VOC-Geräte

Modelle	CO ₂ -Einsparung		CO ₂ -Ausstoß			Gesamt
	Stoffliche Verwertung	Therm. Verwertung	Direkt	Indirekt	Sonstige	
Angaben in kg CO ₂ pro Kühlgerät						
Grundmodell	27,42	28,01	37,97	2,74		14,72
Sortierung (50 %)	36,74	28,01	37,97	2,75		24,03
Sortierung (35 %)	35,37	28,01	37,97	2,75		22,66
Sortierung (15 %)	33,51	28,01	37,97	2,75		20,80
Transport	27,42	28,01	37,97	2,74	0,12	14,60

In Abbildung 4-8 sind die CO₂-Einsparungen durch die Behandlung eines VOC-Gerätes nach den jeweiligen Modellen des Verfahrenstyps mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung angeführt.

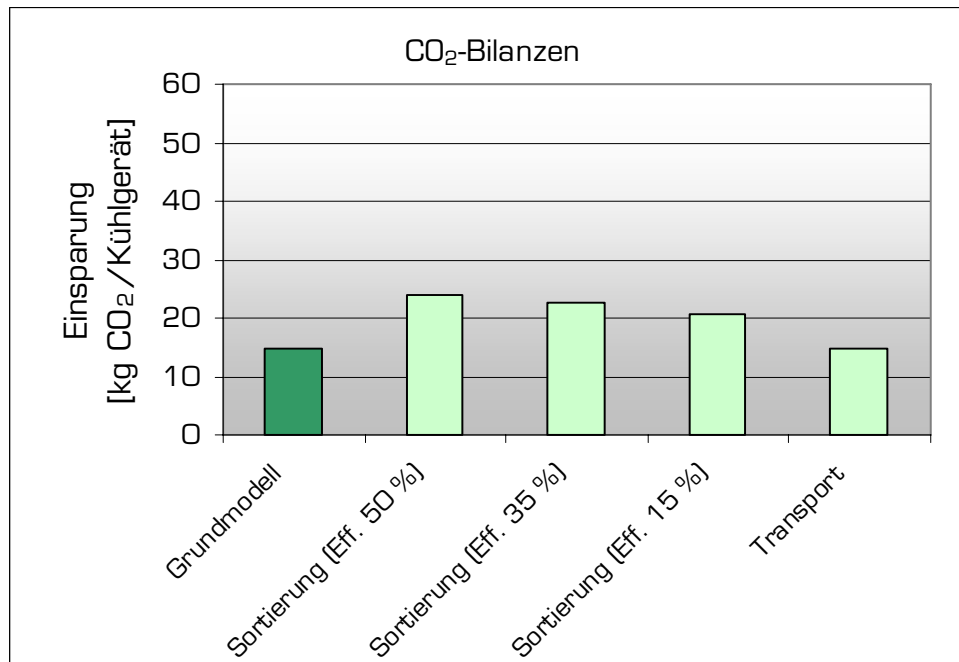


Abbildung 4-8: CO₂-Einsparung der verschiedenen Modelle des ST-Typs für VOC-Geräte

Die geringere Einsparung an CO₂-Emissionen bei der Behandlung von VOC-Kühlgeräten begründet sich auch hier mit der geänderten Materialzusammensetzung gegenüber FCKW-Geräten.



4.1.2.2 FCKW

Die Betrachtung der FCKW-Emissionen erfolgt anhand verschiedener Szenarien. Da FCKW-Emissionen in der Vorkette eingesparter Güter entweder nicht vorhanden oder vernachlässigbar gering sind, werden nur Emissionen berücksichtigt, die direkt im Zuge der jeweiligen Behandlungsverfahren auftreten.

Unsicherheiten werden über die Betrachtung unterschiedlicher Szenarien berücksichtigt, anhand dieser Szenarien werden die plausibelsten Annahmen bestimmt und für die weitere Verfahrensdarstellung herangezogen.

Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung

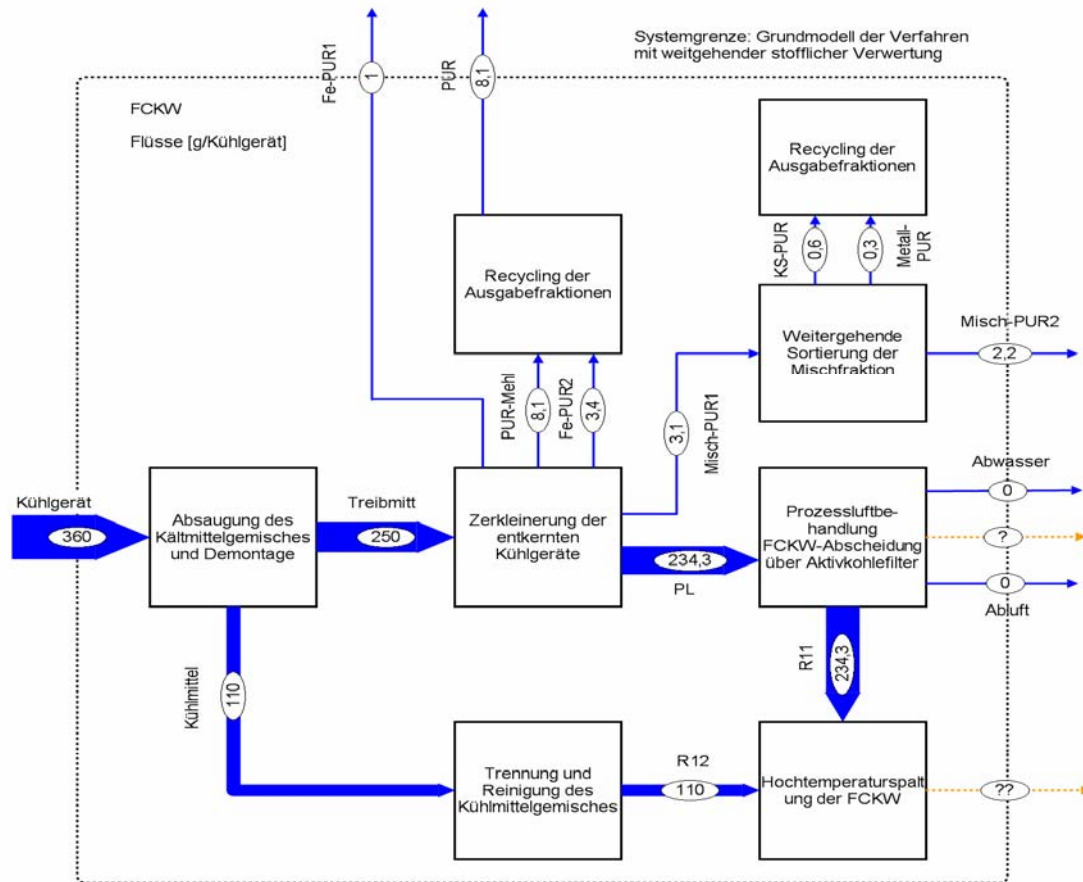
Grundmodell:

Für das Grundmodell sind die verschiedenen betrachteten Szenarien zur Freisetzung der FCKW aus den behandelten Kühlgeräten in Tabelle 4-22 dargestellt. Für die Abschätzung und Darstellung der FCKW-Emissionen wird Szenario 1 verwendet. Eine praktisch vollständige Freisetzung der im PUR-Mehl enthaltenen Restmengen an FCKW ist anzunehmen, da bereits nach 15 Tagen Lagerzeit weniger als 0,2 % des Anfangsgehaltes an FCKW im behandelten PUR-Mehl vorhanden sind (Technologisches Gewerbemuseum, 1993). Die Annahme geringerer FCKW-Emissionen aus der Fe-Fraktion (gegenüber Szenario 2) erscheint gerechtfertigt, da keine intensive Aufbereitung oder Nachbehandlung dieser Fraktion erfolgt und somit der Großteil der FCKW bei der Einschmelzung des Fe-Schrotts verbrannt wird. Die stärkere Freisetzung von FCKW aus der Kunststoff-Fe-NE-Mischfraktion ist aufgrund der intensiven Aufbereitung dieser Fraktion (hohe Sortiertiefe) sehr wahrscheinlich und somit als realistisch anzusehen. Die gesamten FCKW-Emissionen für dieses Modellszenario betragen 11,31 g pro Kühlgerät (siehe Tabelle 4-22). Da die Entwicklung der Szenarien vorwiegend auf Schätzungen beruht, erfolgt im Kapitel 4.2.3.1 eine Sensitivitätsanalyse der getroffenen Annahmen.

Tabelle 4-22: Szenarien zur FCKW-Freisetzung im Zuge des Grundmodells des WS-Typs

FCKW-Austrag	Minimum [g/Kühlgerät]	Maximum [g/Kühlgerät]	Szenario 1 [g/Kühlgerät]	Szenario 2 [g/Kühlgerät]
PUR-Mehl (Ölbindemittel)	4,05	8,10	8,10	8,10
Bemerkung	0,1 Gewichts% Rest-FCKW (techn. möglich lt. Land Steiermark, 2003)	0,2 Gewichts% der PUR-Fraktion sind Rest-FCKW (Aufbereitungsanforderung lt. RAL, 2003)		
Abluft	0,00	0,00	0,00	0,00
Bemerkung	Keine genauen Werte vorhanden, wahrscheinlich vernachlässigbar (Grenzwert TA Luft: 20 mg/m ³ Abluft)			
Abwasser	0,00	0,01	0,01	0,01
Bemerkung	10 mg FCKW/l Abwasser (Grenzwert lt. RAL, 2003) → Pro Kühlgerät fällt ca. 1 l Abwasser an (RAL, 2005).			
0,5 Gewichts%* PUR-Anhaftungen an Fe-Fraktion	0,00	4,46	1,03	1,71
Bemerkung	Keine FCKW vor Verarbeitung im Stahlwerk freigesetzt	Alle FCKW vor Verarbeitung im Stahlwerk freigesetzt	Bei der Verarbeitung im Stahlwerk befinden sich noch 50 % der FCKW im Isolierschaum	Bei der Verarbeitung im Stahlwerk befinden sich noch 40 % der FCKW im Isolierschaum
0,5 Gewichts%* PUR-Anteil in Kunststoff-Fe-NE- Misch-fraktion zur Sortierung	0,00	3,13	2,17	1,20
Bemerkung	Keine FCKW vor Verwertung der Kunststoffe freigesetzt	Alle FCKW vor Verwertung der Kunststoffe freigesetzt	bei Verwertung der KS-Fraktionen sind noch 20 % der FCKW im PUR gebunden	bei Verwertung der KS-Fraktionen sind noch 40 % der FCKW im PUR gebunden
SUMME [g]	4,05	15,70	11,31	11,02
*Aufbereitungsanforderung lt. RAL, 2003				
Annahmen: Es wird davon ausgegangen, dass keine nennenswerten FCKW-Emissionen aus dem gekapselten und abgesaugten Anlagenbereich auftreten. Durch die Zerkleinerung der PUR-Isolierung im Shredder werden 35 % der FCKW freigesetzt (Hug et al., 1995)				

In Abbildung 4-9 sind die FCKW-Flüsse für Szenario 1 dargestellt, die punktierten Flüsse sollen darauf hinweisen, dass bei diesen Prozessen evtl. FCKW-Verluste auftreten können, diese jedoch hier nicht berücksichtigt werden.



Annahmen:
 Es treten keine FCKW-Emissionen aus dem gekapselten Anlagenbereich auf.
 Die Emissionen über die gereinigte Abluft aus der Spaltung und der Prozessluftbehandlung sind vernachlässigbar.
 35 % der FCKW werden beim Zerkleinern im Shredder freigesetzt (S.EN.S., Boilerstudie 1995).
 Fraktionen:
 Fe-Shredder: 15 % der FCKW werden bis zur Einschmelzung im Stahlwerk freigesetzt.
 Fraktionen aus der Sortierung: 45 % der FCKW werden bis zur endgültigen Verwertung freigesetzt.
 PUR-Olbindemittel: Die gesamten FCKW-Restanhaftungen (0,2 Gewichts%; RAL Gütekriterium) werden freigesetzt.
 Insgesamt wird von PUR-Anhaftungen an den einzelnen Fraktionen von 0,5 Gewichts% ausgegangen (RAL Gütekriterium). Die FCKW-Menge pro kg PUR beträgt 0,085 kg.

Abbildung 4-9: FCKW-Flüsse für Szenario 1 des Grundmodells des WS-Typs

Modellvarianten:

In Tabelle 4-23 sind nur jene Varianten angeführt, deren FCKW-Emissionen sich von denen des Grundmodells unterscheiden. Eine detaillierte Darstellung der jeweils vom Grundmodell abweichenden FCKW-Emissionen findet sich in Tabelle 9-15.

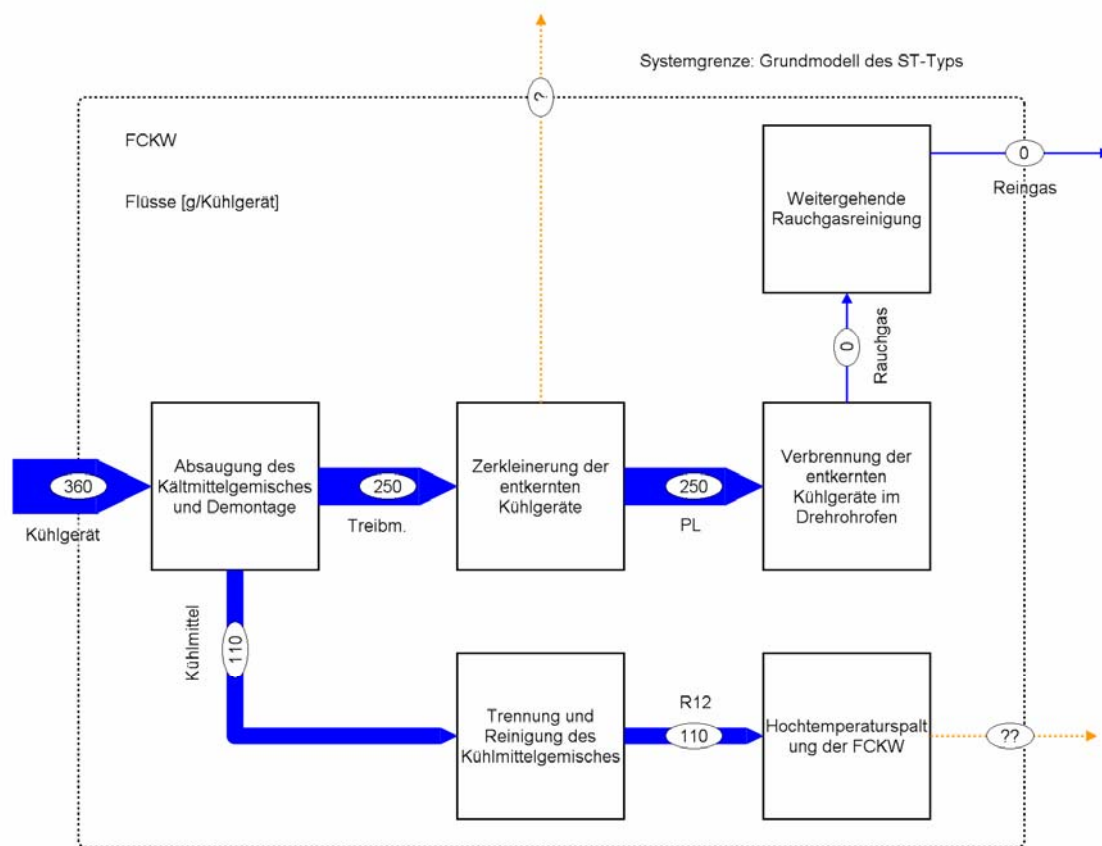
Tabelle 4-23: Gesamte FCKW-Emissionen der Modellvarianten des WS-Typs

FCKW-Austrag der Verfahrensmodelle	Maximum [g/Kühlgerät]	Minimum [g/Kühlgerät]	Szenario 1 [g/Kühlgerät]	Szenario 2 [g/Kühlgerät]
PUR+Restanhaftungen	18,06	8,39	17,16	17,44
PUR-Verbrennung	15,70	2,03	8,72	11,18

Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung

Grundmodell:

Trifft man für diesen Verfahrenstyp die gleichen Annahmen wie für die Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung (keine Verluste aus dem eingekapselten Anlagenbereich), so ergeben sich keine direkten FCKW-Emissionen aufgrund des Behandlungsverfahrens. Im Rauchgas aus der Drehrohrfeuerung sind keine messbaren FCKW-Konzentrationen mehr feststellbar, das wurde durch Messungen an der Anlage der Fernwärme Wien bestätigt (Institut für Umweltanalytik und Anlagenmesstechnik, 1995).



Annahmen:
Die FCKW-Emissionen über die gereinigte Abluft aus der Spaltung und der Drehrohrfeuerung sind vernachlässigbar.
Fraktionen:
Reinigungsleistung der Rauchgaswäsche für HCl 99,5 % und für HF 98 % (erste Abschätzung).
Außer den FCKW-Emissionen aufgrund eines unvorhergesehenen Anlagenstillstandes, treten keine Emissionen aus dem gekapselten Anlagenbereich auf.

Abbildung 4-10: FCKW-Flüsse für das Grundmodell des ST-Typs



Modellvarianten:

Die in 3.3.2.2 beschriebenen Varianten des Grundmodells weisen die gleichen FCKW-Emissionen wie dieses auf. Da es bei einem außerplanmäßigen Stillstand der Drehrohrfeuerung zu einer direkten Freisetzung von FCKW in die Atmosphäre kommen kann, soll dieses Szenario hier betrachtet werden. Laut Auskunft der Fernwärme Wien (Fernwärme Wien, 2006) tritt ein solcher Stillstand im Jahr max. für eine halbe Stunde auf. Unter der Annahme, dass zum Zeitpunkt des Stillstandes gerade Kühlgeräte behandelt werden, kann das zu einem maximalen FCKW-Ausstoß von 0,18 g/Kühlgerät (Emissionen aufgeteilt auf die Gesamtmenge an behandelten Kühlgeräten pro Jahr) führen. Für diesen Verfahrenstyp werden somit maximal 0,18 g FCKW pro Kühlgerät in die Atmosphäre freigesetzt.

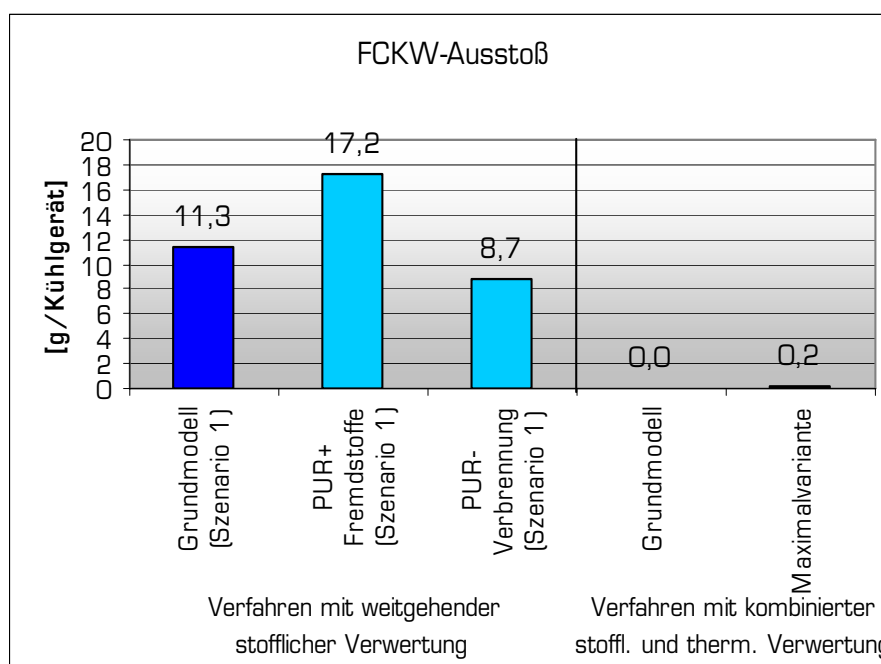


Abbildung 4-11: FCKW-Bilanzen für die ausgewählten Modelle der beiden Verfahrenstypen

Aus Abbildung 4-11 wird deutlich, dass sich die FCKW-Freisetzung in die Atmosphäre für die beiden Verfahrenstypen um ca. 2 Größenordnungen unterscheidet. Der Grund dafür sind in erster Linie die FCKW-Emissionen aus dem ausgetragenen PUR-Mehl. Die Rest-FCKW im Ölbindemittel emittieren vollständig in die Atmosphäre und machen so den Großteil der abgegebenen FCKW-Menge aus. Unterbindet man diesen Fluss, so ließen sich die FCKW-Emissionen des Verfahrens mit weitgehender stofflicher Verwertung um eine Größenordnung senken.

4.1.2.3 HCl (Chlorwasserstoff)

Die Bilanzierung der HCl-Emissionen erfolgt sowohl direkt als auch indirekt für die Bereitstellung der verschiedenen Güter.

4.1.2.3.1 FCKW-Kühlgeräte

Eine Bilanzierung der HCl-Emissionen erfolgt einerseits für die direkten Emissionen aufgrund der Verbrennung von FCKW aus der Isolierung und andererseits für alle anderen im Zuge des Verfahrens direkt oder indirekt auftretenden bzw. eingesparten HCl-Emissionen.

Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung

Als erstes wird der HCl-Ausstoß aufgrund der Verbrennung von FCKW aus der PUR-Isolierung ermittelt, diese Berechnung stützt sich auf die Szenarien und Annahmen hinsichtlich des FCKW-Ausstoßes aus Tabelle 4-22. In Tabelle 4-24 ist die HCl-Freisetzung in die Atmosphäre für die einzelnen Modellverfahren dieses Typs und die verschiedenen Szenarien dargestellt. Varianten, die sich bei diesen HCl-Emissionen nicht vom Grundmodell unterscheiden sind in der Ergebnistabelle nicht angeführt. Die Berechnung für die einzelnen Modelle und Szenarien findet sich im Anhang in Tabelle 9-16 (Grundmodell) und Tabelle 9-17 (Modellvarianten).

Tabelle 4-24: HCl-Freisetzung aufgrund der Verbrennung von FCKW-haltigem PUR-Schaum für die Verfahrensmodelle des WS-Typs

HCl-Emissionen (Reingas) aus FCKW-Verbrennung	Maximum* [g/Kühlgerät]	Minimum* [g/Kühlgerät]	Szenario 1* [g/Kühlgerät]	Szenario 2* [g/Kühlgerät]
Grundmodell	0,00	4,45	3,00	2,74
PUR+Fremdstoffe	0,00	0,74	0,50	0,45
PUR-Verbrennung	0,00	4,46	3,01	2,75

* Szenarien entsprechen denen für FCKW-Freisetzung (Tabelle 4-22).

Als Nächstes erfolgt die Bilanzierung der HCl-Emissionen für das Behandlungsverfahren an sich. Die Erstellung dieser Bilanz erfolgt wieder durch eine Gegenüberstellung der eingesparten HCl-Emissionen mit den durch das Verfahren verursachten Emissionen. Die Ergebnisse der Bilanzierung sind aus Tabelle 4-25 ersichtlich, eine ausführlichere Darstellung der HCl-Bilanzierung für die verschiedenen Modelle findet sich im Anhang in Tabelle 9-18 (Grundmodell) und in Tabelle 9-19 (Varianten).



Tabelle 4-25: Ergebnisse der HCl-Bilanzierung für die Modelle des WS-Typs (ohne HCl aus FCKW-Verbrennung (Tabelle 4-24))

Varianten	HCl-Einsparung			HCl-Ausstoß			Gesamt Einsparung
	Angaben in g HCl / Kühlgerät	Stoffliche Verwertung	Therm. Verwertung	FCKW- Spaltprodukte	Direkt	Indirekt	
Grundmodell	1,405	0,084	0,019	0,198	0,111		1,199
Cryokondensation	1,405	0,084	0,019	0,198	0,143		1,167
PUR+Fremdstoffe	1,311	0,084	0,02	0,20	0,111		1,106
Transport	1,405	0,084	0,019	0,198	0,111	0,005	1,194
PS- Mitverbrennung	1,405	0,091	0,019	0,198	0,111		1,206

In Tabelle 4-26 sind die HCl-Emissionen der Modelle des Verfahrenstyps mit weitgehender stofflicher Verwertung zusammengefasst.

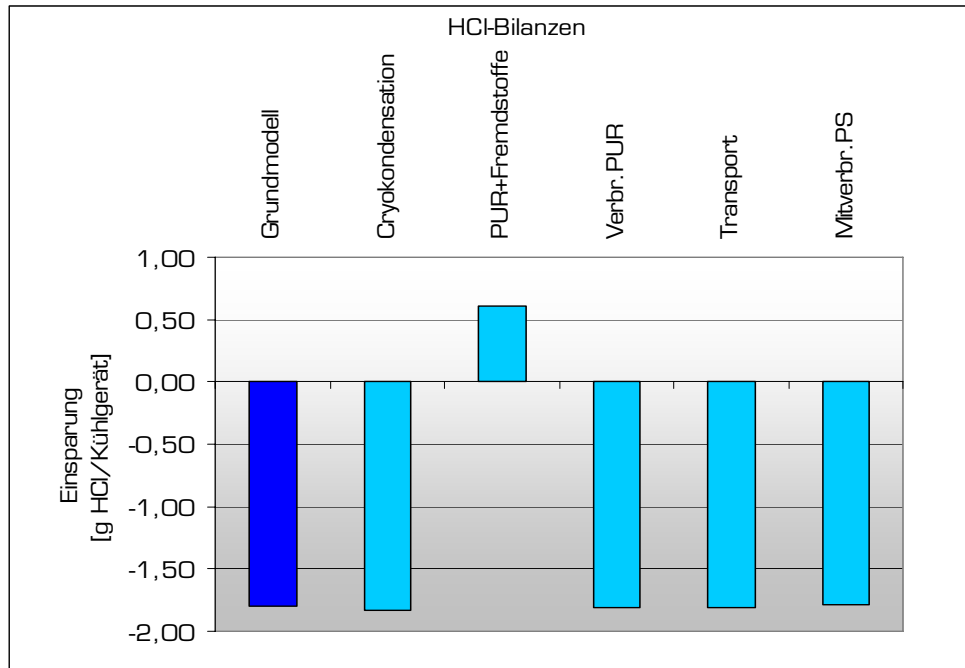
Tabelle 4-26: Gesamtbilanz für die HCl-Emissionen der Verfahrensmodelle des WS-Typs

Gesamt*	Maximum [g/Kühlgerät]	Minimum [g/Kühlgerät]	Szenario 1 [g/Kühlgerät]	Szenario 2 [g/Kühlgerät]
Grundmodell	1,20	-3,25	-1,80	-1,54
Cryokondensation	1,17	-3,28	-1,83	-1,57
PUR+Fremdstoffe	1,11	0,37	0,61	0,66
PUR-Verbrennung	1,20	-3,26	-1,81	-1,55
Transport	1,19	-3,26	-1,81	-1,55
PS-Mitverbrennung	1,21	-3,24	-1,79	-1,53

*Positive Werte bedeuten eine Einsparung an HCl-Emissionen und negative einen Ausstoß.

In Abbildung 4-12 sind die Gesamtergebnisse für die HCl-Bilanzierung dargestellt, es wird wiederum Szenario 1 als das realistischste angesehen und deshalb für die weiteren Betrachtungen herangezogen.

Die Bilanzierung der HCl-Emissionen zeigt für fast alle Modelle eine Freisetzung von HCl in die Atmosphäre (Abbildung 4-12). Nur für die Variante „PUR+Reststoffe“ ergibt sich eine Einsparung, was auf die effektivere Abtrennung des PUR von den Metallen zurückzuführen ist.



Anmerkung: Negative Werte bezeichnen einen HCl-Ausstoß für das Behandlungsmodell.

Abbildung 4-12: Gesamtemissionen an HCl für die Verfahrensmodelle des WS-Typs

Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung

Bei diesem Verfahrenstyp treten keine bzw. nur sehr geringe FCKW-Verluste auf. Es werden daher praktisch alle FCKW in der Isolierung im Drehrohrofen verbrannt und in HCl bzw. HF aufgespaltet. Die Effizienz der Rauchgasreinigung wird bei allen Verfahrensmodellen für HCl mit 99,5 % und für HF mit 98 % angesetzt, berechnet wurde diese Reinigungsleistung anhand von Durchschnittswerten aus der Literatur (Quelle für Rauchgas: di Chirico, 1996; Quelle für Reingas: Gebhardt, 2000).

Für diesen Verfahrenstyp ist es nicht notwendig Szenarien mit verschiedener FCKW-Freisetzung zu betrachten, da auch die Annahme der maximalen FCKW-Freisetzung keinen nennenswerten Einfluss auf die HCl- und HF-Emissionen hat. Die Bilanzierung der HCl-Emissionen erfolgt deshalb, nicht wie zuvor in zwei Schritten, sondern im Zuge einer Gegenüberstellung von Einsparung und Ausstoß.

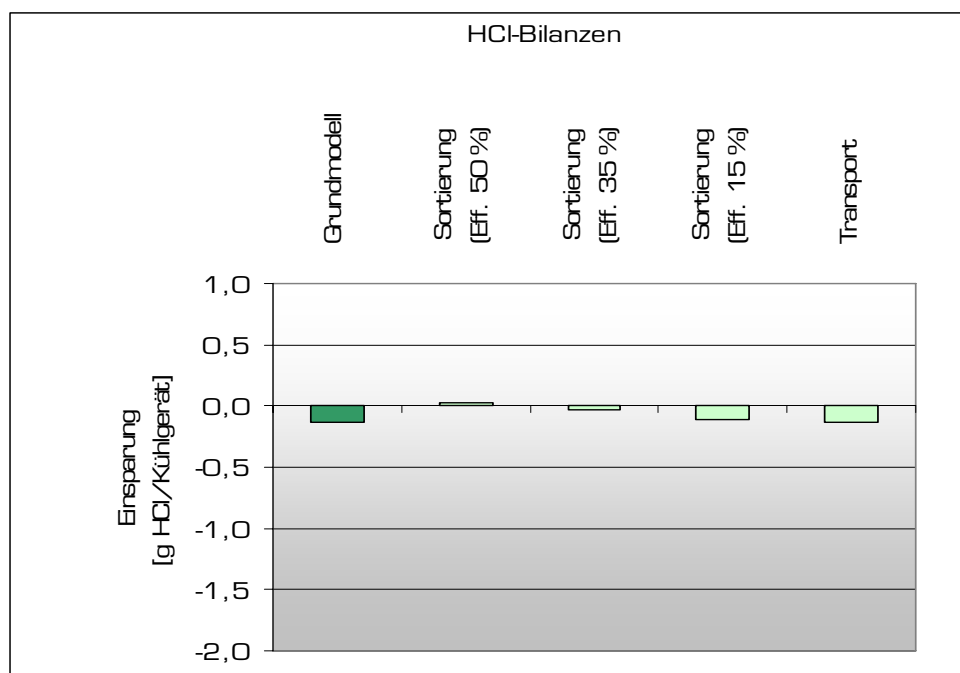
In Tabelle 4-27 sind die gesamten HCl-Emissionen für die Verfahrensmodelle des Typs mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung angeführt. Die Bilanzierung der einzelnen Modelle findet sich in Tabelle 9-20 (Grundmodell) und in Tabelle 9-21 (Modellvarianten).



Tabelle 4-27: Ergebnisse der Bilanzierung der HCl-Emissionen für die Verfahrensmodelle des ST-Typs

Varianten	HCl-Einsparung			HCl-Ausstoß			Gesamt Einsparung*	
	Angaben in g HCl / Kühlgerät	Stoffliche Verwertung	Therm. Verwertung	FCKW-Spaltprodukte	Direkt	Indirekt		Sonstige
Grundmodell		1,063	0,073	0,006	1,193	0,081		-0,132
Sortierung (50 %)		1,221	0,073	0,006	1,193	0,081		0,026
Sortierung (35 %)		1,164	0,073	0,006	1,193	0,081		-0,031
Sortierung (15 %)		1,089	0,073	0,006	1,193	0,081		-0,106
Transport		1,063	0,073	0,006	1,193	0,081	0,001	-0,133

*Positive Werte bedeuten eine Einsparung an HCl-Emissionen und negative einen Ausstoß.



Anmerkung: Negative Werte bezeichnen einen HCl-Ausstoß für das Behandlungsmodell.

Abbildung 4-13: Gesamtemissionen an HCl für die Verfahrensmodelle des ST-Typs

Die Verfahrensmodelle des Typs mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung rufen nur sehr geringe HCl-Emissionen hervor (Abbildung 4-13). Hier werden die gesamten FCKW in der PUR-Isolierung in der Drehrohrfeuerung verbrannt und die Abgase in einer weitergehenden Rauchgaswäsche behandelt, dadurch kommt es nur zu geringen direkten HCl-Emissionen.

4.1.2.3.2 VOC-Kühlgeräte

Bei der Behandlung von VOC-Kühlgeräten treten keine HCl-Emissionen aus der FCKW-Spaltung auf. Direkte HCl-Emissionen entstehen nur bei der Verbrennung von PVC in der Mischkunststofffraktion, ansonsten erfolgt eine Einsparung bzw. Ausstoß nur indirekt über die Vorkette der jeweiligen Güter bzw. Leistungen.

Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung

Die Bilanzierungen der HCl-Emissionen für die Verfahrensmodelle dieses Typs sind in Tabelle 4-28 dargestellt. Die ausführlichen Bilanzierungstabellen finden sich im Anhang in Tabelle 9-36 (Grundmodell) und in Tabelle 9-37 (Modellvarianten).

Tabelle 4-28: Bilanzierungsergebnisse für die HCl-Emissionen der Verfahrensmodelle des WS-Typs für VOC-Geräte

Modelle	HCl-Einsparung		HCl-Ausstoß			Gesamt Einsparung	
	Angaben in g HCl pro Kühlgerät	Stoffliche Verwertung	Therm. Verwertung	Direkt	Indirekt		Sonstige
Grundmodell		0,427	0,128	0,345	0,109		0,101
Cryokondensation		0,427	0,128	0,345	0,143		0,066
PUR+Fremdstoffe		0,384	0,128	0,345	0,109		0,058
Transport		0,427	0,128	0,345	0,109	0,005	0,096
PS-Mitverbrennung		0,427	0,143	0,345	0,109		0,116

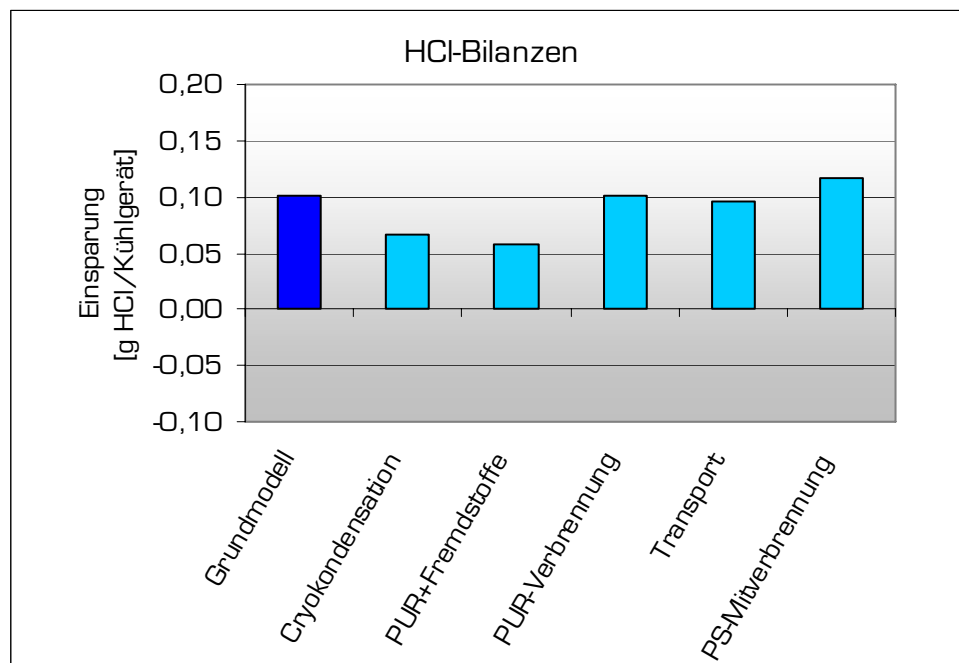


Abbildung 4-14: Gesamtemissionen an HCl für die Verfahrensmodelle des WS-Typs für VOC-Geräte



Aus Abbildung 4-14 lässt sich erkennen, dass für alle Behandlungsmodelle dieses Typs für VOC-Kühlgeräte eine Einsparung an HCl-Emissionen zu verzeichnen ist. Der Unterschied zu den Ergebnissen für die FCKW-Kühlgeräte gründet sich hauptsächlich darauf, dass es hier zu keiner Verbrennung von FCKW kommt und somit die dadurch hervorgerufene Freisetzung an HCl wegfällt.

Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung

Detaillierte Darstellungen der Bilanzierungen der HCl-Emissionen für die Behandlungsmodelle dieses Typs finden sich in Tabelle 9-38 (Grundmodell) und in Tabelle 9-39 (Modellvarianten). Die Ergebnisse der Bilanzierung sind aus Tabelle 4-29 ersichtlich.

Tabelle 4-29: Bilanzierungsergebnisse für die HCl-Emissionen der Verfahrensmodelle des ST-Typs für VOC-Geräte

Modelle	HCl-Einsparung		HCl-Ausstoß			Gesamt Ausstoß
	Stoffliche Verwertung	Therm. Verwertung	Direkt	Indirekt	Sonstige	
Angaben in g HCl pro Kühlgerät						
Grundmodell	0,231	0,109	0,345	0,081		0,085
Sortierung (50 %)	0,315	0,109	0,345	0,081		0,001
Sortierung (35 %)	0,282	0,109	0,345	0,081		0,034
Sortierung (15 %)	0,238	0,109	0,345	0,081		0,078
Transport	0,231	0,109	0,345	0,081	0,001	0,086

Bei der Behandlung von VOC-Kühlgeräten nach den Modellen des Typs mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung kommt es insgesamt zu einem Ausstoß an HCl (Abbildung 4-15). Zurückzuführen ist das auf den höheren Kunststoffanteil dieser Geräte, dieser führt zu vermehrten HCl-Emissionen im Zuge der Verbrennung von, in der Kunststofffraktion enthaltenen, PVC-Anteilen. Die HCl-Einsparungen durch die stoffliche Verwertung reichen hier nicht aus um eine positive Bilanz zu erzielen.

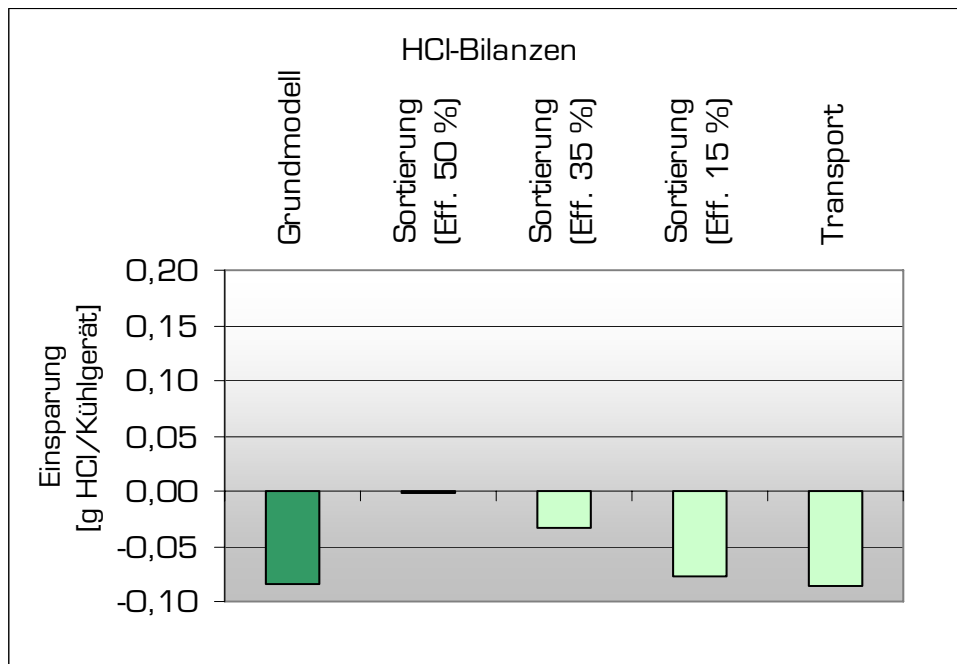


Abbildung 4-15: Gesamtemissionen an HCl für die Verfahrensmodelle des ST-Typs für VOC-Geräte

4.1.2.4 HF (Fluorwasserstoff)

4.1.2.4.1 FCKW-Kühlgeräte

Für die Kühlgeräte mit FCKW-haltigen Isolierungen erfolgt die Ermittlung der HF-Emissionen wieder in zwei Schritten. Zuerst wird die Freisetzung von HF aufgrund der Verbrennung von FCKW-Restanhaltungen in der PUR-Isolierung berechnet. Danach erfolgt die Bilanzierung der HF-Emissionen für alle anderen Verfahrensteile, welche entweder zu einem Ausstoß oder zu einer Einsparung an HF-Emissionen führen.

Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung

Für diesen Verfahrenstyp werden die HF-Emissionen bedingt durch Verbrennung von FCKW aus der Isolierung anhand verschiedener Szenarien betrachtet. Die Szenarien entsprechen denen für die FCKW-Freisetzung (siehe Tabelle 4-22), es sind also die gleichen die auch für die Ermittlung der HCl-Emissionen herangezogen wurden. Die Ermittlung der HF-Emissionen für das Grundmodell findet sich in Tabelle 9-16, für die Verfahrensvarianten, welche sich beim HF-Ausstoß vom Grundmodell unterscheiden, sind die Emissionen in Tabelle 9-17 dargestellt. Der gesamte HF-Ausstoß aufgrund der Verbrennung von FCKW aus dem Isolierschaum ist in Tabelle 4-30 für die einzelnen Modelle und Szenarien dargestellt.



Tabelle 4-30: HF-Freisetzung aufgrund der Verbrennung von FCKW-haltigem PUR-Schaum für die Verfahrensmodelle des WS-Typs

HF-Emissionen (Reingas) aus FCKW-Verbrennung	Maximum* [g/Kühlgerät]	Minimum* [g/Kühlgerät]	Szenario 1* [g/Kühlgerät]	Szenario 2* [g/Kühlgerät]
Grundmodell	0,00	0,82	0,55	0,50
PUR+Fremdstoffe	0,00	0,14	0,09	0,08
PUR-Verbrennung	0,00	0,83	0,56	0,51

* Szenarien entsprechen denen für FCKW-Freisetzung (Tabelle 4-22).

Die Bilanzierung der HF-Emissionen für die restlichen Verfahrensteile der Behandlungsmodelle dieses Typs erfolgt wieder durch eine Gegenüberstellung der eingesparten HCl-Emissionen mit den durch das Verfahren verursachten Emissionen. In Tabelle 4-31 sind die Ergebnisse dieser Bilanzen dargestellt, die vollständige Bilanzierung des Grundmodells und die Teilbilanzen der Verfahrensvarianten finden sich im Anhang in Tabelle 9-22 und Tabelle 9-23.

Tabelle 4-31: Ergebnisse der HF-Bilanzierung für die Modelle des WS-Typs (ohne HF aus FCKW-Verbrennung)

Varianten	HF-Einsparung			HF-Ausstoß		Gesamt Einsparung
	Stoffliche Verwertung	Therm. Verwertung	FCKW-Spaltprodukte	Indirekt	Sonstige	
Angaben in g HF / Kühlgerät						
Grundmodell	0,212	0,006	0,030	0,008		0,240
Cryokondensation	0,212	0,006	0,030	0,010		0,238
PUR+Fremdstoffe	0,195	0,006	0,030	0,008		0,221
Transport	0,212	0,006	0,030	0,008	0,00	0,240
PS-Mitverbrennung	0,212	0,006	0,030	0,008		0,240

Zusammengefasst ergeben sich damit für diesen Verfahrenstyp die HF-Emissionen nach Tabelle 4-32. Auch für HF wird für alle weiteren Betrachtungen das Szenario 1 herangezogen.

Tabelle 4-32: Gesamtbilanz für die HF-Emissionen der Verfahrensmodelle des WS-Typs

Gesamt*	Maximum [g/Kühlgerät]	Minimum [g/Kühlgerät]	Szenario 1 [g/Kühlgerät]	Szenario 2 [g/Kühlgerät]
Grundmodell	0,24	-0,58	-0,31	-0,26
Cryokondensation	0,24	-0,58	-0,31	-0,26
PUR+Fremdstoffe	0,22	0,08	0,13	0,14
PUR-Verbrennung	0,24	-0,59	-0,32	-0,27
Transport	0,24	-0,58	-0,31	-0,26
PS-Mitverbrennung	0,24	-0,58	-0,31	-0,26

*Positive Werte bedeuten eine Einsparung an HF-Emissionen und negative einen Ausstoß.

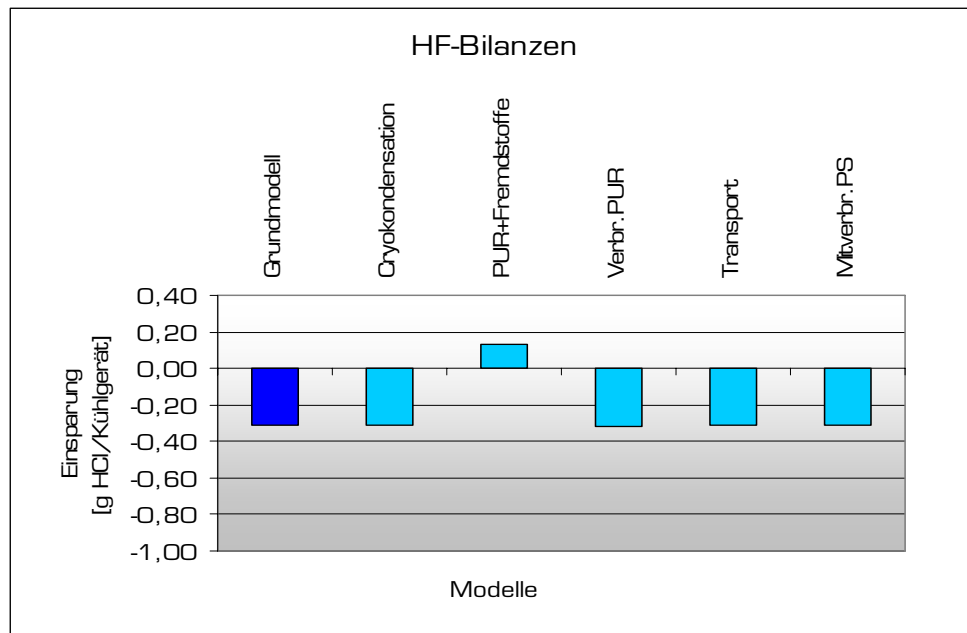


Abbildung 4-16: Gesamtemissionen an HF für die Verfahrensmodelle des WS-Typs

Für HF zeigt sich, wie schon für HCl, für fast alle Verfahrensmodelle eine Freisetzung in die Atmosphäre (Abbildung 4-16). Der Grund dafür ist wiederum die Verbrennung der im Isolierschaum enthaltenen FCKW bzw. die dabei entstehenden HF-Emissionen, welche z.B. bei der Einschmelzung von Fe-Schrott im Zuge der Stahlerzeugung ungehindert in die Atmosphäre gelangen können.

Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung

Wie bereits erwähnt werden bei diesem Verfahren praktisch die gesamten FCKW im Isolierschaum bei der Verbrennung im Drehrohrofen in HF und HCl aufgespalten. Die Reinigungsleistung der HF-Abscheidung aus dem Rauchgas beträgt 98 %³.

Für diesen Verfahrenstyp wird keine Betrachtung verschiedener FCKW-Freisetzungs-Szenarien vorgenommen, die Bilanzierung der HF-Emissionen erfolgt somit in einem Schritt. Es werden einander wieder Einsparung und Ausstoß an HF gegenübergestellt. Die Ergebnisse der Bilanzierung für die Verfahrensmodelle finden sich in Tabelle 4-33, ausführliche Darstellungen der Bilanzierungen sind im Anhang in Tabelle 9-24 und Tabelle 9-25 angeführt.

³ Das einzige Verfahren dieses Typs in Österreich weist wesentlich bessere Reinigungsleistungen für HF und HCl auf (Stubenvoll et al., 2002), als in der gegenwärtigen Studie angenommen. Bei der Betrachtung der verschiedenen Behandlungsverfahren wird aber mit Durchschnittswerten gearbeitet, um die Verfahrensmodelle auf einer allgemeinen Basis vergleichen zu können.



Tabelle 4-33: Gesamtbilanz für die HF-Emissionen der Verfahrensmodelle des ST-Typs

Varianten	HF-Einsparung			HF-Ausstoß			Gesamt Einsparung*	
	Angaben in g HF / Kühlgerät	Stoffliche Verwertung	Therm. Verwertung	FCKW-Spalt- produkte	Direkt	Indirekt		Sonstige
Grundmodell		0,132	0,005	0,009	0,73	0,006		-0,59
Sortierung (50 %)		0,171	0,005	0,009	0,73	0,006		-0,55
Sortierung (35 %)		0,159	0,005	0,009	0,73	0,006		-0,56
Sortierung (15 %)		0,142	0,005	0,009	0,73	0,006		-0,58
Transport		0,132	0,005	0,009	0,73	0,006	0,000	-0,59

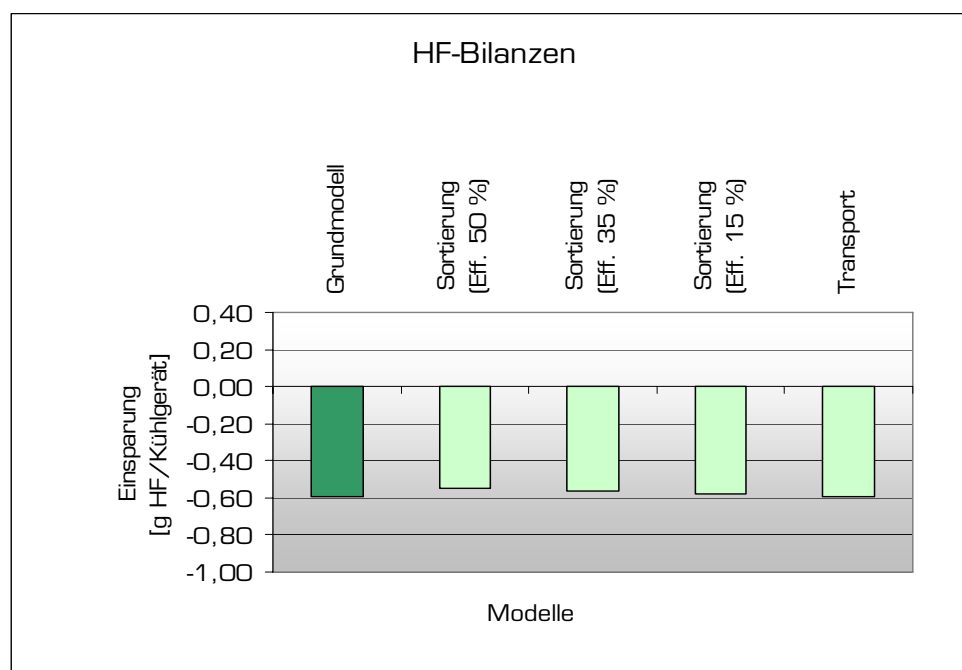


Abbildung 4-17: Gesamtemissionen an HF für die Verfahrensmodelle des ST-Typs

Für die Modellverfahren des ST-Typs erfolgt ein Ausstoß an HF (Abbildung 4-17). Das liegt an der Verbrennung der FCKW aus dem Isolierschaum, als Spaltprodukt entsteht dabei HF, welches mit dem Rauchgas ausgetragen wird. Die Reinigungsleistung der Rauchgasreinigung wurde für diese Modelle sehr konservativ angesetzt, eine Erhöhung der Reinigungsleistung würde aber eine deutliche Verminderung der HF-Emissionen bewirken.

4.1.2.4.2 VOC-Kühlgeräte

Da keine FCKW in der Isolierung vorhanden sind, treten bei der Behandlung von VOC-Kühlgeräten keine direkten HF-Emissionen auf. Die HF-Bilanzierung beruht somit auf HF-Emissionen, die bei der Bereitstellung eines eingesparten bzw. benötigten Gutes anfallen.

Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung

Die Ergebnisse der HF-Bilanzierung für die Verfahrensmodelle dieses Typs sind in Tabelle 4-34 dargestellt. Detaillierte Angaben zur Bilanzierung der einzelnen Modelle finden sich im Anhang in Tabelle 9-40 und Tabelle 9-41.

Tabelle 4-34: Gesamtbilanz der HF-Emissionen der Verfahrensmodelle des WS-Typs für VOC-Geräte

Varianten	HF-Einsparung		HF-Ausstoß		Gesamt Einsparung
	Stoffliche Verwertung	Therm. Verwertung	Indirekt	Sonstige	
Angaben in g HF / Kühlgerät					
Grundmodell	0,087	0,009	0,008		0,088
Cryokondensation	0,087	0,009	0,010		0,086
PUR+Fremdstoffe	0,077	0,009	0,008		0,078
Transport	0,087	0,009	0,008	0,000	0,087
PS-Mitverbrennung	0,087	0,010	0,008		0,089

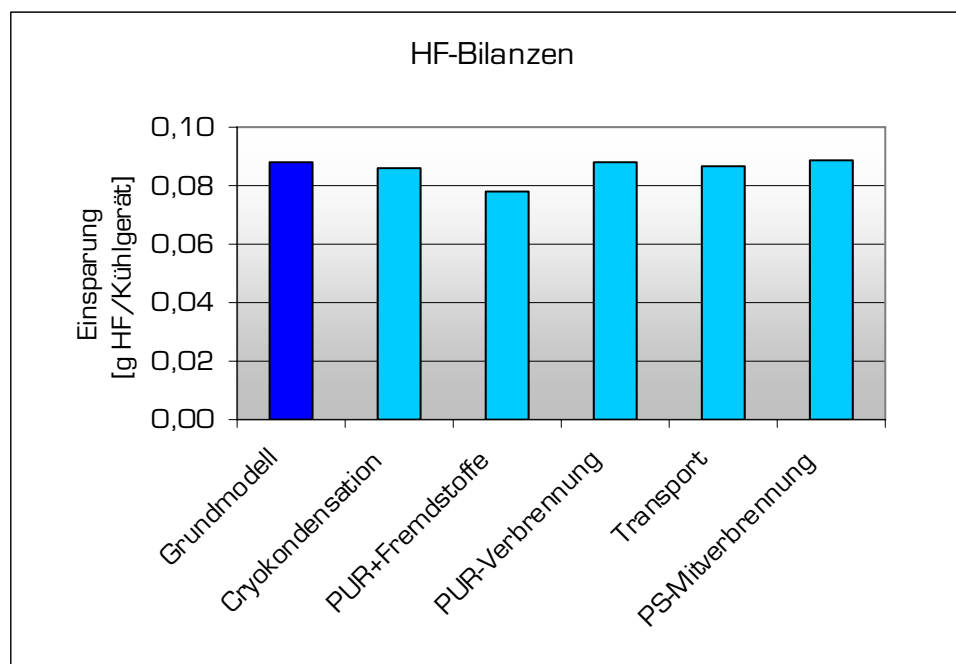


Abbildung 4-18: Gesamtemissionen an HF für die Verfahrensmodelle des WS-Typs für VOC-Geräte

Aus Abbildung 4-18 erkennt man, dass das Wegfallen der HF-Emissionen aus der FCKW-Verbrennung für alle Modellverfahren zu einer Einsparung an HF führt. Am größten ist diese wieder für die Variante „PS-Mitverbrennung“, insgesamt sind die Schwankungen der erzielten Einsparung an HF-Emissionen durch die einzelnen Varianten aber minimal.



Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung

Aus Tabelle 4-35 sind die Ergebnisse der Bilanzierung der HF-Emissionen für die Modelle dieses Typs ersichtlich. Eine umfassende Darstellung dieser Bilanzierung liefern Tabelle 9-42 und Tabelle 9-43.

Tabelle 4-35: Gesamtbilanz der HF-Emissionen der Verfahrensmodelle des ST-Typs für VOC-Geräte

Varianten Angaben in g HF / Kühlgerät	HF-Einsparung		HF-Ausstoß		Gesamt Einsparung
	Stoffliche Verwertung	Therm. Verwertung	Indirekt	Sonstige	
Grundmodell	0,040	0,008	0,006		0,042
Sortierung (50 %)	0,062	0,008	0,006		0,064
Sortierung (35 %)	0,055	0,008	0,006		0,057
Sortierung (15 %)	0,045	0,008	0,006		0,047
Transport	0,040	0,008	0,006	0,000	0,042

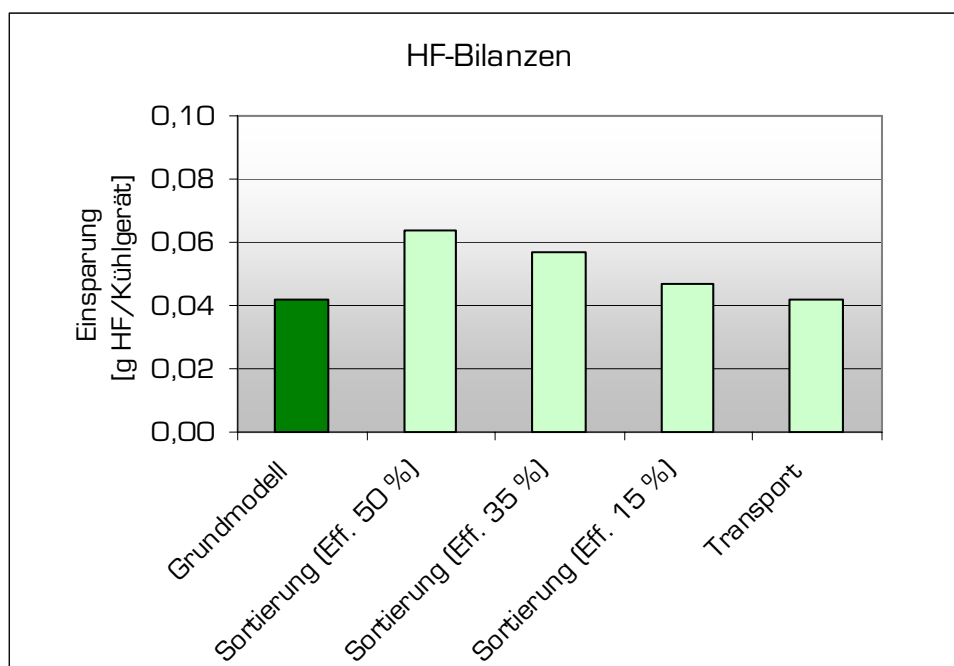


Abbildung 4-19: Gesamtemissionen an HF für die Verfahrensmodelle des ST-Typs für VOC-Geräte

Auch für die Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung erfolgt bei der Behandlung von VOC-Kühlgeräten eine Einsparung an HF-Emissionen (Abbildung 4-19). Der Grund hierfür ist der gleiche wie schon beim anderen Verfahrenstyp. Da keine FCKW im Kühlgerät vorhanden sind, entstehen auch keine Fluorwasserstoffe bei deren Verbrennung.

4.1.2.5 Feste Abfälle

Die festen Stoffe die keiner weiteren Nutzung mehr zugeführt werden, müssen deponiert werden. In diesem Abschnitt erfolgt eine Betrachtung aller abgelagerten festen Abfälle der jeweiligen Behandlungsverfahren. Die festen Abfälle die aufgrund einer nachgeschalteten Abwasserbehandlung im Klärwerk (Klärschlamm) anfallen, werden im Zuge der Bilanzierungen nicht berücksichtigt.

4.1.2.5.1 FCKW-Kühlgeräte

Bei den folgenden Bilanzierungen werden die festen Abfälle aus dem FCKW-Hochtemperaturspaltverfahren und dem FCKW-Reinigungsverfahren (Destillationsrückstand) vernachlässigt. Einerseits sind die anfallenden Mengen pro Kühlgerät sehr gering und andererseits liegen keine genauen Angaben zu den Rückständen aus diesen Prozessen vor.

Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung

Bei diesem Verfahrenstyp entstehen nur wenige feste Abfälle, da der Schwerpunkt bei der Behandlung in der maximalen stofflichen Verwertung der Ausgabefractionen liegt. Diese Aussage bestätigt die Bilanzierung der festen Abfälle für das Grundmodell, welche in Tabelle 4-36 dargestellt ist.

Tabelle 4-36: Feste Abfälle aus dem Grundmodell des WS-Typs

Direkte Ablagerung	[%]	kg/KG	Abgelagertes Material			Gesamt [kg/KG]
Restmaterialien (nicht verwertet)	2,48	1,02	Ungefährlicher Abfall			1,02
Quecksilberschalter, Kondensatoren	0,00	0,00	Gefährlicher Abfall			0,00
Kunststoffverbrennung (Rückstände)*	[%]	kg/KG	Flugasche [kg/KG]	Filterkuchen [kg/KG]	Schlacke [kg/KG]	Gesamt [kg/KG]
Kunststoffe (PS und gemischt)	15,30	6,27	0,113	0,002	0,238	0,353
PUR-Mehl	9,92	4,07	0,073	0,001	0,155	0,229
Gesamtanfall an festen Abfällen			1,60 kg pro Kühlgerät			
*Die massenmäßige Aufteilung der Kunststoffe in die verschiedenen Verbrennungsrückstände findet sich in Tabelle 9-6						

Es werden nur Varianten betrachtet, die sich hinsichtlich der festen Abfälle vom Grundmodell unterscheiden. Dies trifft nur für die Variante „PUR mit Fremdstoffen“ zu,



die festen Abfälle aufgrund der Behandlung nach dieser Modellvariante betragen 3,94 kg pro Kühlgerät. Die zugehörige Bilanzierung findet sich im Anhang in Tabelle 9-26.

Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung

Den größten Anteil an den festen Abfällen dieses Verfahrenstyps bilden die Rückstände aus der Verbrennung der entkernten und zerkleinerten Kühlgerätegehäuse.

In Tabelle 4-37 ist die Bilanzierung der festen Abfälle für das Grundmodell dieses Typs dargestellt.

Tabelle 4-37: Feste Abfälle aus dem Grundmodell des ST-Typs

Direkte Ablagerungen	[%]	kg/KG	Abgelagertes Material			Gesamt [kg/KG]
Quecksilberschalter, Kondensatoren	0,00	0,00	Gefährlicher Abfall			0,00
Verbrennung	[%]	kg/KG	Flugasche [kg/KG]	Filterkuchen [kg/KG]	Schlacke [kg/KG]	Gesamt [kg/KG]
Kunststoffe* (aus Demontage)	7,54	3,09	0,056	0,001	0,117	0,17
Kühlgerätegehäuse	53,12	21,78	1,42	0,14	6,08**	7,64
Gesamtanfall an festen Abfällen			7,81 kg pro Kühlgerät			
→ Die massenmäßige Aufteilung der Kunststoffe in die verschiedenen Verbrennungsrückstände findet sich in Tabelle 9-6						
** Restschlacke nach Abtrennung der verwerteten Metallfraktionen						

Die Bilanzierung der verschiedenen Varianten des Grundmodells ist im Anhang angeführt (Tabelle 9-27). Es werden wieder nur jene Varianten betrachtet, die sich bei den festen Abfällen vom Grundmodell unterscheiden. Die Zusammenstellung der festen Abfälle für die einzelnen Varianten findet sich in Tabelle 4-38.

Tabelle 4-38: Feste Abfälle der Modellvarianten des ST-Typs

Angaben in kg pro Kühlgerät	Variante: Sortierung (100 % Fe, 50 % Al)	Variante: Sortierung (100 % Fe, 35 % Al)	Variante: Sortierung (100 % Fe, 15 % Al)
Gesamtanfall an festen Abfällen	2,57	2,79	3,08

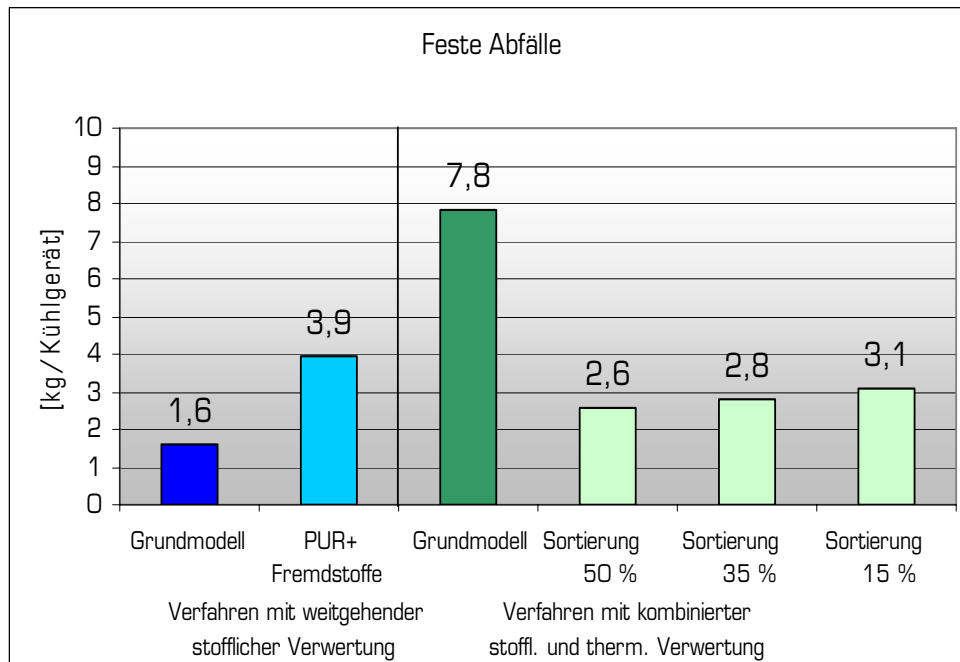


Abbildung 4-20: Feste Abfälle der verschiedenen Behandlungsmodelle

Aus Abbildung 4-20 erkennt man, dass für das Grundmodell des ST-Typs wesentlich mehr feste Abfälle anfallen als für alle anderen Modelle. Durch eine effizientere Rückgewinnung der Metalle lassen sich die festen Abfälle aber alle auf ein ähnliches Niveau bringen, wobei massenmäßig vor allem die Eisenfraktion von Bedeutung ist.

4.1.2.5.2 VOC-Kühlgeräte

Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung

Die Bilanzierung der einzelnen Modelle für VOC-Kühlgeräte ist im Anhang aus Tabelle 9-44 (Grundmodell) und aus Tabelle 9-45 (Variante „PUR+Restanhaftungen“) ersichtlich.

Die gesamten festen Abfälle für das Grundmodell betragen 1,12 kg pro Kühlgerät. Für die Variante „PUR+Reststoffe“, die sich als einzige vom Grundmodell hinsichtlich der festen Abfälle unterscheidet, ergeben sich die festen Abfälle zu 3,78 kg je behandeltem Kühlgerät.

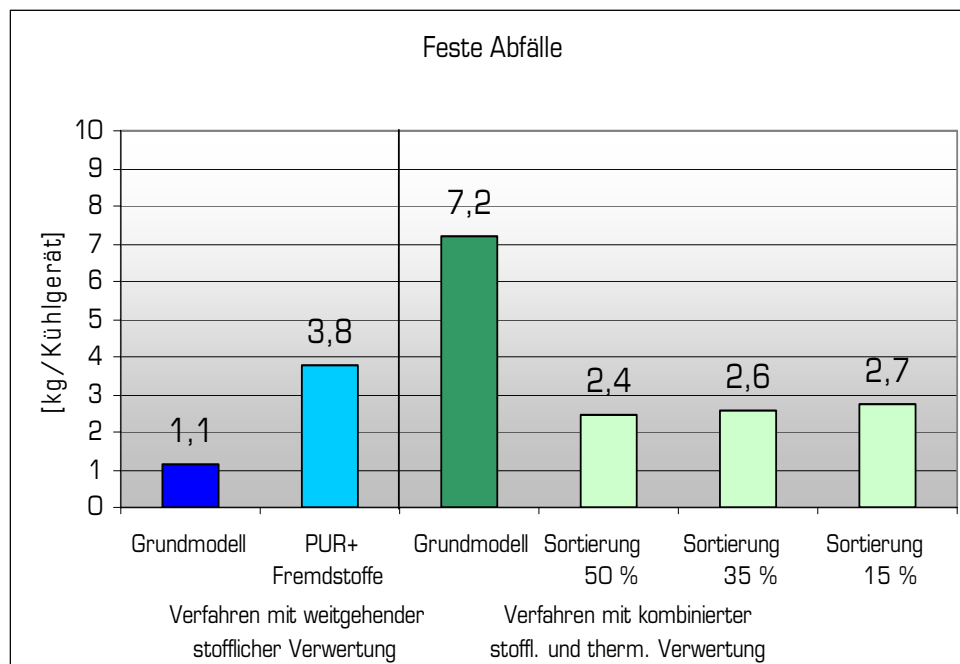
Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung

In Tabelle 4-39 sind die Ergebnisse der Bilanzierung der festen Abfälle für die Modellverfahren dieses Typs angeführt. Die Bilanzierung kann anhand von Tabelle 9-46 und Tabelle 9-47 im Anhang nachvollzogen werden.


Tabelle 4-39: Feste Abfälle der Modelle des ST-Typs für VOC-Geräte

Angaben in kg pro Kühlgerät	Grundmodell	Variante: Sortierung (100 % Fe, 50 % Al)	Variante: Sortierung (100 % Fe, 35 % Al)	Variante: Sortierung (100 % Fe, 15 % Al)
Gesamtanfall an festen Abfällen	7,18	2,44	2,57	2,74

Was für FCKW-Kühlgeräte bezüglich des Anfalles an festen Abfällen gilt, gilt auch für die Modelle zur Behandlung von VOC-Kühlgeräten. Aus Abbildung 4-21 wird deutlich, dass eine Steigerung der Metallrückgewinnung beim ST-Typ zu einer offensichtlichen Annäherung der Menge der festen Abfälle aus den Modellen der beiden Verfahrenstypen aneinander führt. Das Gefährdungspotential der festen Abfälle aus den einzelnen Behandlungsmodellen ist das gleiche. Der höhere Anteil an festen Abfällen aus den Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung kommt durch die teilweise noch im Abfall bzw. in der Restschlacke enthaltenen Metalle zu Stande.


Abbildung 4-21: Feste Abfälle der Behandlungsmodelle für VOC-Alt-kühlgeräte

4.1.2.6 Aggregierte Werte

Durch die Verwendung von Summenkennwerten können einige der in diesem Kapitel bilanzierten Emissionen zusammengefasst werden.

Ozonabbaupotential (ODP)

Für das Ozonabbaupotential ergibt die Ermittlung exakt die gleichen Werte die auch für die FCKW-Freisetzung berechnet wurden. Für die FCKW im Isolierschaum wurde die Annahme getroffen, dass diese sich nur aus R11 zusammensetzen, welche als Bezugswert für das ODP herangezogen werden (siehe Tabelle 9-7). Das ODP der verschiedenen Behandlungsverfahren entspricht daher den Angaben über die FCKW-Emissionen in Abschnitt 4.1.2.2 und Abbildung 4-11.

Treibhauspotential (GWP)

Die Berechnung des Treibhauspotentials erfolgt für einen Zeithorizont von 100 Jahren mit den Werten aus Tabelle 9-8. Der Beitrag der FCKW zum Treibhauseffekt wird anhand des GWP_{netto} (Beinhaltet die Minderung des Treibhauseffektes der FCKW durch deren Beitrag zum Ozonabbau) ermittelt.

Die Ermittlung des GWP erfolgt anhand der FCKW- und CO_2 -Emissionen aus den Kapiteln 4.1.2.2 und 4.1.2.1. Die GWP für die Modelle der beiden Verfahrenstypen für FCKW-Kühlgeräte sind aus Abbildung 4-22 (Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung) und Abbildung 4-23 (Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung) ersichtlich.

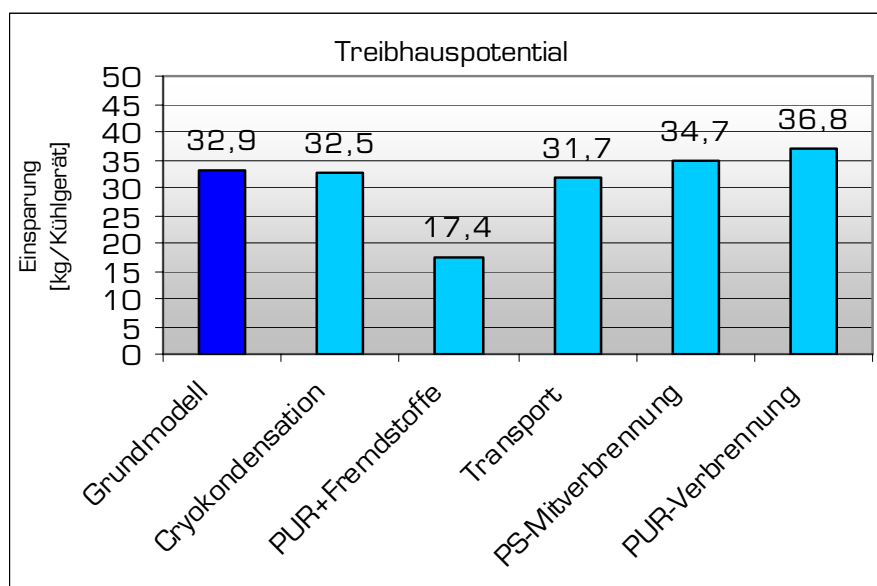


Abbildung 4-22: Verminderung des Treibhauspotentials durch Verfahrensmodelle des WS-Typs für FCKW-Kühlgeräte

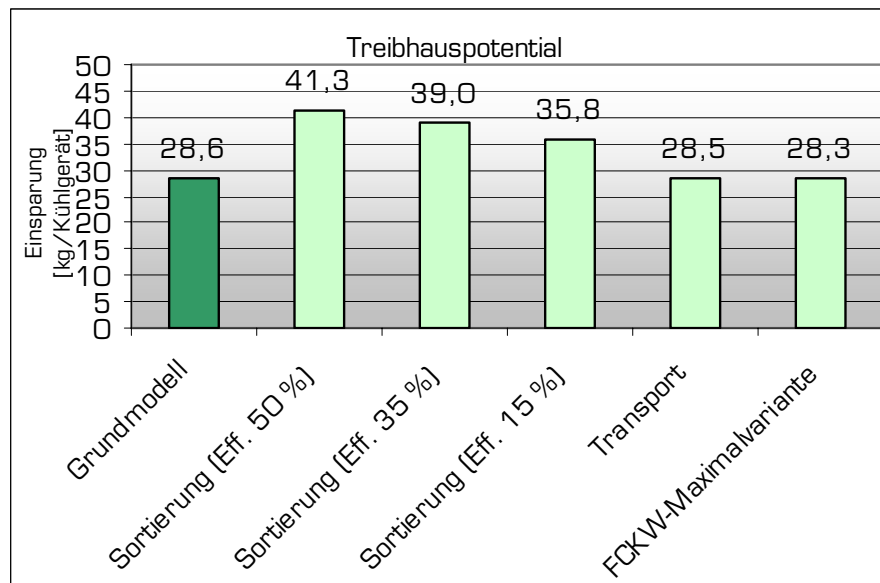


Abbildung 4-23: Verminderung des Treibhauspotentials durch Verfahrensmodele des ST-Typs für FCKW-Kühlgeräte

Für VOC-Geräte ist die Verminderung des GWP durch die verschiedenen Behandlungsmodelle in Abbildung 4-24 dargestellt.

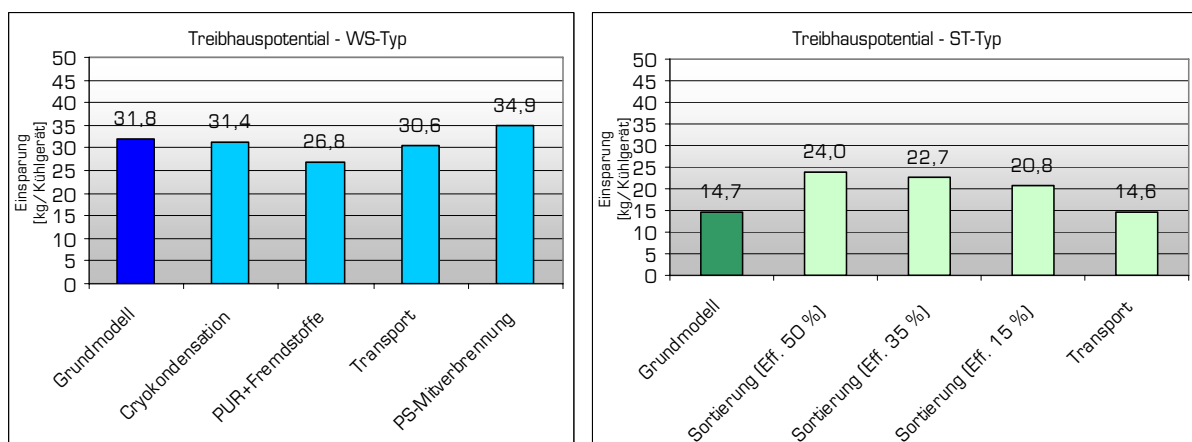


Abbildung 4-24: Verminderung des GWP durch die Verfahrensmodele der beiden Behandlungstypen für VOC-Kühlgeräte

Die Einsparungen an treibhauswirksamen Emissionen sind für beide Verfahrenstypen zur Behandlung von FCKW-Kühlgeräten im gleichen Bereich (siehe Abbildung 4-22 und Abbildung 4-23). Bei der Behandlung von VOC-Kühlgeräten erfolgt durch die Modelle des Typs mit weitgehender stofflicher Verwertung eine größere Einsparung an treibhausaktiven Emissionen. Der Grund dafür ist wieder der Wegfall der FCKW-Emissionen, dadurch entsprechen die in Abbildung 4-24 dargestellten Treibhauspotentiale den CO₂-Bilanzen aus Kapitel 4.1.2.1.2.

Versauerungspotential (AP)

Das Versauerungspotential errechnet sich aus den HCl- und HF-Emissionen der jeweiligen Verfahrensmodelle. Die Umrechnungsfaktoren auf SO₂-Äquivalente finden sich in Tabelle 9-9. In den folgenden beiden Abbildungen sind die AP-Werte für die Behandlungsmodelle von FCKW-Kühlgeräten dargestellt. Negative Werte bedeuten eine Erhöhung der Versauerung und positive eine Einsparung.

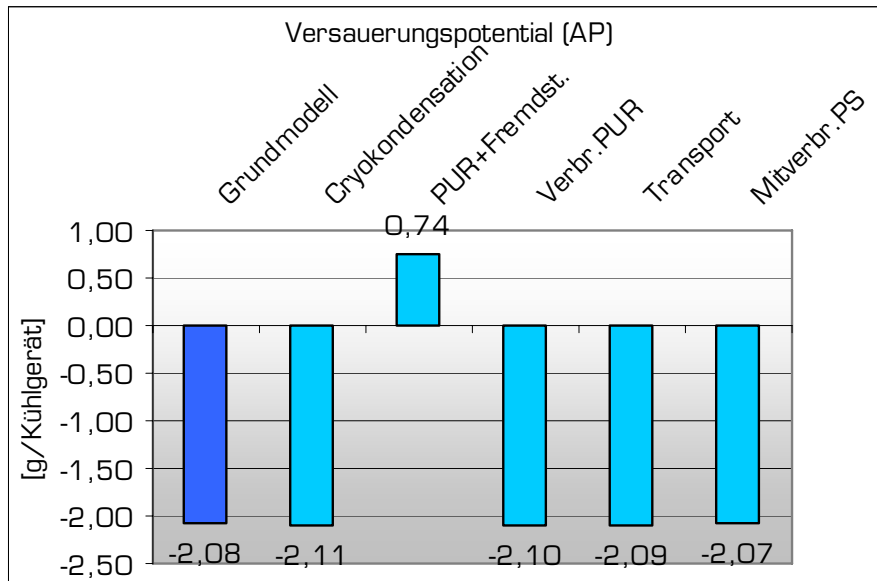


Abbildung 4-25: Beitrag zum Versauerungspotential durch die Verfahrensmodelle des WS-Typs für FCKW-Kühlgeräte

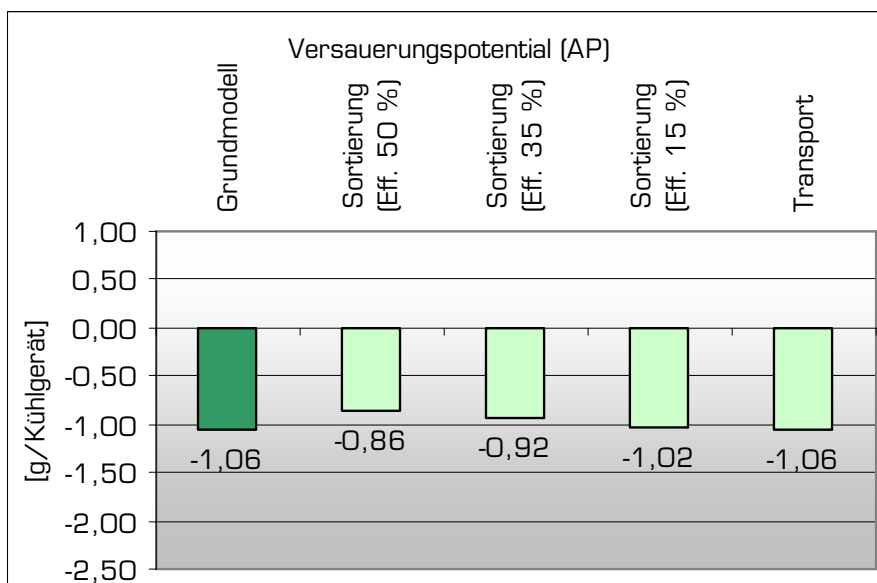


Abbildung 4-26: Beitrag zum Versauerungspotential durch die Verfahrensmodelle des ST-Typs für FCKW-Kühlgeräte



Für VOC-Kühlgeräte sind die jeweiligen Beiträge zum Versauerungspotential in Abbildung 4-27 dargestellt. Wieder bedeuten positive Werte eine Einsparung und negative eine Erhöhung der Versauerung.

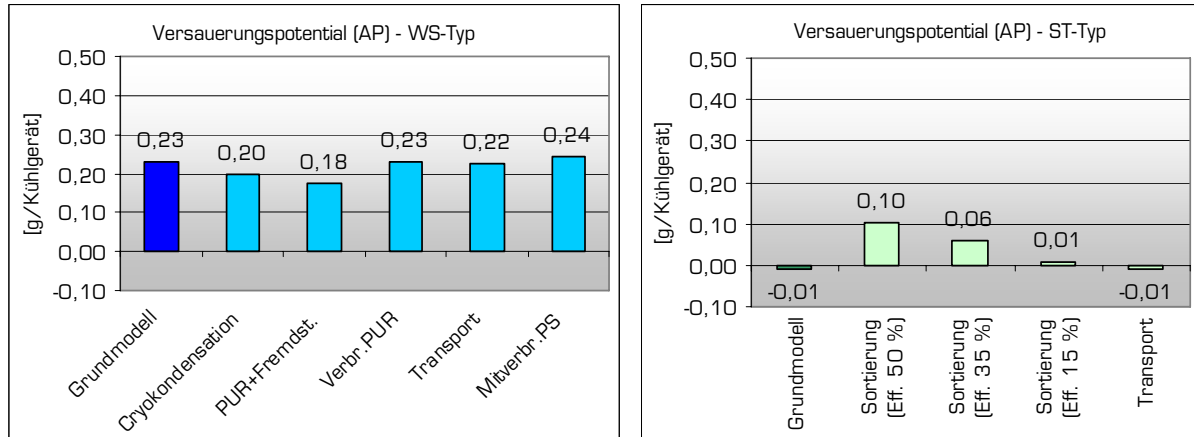


Abbildung 4-27: Beitrag zum Versauerungspotential durch die Verfahrensmodelle der beiden Behandlungstypen für VOC-Kühlgeräte

Für die Behandlung von FCKW-Kühlgeräten weisen die Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung wesentlich niedrigere Beiträge zur Versauerung auf als die Modelle der Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung (Abbildung 4-25 und Abbildung 4-26). In erster Linie liegt das an den sauren Emissionen die aufgrund der Verbrennung der FCKW im anhaftenden PUR-Schaum entstehen. Daher sieht das Bild für die Behandlung von VOC-Kühlgeräten auch völlig anders aus (Abbildung 4-27). Hier ergibt sich für die Modelle des Typs mit weitgehender stofflicher Verwertung eine höhere Einsparung an versauernden Emissionen als für die Modelle des Typs mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung.

4.2 Vergleich der betrachteten Behandlungssysteme

Die Darstellungen im vorigen Kapitel erfolgten jeweils für die einzelnen Verfahrenstypen. In diesem Abschnitt sollen nun die beiden Verfahren miteinander verglichen werden. Die Verfahrenstypen werden einander anhand der Bilanzen aus Kapitel 4.1 gegenübergestellt.

4.2.1 Verwertungsverfahren für FCKW-haltige Alt-Kühlgeräte

4.2.1.1 Grundmodell

Das abfallwirtschaftliche Ziel „Ressourcenschonung“ drückt sich durch die Bilanzierung des KEA in 4.1.1 und somit in Form der erreichten Energieeinsparung aus. Die Verfahrensmodelle mit höheren Werten für die Energieeinsparung sind die des Behandlungstyps mit weitgehender stofflicher Verwertung. Der Grund dafür ist vor allem die 100 %ige Verwertung der im Kühlgerät enthaltenen Metallanteile, wobei die Bewirtschaftung des Aluminiums hierbei die entscheidende Rolle spielt. Dieser Sachverhalt wird durch Abbildung 4-28 verdeutlicht. Man erkennt, dass praktisch der gesamte Bilanzunterschied für den KEA auf die unterschiedlichen Rückgewinnungsanteile von Eisen und Aluminium zurückgeführt werden kann. Die optimale Bewirtschaftung der Metallfraktionen im Kühlgerät, besonders die des Aluminiums, spielt somit die dominierende Rolle für ein ressourcenschonendes Verfahren.

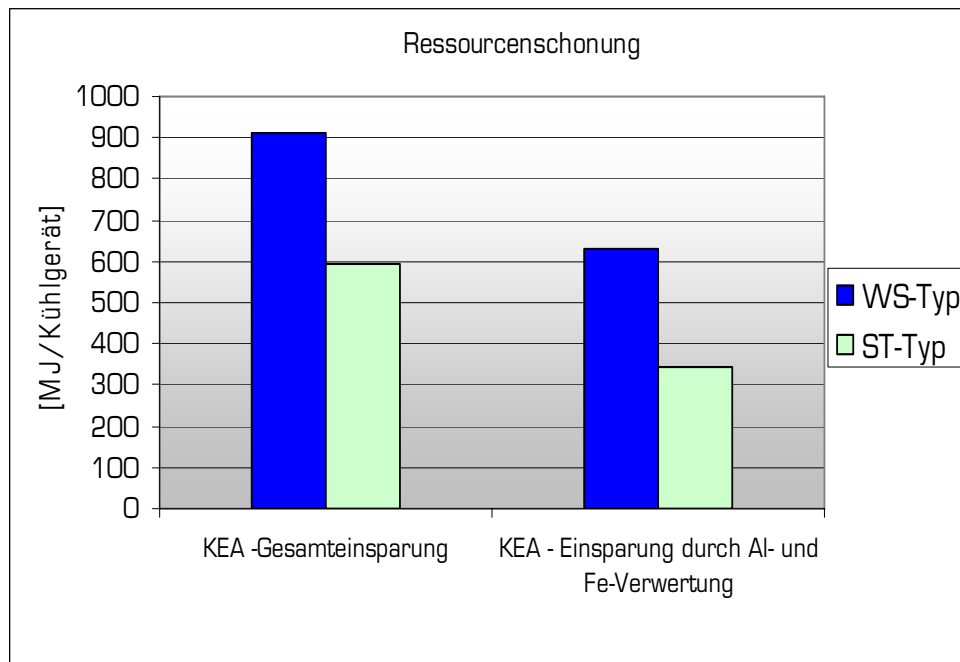


Abbildung 4-28: KEA-Einsparung für die Grundmodelle der beiden Verfahrenstypen



Das Aluminium im Kühlgerät beinhaltet aber auch Anteile aus aluminiumbeschichteten Karton, ob diese tatsächlich für eine Wiederverwertung herangezogen werden können, ist aber unklar. Die Auswirkungen einer Nicht-Verwertbarkeit dieses Aluminiumanteils werden in der Sensitivitätsanalyse betrachtet.

Von geringer Bedeutung für die Bilanzierung des KEA ist z.B. die stoffliche Verwertung des PUR-Mehls oder der Polystyrol-Fraktion. Hier ist das Ersatzprodukt entscheidend für die erzielte Ressourceneinsparung. Da in den erwähnten Fällen die Ersatzprodukte keine ressourcenintensiven Güter sind, ist auch die KEA-Einsparung durch eine stoffliche Verwertung der Outputfraktionen entsprechend gering.

Vergleicht man die erzielte Energieeinsparung der beiden Grundmodelle mit dem Energieverbrauch über den gesamten Lebenszyklus eines durchschnittlichen Kühlgerätes (aus Truttmann und Rechberger, 2006), so wird der Unterschied zwischen den beiden Verfahren relativiert. Aus Abbildung 4-29 lässt sich kaum noch erkennen, welches der beiden Grundmodelle eine größere KEA-Einsparung erbringt, da beide Einsparungen nur einen sehr kleinen Anteil des Gesamtenergieverbrauches ausmachen.

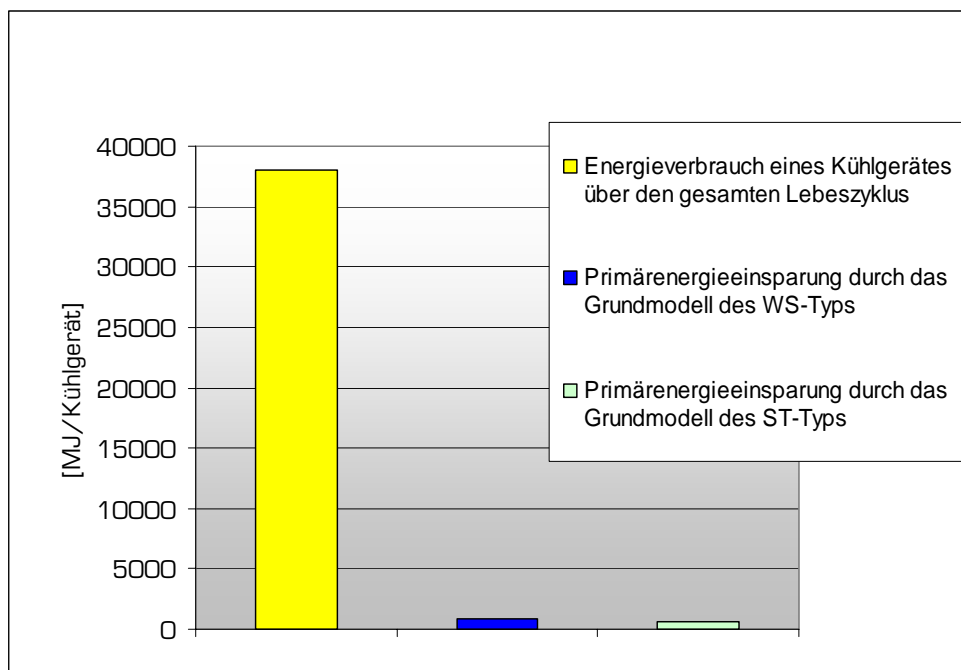


Abbildung 4-29: KEA-Einsparung der Grundmodelle der beiden Behandlungstypen im Vergleich zum Gesamtenergieverbrauch eines Kühlgerätes über den gesamten Lebenszyklus

Die Erfüllung des Zieles „Umweltschutz“ ist aus den Bilanzen für die verschiedenen Emissionen ersichtlich. Bei einer Betrachtung der Ergebnisse in Kapitel 4.1.2 wird deutlich, dass hier das Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung Vorteile aufzuweisen hat. Nur für die festen Abfälle schneidet das Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung besser ab. Den festen Abfällen wird allerdings nicht viel Bedeutung beigemessen, da die problematischen Abfälle aus beiden Verfah-

ren in etwa die gleichen sind und die Größe „Deponievolumen“ aufgrund des, gesamt-abfallwirtschaftlich gesehen, kleinen Abfallstromes nicht als kritisch anzusehen ist (siehe dazu Tabelle 4-40).

Den wesentlichsten Unterschied bei allen anderen Emissionsbilanzierungen stellen die FCKW-Emissionen dar. Der „FCKW-Austrag“, der beim Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung durch die anhaftenden PUR-Teile und die Rest-FCKW-Mengen im PUR-Mehl zustande kommt, führt einerseits zu einem bedeutenden FCKW-Ausstoß in die Atmosphäre und andererseits zu einem verstärkten Auftreten versauernder Emissionen. Der Vergleich mit dem Gesamtausstoß an Ozon abbauenden Substanzen in Österreich macht deutlich, dass die freigesetzten FCKW relativ umweltrelevant sind (Tabelle 4-40). Das Ozonloch über dem Südpol war im September 2006 so groß wie noch nie zuvor (NASA, 2006), nicht zuletzt deshalb scheint bei der Minimierung des Ausstoßes an Ozon abbauenden Substanzen besonderer Handlungsbedarf gegeben zu sein.

Tabelle 4-40: Anteilige Darstellung der Bilanzierungsergebnisse (FCKW-Kühlgeräte) an den nationalen Emissionen bzw. am nationalen Bedarf des bilanzierten Gutes

[Daten pro Jahr, Quellen: siehe Tabelle 9-10]	Grundmodell des WS-Typs	Grundmodell des ST-Typs
Einsparung KEA (% des Gesamtenergieverbrauches für Österreich)	0,018	0,012
Ausstoß an ODP (% des Gesamtausstoßes an ODP für Österreich)	0,438	0,000
Einsparung an GWP (% des Gesamtausstoßes an GWP für Österreich)	0,008	0,007
Ausstoß an AP (% des Gesamtausstoßes an AP für Österreich)	0,005	0,002
Feste Abfälle (% des Gesamtanfalles an Abfällen in Österreich)	0,0007	0,003
Verwertetes Aluminium (% des Gesamtaluminiumbedarfs für Österreich)	0,296	0,109

Anmerkung: Für diese Tabelle gilt die Annahme, dass 100 % der behandelten Alt-Kühlgeräte FCKW-haltig sind.

Aus Tabelle 4-40 ist die Relevanz der einzelnen Emissionen bzw. Einsparungen erkennbar. Dabei wird klar, dass bei den Emissionen das FCKW bzw. das ODP im nationalen Vergleich von größter Bedeutung ist, die versauernden Emissionen, die festen Abfälle und das GWP spielen hingegen im nationalen Kontext kaum eine Rolle. Der KEA ist etwas relevanter als die letzteren, damit bestätigt auch diese Tabelle die Bedeutung einer optimierten Aluminiumbewirtschaftung.



4.2.1.2 Modellvarianten

Die Bilanzierungsergebnisse für die verschiedenen Modellvarianten geben Aufschluss darüber, wie die Änderungen einzelner Verfahrenselemente das Ergebnis beeinflussen können.

Die Berücksichtigung der Transportprozesse im Zuge der Behandlungsverfahren hat kaum einen Einfluss auf das Ergebnis der jeweiligen Bilanzierung, es wird deshalb nicht weiter auf die Ergebnisse für diese Varianten eingegangen.

Die Verfahrensvariante des Typs mit weitgehender stofflicher Verwertung, die die größte Energieeinsparung aufweist, ist die Variante „Industrielle Mitverbrennung des Polystyrols“ (Abbildung 4-1). Es scheint also ressourcenschonender zu sein, das anfallende sortenreine Polystyrol als Ersatzbrennstoff zu nutzen als es stofflich in Produkten mit niedrigen Qualitätsansprüchen zu verwerten.

Für die Modellvarianten des Typs mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung wird deutlich, wie wichtig das Recycling der Metallfraktionen für die Ressourcenschonung ist. Je mehr Metall aus der Schlacke abgetrennt werden kann, desto höher ist die erzielbare Energieeinsparung durch das Verfahren (siehe Abbildung 4-2). Da die maximale Al-Rückgewinnung mit 50 % begrenzt ist, ist auch für die Variante mit maximaler Sortiereffizienz die Einsparung geringer als für die Modelle des WS-Typs. Ein optimiertes ressourcenschonendes Behandlungsverfahren sollte daher eine möglichst vollständige Abscheidung des Aluminiums im Kühlgerät vor einer eventuellen Verbrennung vorsehen, da eine Rückgewinnung aus der Schlacke nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht mehr mit der gleichen Effizienz möglich ist.

Hinsichtlich der Emissionen wird auch für die Modellvarianten deutlich wie wichtig der FCKW-Austrag ist. Die Freisetzung von FCKW in die Atmosphäre erfolgt zum Großteil über den Austrag in der PUR-Mehl-Fraktion. Durch eine Abfüllung und Verbrennung ließen sich die FCKW-Emissionen zwar vermindern, blieben aber immer noch hoch, da in den ersten Stunden nach dem Aufmahlen ein Großteil des Rest-FCKW bereits freigesetzt wird. Um die Abgabe von FCKW in die Atmosphäre zu minimieren wäre es daher nötig die Ausgabefraktion PUR-Mehl ständig in einem möglichst geschlossenen System zu führen. Eine Verwertung als Ölbindemittel ist jedenfalls abzulehnen.

Der Ausstoß an versauernden Emissionen ist ebenfalls für das Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung höher. Nur die Variante „PUR+Fremdstoffe“ weist eine Einsparung beim Versauerungspotential auf. Bei dieser Variante gibt es kaum PUR-Anhaftungen an den Metall- und Kuststofffraktionen, deshalb entstehen auch viel geringere Mengen an HF- und HCl-Emissionen. Eine Minimierung der PUR-Anhaftungen an den Ausgabefraktionen ist somit für die Behandlungsmodelle des WS-Typs notwendig um die versauernden Emissionen zu reduzieren.

Für die Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung ist vor allem die Rauchgasreinigungsleistung der Verbrennungsanlage entscheidend für das Ausmaß an versauernden Emissionen. Das erkennt man daran, dass für die einzelnen Modellvarianten kaum Unterschiede hinsichtlich der sauren Emissionen bestehen (siehe Abbildung 4-26).

Hinsichtlich der festen Abfälle ist die Abnahme für die Modellvarianten des ST-Typs mit zunehmender Sortiereffizienz auffällig. Eine bessere Abscheidung der Metalle aus der Schlacke führt für diesen Verfahrenstyp zu einer starken Reduktion der festen Abfälle.

Die erzielte Einsparung an treibhausaktiven Emissionen schwankt für die Modellvarianten des WS-Typs teilweise recht stark (Abbildung 4-22). Eine Verminderung des FCKW-Ausstoßes würde zu deutlich höheren Einsparungen an CO₂-Äquivalenten führen, schließlich verhält sich die Einsparung an CO₂-Emissionen (Abbildung 4-7) ähnlich wie die Einsparung an Energie (Abbildung 4-1).

Die Variante mit maximaler Sortiereffizienz des ST-Typs erzielt insgesamt die größten Einsparungen beim GWP, das ist, wie bereits erwähnt, auf die hohe Treibhausrelevanz der FCKW-Emissionen zurückzuführen.

Zusammenfassend lässt sich für die Behandlungsmodelle der beiden Verfahrenstypen feststellen, dass der WS-Typ Vorteile hinsichtlich der Ressourcenschonung aufweist. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Bewirtschaftung der Metalle, wobei es speziell das recycelbare Aluminium optimal zu verwerten gilt.

Der ST-Typ schneidet hinsichtlich des Umweltschutzes besser ab. Der dominierende Aspekt ist hier der Ausstoß an FCKW in die Atmosphäre.

Aus Abbildung 4-29 und Tabelle 4-40 wird schließlich deutlich, dass für die Behandlung von FCKW-Kühlgeräten die Vermeidung einer Freisetzung von FCKW in die Atmosphäre die entscheidende Rolle spielt. Da dies nur durch die Behandlungsmodelle des Verfahrenstyps mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung gewährleistet wird, sind diese insgesamt besser geeignet FCKW-haltige Kühlgeräte im Sinne der abfallwirtschaftlichen Zielsetzungen zu verwerten.



4.2.2 Verwertungsverfahren für VOC-Geräte

Für die Behandlungsmodelle von VOC-Kühlgeräten erfolgte keine Bilanzierung bzw. Betrachtung der auftretenden VOC-Emissionen. Diese entsprechen der Menge nach im Wesentlichen den FCKW-Emissionen, die bereits für FCKW-Kühlgeräte betrachtet wurden. Die Umweltrelevanz der VOC-Emissionen ist allerdings bei weitem geringer (siehe dazu 3.4). Selbst bei einem ausschließlichen Anfall von VOC-Geräten, würde die VOC-Menge in den Kühlgeräten nur einen Anteil von ca. 0,04 % der gesamten VOC-Emissionen Österreichs ausmachen und somit im nationalen Kontext kaum eine Rolle spielen.

4.2.2.1 Grundmodell

Hinsichtlich der Bilanzierung des KEA zeichnen sich für die Modelle zur Behandlung von VOC-Kühlgeräten ähnliche Resultate ab, wie bereits für FCKW-Kühlgeräte. Die erzielte Einsparung ist beim Grundmodell des WS-Typs aufgrund der geänderten Zusammensetzung (siehe Tabelle 3-4) der Kühlgeräte etwas geringer. Für das Grundmodell des ST-Typs ergibt sich hingegen sogar eine etwas größere Energieeinsparung, was ebenfalls auf die unterschiedliche Zusammensetzung der VOC-Kühlgeräte zurückzuführen ist (Abbildung 4-3 und Abbildung 4-4). Der geringere Aluminiumanteil zeigt keine so starken Auswirkungen auf das Bilanzierungsergebnis, da ohnehin ein geringerer Anteil des Aluminiums zurück gewonnen wird. Der höhere Kunststoffanteil hingegen führt aber zu einer deutlichen Steigerung der KEA-Einsparung durch die thermische Verwertung. Trotzdem erreicht auch für VOC-Kühlgeräte das Grundmodell der Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung eine größere Einsparung an Primärenergie, der Unterschied zwischen den Resultaten der beiden Grundmodelle nimmt im Vergleich zu FCKW-Geräten etwas ab.

Die versauernden Emissionen der Behandlungsverfahren von VOC-Kühlgeräten zeigen ein ähnliches Verhalten zueinander wie die Bilanzierungsergebnisse für den KEA. Da kein FCKW in den Kühlgeräten vorhanden ist, treten die indirekten Emissionen aus der Vorkette der eingesparten bzw. verbrauchten Güter in den Vordergrund. Die Bilanzierung der HCl-Emissionen berücksichtigt außerdem noch eine direkte Emissionsquelle, nämlich das PVC in der Kunststofffraktion. Insgesamt liegen die Einsparungen bzw. Ausstöße für die beiden Grundmodelle auf einem sehr niedrigen Niveau. Das Grundmodell der Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung erzielt für die versauernden Emissionen die besseren Ergebnisse (siehe Abbildung 4-14, Abbildung 4-15, Abbildung 4-18 und Abbildung 4-19). Im Vergleich mit nationalen Zahlen spielen die versauernden Emissionen aber eine äußerst kleine Rolle (siehe Tabelle 4-41), deshalb wird ihnen hier kaum Bedeutung beigemessen.

Die Bilanzierungsergebnisse für die CO₂-Emissionen ähneln den Resultaten, die bereits für den KEA ermittelt wurden. Das Grundmodell der Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung erzielt die größte Einsparung an CO₂-Emissionen. Der Hauptgrund dafür ist wieder das vollständige Recycling des Aluminiums. Die Werte für das GWP entsprechen zur Gänze denen für die CO₂-Emissionen, da für VOC-Kühlgeräte sonst keine treibhauswirksamen Emissionen bilanziert wurden.

Tabelle 4-41: Anteilige Darstellung der Bilanzierungsergebnisse (VOC-Kühlgeräte) an den nationalen Emissionen bzw. am nationalen Bedarf des bilanzierten Gutes

[Daten pro Jahr, Quellen: siehe Tabelle 9-10]	Grundmodell des WS-Typs	Grundmodell des ST-Typs
Einsparung KEA (% des Gesamtenergieverbrauches für Österreich)	0,017	0,012
Einsparung an GWP (% des Gesamtausstoßes an GWP für Österreich)	0,008	0,004
Einsparung an AP (% des Gesamtausstoßes an AP für Österreich)	0,0005	0,0000
Feste Abfälle (% des Gesamtanfalles an Abfällen in Österreich)	0,0004	0,003
Verwertetes Aluminium (% des Gesamtaluminiumbedarfes für Österreich)	0,179	0,066

Anmerkung: Für diese Tabelle gilt die Annahme, dass 100 % der behandelten Alt-Kühlgeräte VOC-haltig sind.

Auch bei der Behandlung von VOC-Kühlgeräten stellt sich die Bewirtschaftung der Metalle, im Besonderen die des verwertbaren Aluminiums, als entscheidend für die Ressourcenschonung des Verfahrens dar. Die Bedeutung der verschiedenen Emissionen bzw. Einsparungen im Vergleich mit nationalen Zahlen für Österreich ist aus Tabelle 4-41 ersichtlich. Man erkennt, dass der Aspekt der Ressourcenschonung für die Behandlung von VOC-Kühlgeräten eindeutig in den Vordergrund tritt, da die Emissionen nur äußerst geringe Anteile am nationalen Ausstoß ausmachen. Sie spielen somit bei der Behandlung von VOC-Kühlgeräten nur eine untergeordnete Rolle.

4.2.2.2 Modellvarianten

Die Bilanzierungsergebnisse für die Varianten, die die Transportprozesse im Zuge der beiden Verfahrenstypen berücksichtigen, weichen kaum von den Ergebnissen für die Grundmodelle ab und werden deshalb nicht weiter berücksichtigt.

Bei der Bilanzierung des Primärenergieverbrauches zeigt sich für die Modelle des Verfahrenstyps mit weitgehender stofflicher Verwertung die größte Energieeinsparung. Die ressourcenschonendste Verfahrensvariante ist die Variante „Mitverbrennung von Polystyrol“. Der höhere Kunststoffanteil in VOC-Geräten führt hier zu einem geringfügig



deutlicheren Vorteil dieser Variante als bei den Modellen zur Behandlung von FCKW-Kühlgeräten. Insgesamt sind die Modelle des Typs mit weitgehender stofflicher Verwertung bei den Bilanzierungsergebnissen für den KEA aber sehr ausgeglichen.

Für die Modelle der Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung ist wiederum die Verwertung des Aluminiums bzw. der Metalle der limitierende Faktor. Je besser die Metallrückgewinnung funktioniert, desto größer ist die erzielbare Energieeinsparung.

Die Bilanzierung der Emissionen bestätigt die Aussagen, die in diesem Zusammenhang bereits für die Grundmodelle gemacht wurden.

Die festen Abfälle der Modelle des ST-Typs nehmen drastisch ab, sobald eine effizientere Metallabscheidung aus der Schlacke vorgenommen wird. Massenmäßig ist hier das Eisen von großer Bedeutung. Die größeren Einsparungen an versauernden Emissionen und CO_2 erzielen die Modelle des Verfahrenstyps mit weitgehender stofflicher Verwertung. Beim Verfahrenstyp mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung erreichen die Modelle mit einer effizienteren Metallabscheidung (Fe, Al) die höchsten Einsparungen. Für die Behandlungsmodelle von VOC-Kühlgeräten ist somit auch hinsichtlich der Emissionen die Rückgewinnung der Metalle, vor allem des Aluminiums, das wesentlichste Kriterium.

Der Bedeutung nach ist der Aspekt „Umweltschutz“ bei der Behandlung von VOC-Kühlgeräten jedenfalls dem Aspekt „Ressourcenschonung“ unterzuordnen (siehe Tabelle 4-41). Dies geschieht ohnehin, da für die Behandlung von VOC-Geräten beinahe alle bilanzierten Emissionen aufgrund von Ressourceneinsparungen bzw. -verbräuchen zu Stande kommen.

4.2.3 Sensitivitätsanalyse

In diesem Abschnitt sollen einige Annahmen, die für die Bilanzierung der Verfahrensmodelle getroffen wurden hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Ergebnisse analysiert werden.

4.2.3.1 FCKW-Freisetzung

Bei der Betrachtung der FCKW-Emissionen für die Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung waren einige Abschätzungen notwendig. Die FCKW-Emissionen aus dem PUR-Mehl sowie die Anhaftungen an den verschiedenen Ausgabefraktionen und die Menge der daraus freigesetzten FCKW mussten bestimmt werden. Es wurden dazu mehrere Szenarien entworfen, von denen das „plausibelste“ für die weiteren Berechnungen herangezogen wurde (siehe Kapitel 4.1.2.2). Die FCKW-Emissionen über die Abluft wurden in keinem Szenario betrachtet, da hierzu keine Daten zur Verfügung standen. Der Beitrag am FCKW-Ausstoß über diesen Pfad müsste im Einzelfall festgestellt werden, in dieser Arbeit bleibt er aber unberücksichtigt.

Geht man davon aus, dass keine FCKW aus den PUR-Anhaftungen austreten, so reduzieren sich die FCKW-Emissionen auf die Rest-FCKW im PUR-Mehl, diese werden vollständig in die Atmosphäre entlassen (Minimalszenario). Im Vergleich mit nationalen Zahlen für Luftschadstoffe, bleiben die FCKW noch immer die bedeutendste Emission, außerdem führt diese Annahme zu einer deutlichen Erhöhung der sauren Emissionen (HF und HCl). Die Größenordnungen der FCKW-Emissionen und der sauren Emissionen ändern sich dabei nicht.

Eine Reduktion der FCKW-Emissionen um eine Größenordnung ist nur möglich, wenn sowohl der Austrag von FCKW aus dem PUR-Mehl als auch die FCKW-Freisetzung aus den Anhaftungen drastisch verringert werden. Die maximale FCKW-Restmenge im PUR-Mehl dürfte, selbst bei keiner FCKW-Freisetzung aus den PUR-Anhaftungen an anderen Fraktionen, 0,02 Gewichtsprozent nicht überschreiten. Um PUR-Mehl als Ölbindemittel zu verwerten, wäre somit eine Reduktion der zulässigen Restmengen an FCKW um den Faktor 10 notwendig (Gütebestimmungen aus RAL, 2003). Da dies mit den eingesetzten technischen Verfahren nicht garantiert bzw. erreicht werden kann, sollte zur Minimierung der FCKW-Emissionen aus dem PUR-Mehl eine Verbrennung dieser Fraktion und keine stoffliche Verwertung vorgenommen werden. Die Verbrennung des ausgetragenen PUR-Mehls muss in einem Ofen erfolgen, in dem die Verbrennungstemperaturen ausreichen um sämtliche FCKW zu zerstören. Außerdem ist es notwendig FCKW-Flüsse in die Atmosphäre weitestgehend zu unterbinden, also die PUR-Fraktion bis zur Verbrennung in einem möglichst geschlossenen System zu führen.



4.2.3.2 Verbrennungsverfahren

Die Annahmen hinsichtlich der Verbrennungsverfahren betreffen im Wesentlichen zwei Bereiche, einerseits die Leistung der Rauchgasreinigung und andererseits die Wirkungsgrade der verschiedenen Öfen.

Die Durchschnittswerte, die für die Effizienz der Rauchgasreinigung herangezogen wurden, entsprechen für HCl in etwa den Werten die auch für die Anlage der Fernwärme Wien in Simmering ermittelt wurden. Für HF weist die Anlage in Simmering allerdings eine viel bessere Reinigungsleistung auf (ca. 99,5 %), diese würde die direkten HF-Emissionen für das Grundmodell des Verfahrens mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung auf ein Viertel reduzieren. An der Bedeutung der sauren Emissionen würde das allerdings nicht allzu viel ändern und auch die Aussagen für die HCl und HF-Emissionen wären grundsätzlich die gleichen.

Die Wirkungsgrade der unterschiedlichen Verbrennungsanlagen industrielle Mitverbrennung ($\eta = 85\%$), Müllverbrennungsanlage (MVA, $\eta = 70\%$) und Sonderabfallverbrennungsanlage ($\eta = 50\%$) üben einen gewissen Einfluss auf die Bilanzierung der einzelnen Verfahrensmodelle aus. Von besonderer Bedeutung sind Annahmen hinsichtlich der verschiedenen Wirkungsgrade, wenn stoffliche mit thermischen Verwertungswegen verglichen werden sollen. Die Modellvariante „Industrielle Mitverbrennung der Polystyrolfraktion“ hat bei allen Bilanzierungen besser abgeschnitten als das Grundmodell der Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung. Der kritische Unterschied zwischen den Wirkungsgraden für die industrielle Mitverbrennung und für die MVA liegt bei ca. 13 % (bezogen auf die Bilanzierung des KEA). Wird der Unterschied größer so ergeben sich immer stärkere Vorteile für das Modell mit thermischer Verwertung des Polystyrols, wird er kleiner so schneidet das Grundmodell besser ab. Relativ geringe Änderungen bei den Wirkungsgraden können also in diesem Fall zu einer Umkehrung der Bilanzierungsergebnisse für die Modellvarianten führen.

Es lässt sich feststellen, dass leicht geänderte Annahmen über die Effizienz der Rauchgasreinigung zu keinen anderen Aussagen führen würden. Eine relativ geringe Veränderung der Wirkungsgrade der verschiedenen Verbrennungsanlagen kann hingegen für den Vergleich stofflicher und thermischer Verwertungswege für Kunststoffe bereits eine bedeutende Rolle spielen.

4.2.3.3 Form des Aluminiums im Kühlgerät

Aus den Resultaten in den vorhergehenden Abschnitten wurde die Bedeutung der Aluminiumbewirtschaftung für die Ressourcenschonung klar. Deshalb sollen hier Überlegungen hinsichtlich der Verwertbarkeit des Aluminiums in Kühlgeräten angestellt werden.

Ca. 10 % des Aluminiums im Kühlgerät liegen in Form einer Beschichtung auf dem Abschlusskarton der PUR-Isolierung vor (MA 48, 1996). Geht man davon aus, dass dieser Anteil nicht für eine Verwertung als Sekundäraluminium herangezogen werden kann, so verringert sich dadurch die erzielbare Ressourceneinsparung durch die Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung.

Die Behandlung von VOC-Kühlgeräten nach dem Verfahrenstyp mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung könnte zukünftig über eine MVA (z.B. Wirbelschichtofen) erfolgen, was einen höheren thermischen Wirkungsgrad und eventuell eine höhere Aluminiumrückgewinnungsquote zur Folge hätte. Dadurch würden sich die erzielten Ressourceneinsparungen der Modelle der beiden Behandlungstypen einander annähern. Bei einer Aluminiumabscheidung von 50 % des verwertbaren Aluminiums aus der Verbrennungsasche würde der Unterschied an erzielter KEA-Einsparung zwischen dem Grundmodell der Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung und dem soeben beschriebenen Modell nur noch ca. 5 % ausmachen (Abbildung 4-30).

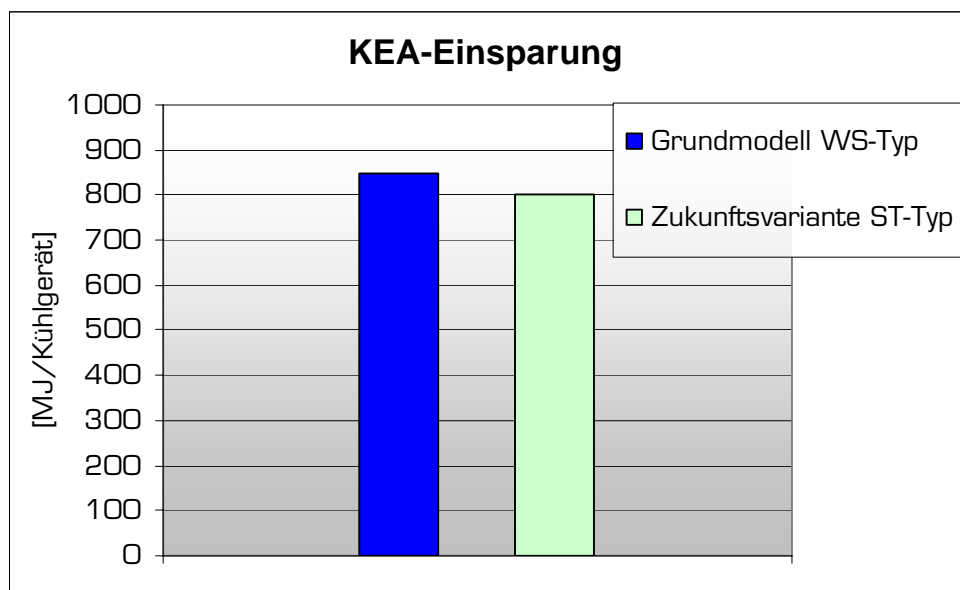


Abbildung 4-30: KEA-Einsparung für ein VOC-Gerät unter Berücksichtigung des nicht verwertbaren Aluminiums



5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieser Arbeit sollten technisch-naturwissenschaftliche Entscheidungsgrundlagen geschaffen werden, die es ermöglichen die zukünftige Behandlung von Alt-Kühlgeräten in Österreich gemäß den abfallwirtschaftlichen Zielen „Umweltschutz“ und „Ressourcenschonung“ optimal zu gestalten. Die derzeit in Österreich zur Verfügung stehenden Verfahrenstypen sollten dazu sowohl für den derzeitigen Anfall von Alt-Kühlgeräten als auch im Hinblick auf die Zusammensetzung zukünftiger Alt-Kühlgeräte hinsichtlich der Erfüllung oben angeführter Ziele betrachtet werden.

Seit 1995 werden in Österreich keine FCKW-haltigen Kühlgeräte mehr verkauft. In Zukunft werden daher immer mehr FCKW-freie Kühlgeräte zur Behandlung anfallen, wobei die VOC-Kühlgeräte den überwiegenden Anteil dieser Geräte ausmachen und ab 2020 beinahe ausschließlich solche Geräte behandelt werden müssen. Die durchschnittliche Zusammensetzung dieser beiden Kühlgerätetypen wurde ermittelt und als repräsentativer Input für die einzelnen Behandlungsverfahrenstypen herangezogen.

Die Grundmodelle der unterschiedlichen Verfahrenstypen wurden technisch-naturwissenschaftlich beschrieben und anhand von Systembildern dargestellt. Um geringfügige Verfahrensunterschiede innerhalb eines Typs, Unsicherheiten und Datenlücken berücksichtigen zu können, wurden auch Varianten der einzelnen Grundmodelle entworfen und betrachtet. Diese Varianten dienen auch zur Betrachtung von Auswirkungen unterschiedlicher Annahmen auf die Bilanzierungsergebnisse.

Um vergleichbare Bilanzen erstellen zu können, mussten für jede verwertete Fraktion Ersatzprodukte (gemäß Nutzengleichheit) bestimmt und dem jeweiligen Behandlungsmodell in der Verfahrensbilanz gutgeschrieben bzw. abgezogen werden. Der Vergleich der einzelnen Verfahrenstypen erfolgte anhand ausgewählter Kennwerte, welche ein Maß für die Erfüllung der abfallwirtschaftlichen Zielsetzungen darstellen. Die Beschreibung der Erreichung der Zielsetzung „Ressourcenschonung“ erfolgte durch die Bilanzierung des kumulierten Energieaufwandes (KEA) für die Verfahrensmodelle. Die Erfüllung des abfallwirtschaftlichen Zieles „Umweltschutz“ wurde anhand von Bilanzen der Emissionen an CO₂, FCKW, HCl und HF sowie der festen Abfälle betrachtet.

Die Resultate der Bilanzierungen für den KEA zeigen Vorteile für die Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung (WS-Typ) gegenüber den Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung (ST-Typ). Hauptsächlich ist das auf die effizientere Rückgewinnung der Metalle bei ersteren zurückzuführen. Eine ganz

wesentliche Rolle spielt in diesem Zusammenhang die Verwertung des Aluminiums im Kühlgerät. Aufgrund des enormen „ökologischen Rucksackes“ ist die Alu-Rückgewinnung ein entscheidender Faktor bei der Bilanzierung des Primärenergieverbrauches bzw. der Primärenergieeinsparung für die Behandlungsverfahren. Die stoffliche Verwertung der Nicht-Metall-Fraktionen (Polystyrol, PUR, ...) spielt dagegen für die Ressourceneinsparung kaum eine Rolle, hier ist in einigen Fällen eine direkte thermische Verwertung günstiger.

In punkto Ressourcenschonung schneiden die Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung gegenüber den Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung somit besser ab. Die Berücksichtigung der nicht verwertbaren Aluminiumanteile führt aber zu einer Annäherung der erzielten Ressourceneinsparung durch die jeweiligen Behandlungstypen. Für eine weitgehende Aluminiumverwertung ist nach dem derzeitigen Stand der Technik eine Aluminiumabscheidung aber trotzdem vor einer eventuellen Verbrennung vorzusehen.

Die Erfüllung der Zielsetzung „Umweltschutz“ wurde über die Bilanzierung der einzelnen Emissionen beurteilt. Dabei stellte sich für FCKW-Kühlgeräte heraus, dass vor allem Emissionen von FCKW ein bedeutendes Problem darstellen können. Durch den Ausstrag von FCKW über das PUR-Material (PUR-Mehl als Ölbindemittel und PUR-Anhaftungen an anderen Fraktionen) kommt es beim Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung zu einer viel massiveren Freisetzung von FCKW als beim Verfahrenstyp mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung. Insgesamt muss bei der Behandlung von FCKW-Kühlgeräten größter Wert darauf gelegt werden, sämtliche FCKW-Flüsse in die Atmosphäre zu minimieren. Da der Ausstoß an Ozon abbauenden Substanzen auch national am bedeutendsten ist (siehe Tabelle 4-40), sind die Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung besser zur Behandlung FCKW-haltiger Kühlgeräte geeignet.

Für VOC-Kühlgeräte ergibt sich hinsichtlich der Umweltfreundlichkeit eines Kühlgerätebehandlungsverfahrens ein etwas anderes Bild. Da keine FCKW in Kühlgeräten dieser Art vorhanden sind, spielen die Emissionen insgesamt nur noch eine untergeordnete Rolle. Die Bilanzen der einzelnen Emissionen ergeben sich großteils aufgrund der Vorkette durch das Behandlungsverfahren eingesparter bzw. verbrauchter Güter. Für die Bilanzierung der Emissionen tritt dadurch die Ressourcenschonung in den Vordergrund.

Die Bilanzierungsergebnisse der Grundmodelle der beiden Verfahrenstypen sind in Abbildung 5-1 anteilig am nationalen Verbrauch bzw. Ausstoß für Österreich im Überblick dargestellt. Die zugehörigen Tabellen zu dieser Grafik finden sich in Kapitel 4.2.



Für FCKW-haltige Kühlgeräte ist der Ausstoß an Ozon abbauenden Substanzen das wichtigste Kriterium hinsichtlich der Eignung eines Verfahrens zur Behandlung dieser Kühlgeräteart. Die Minimierung von FCKW-Emissionen im Zuge des Behandlungsverfahrens besitzt höchste Priorität. Deshalb sind die Modelle mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung besser zur Behandlung dieser Kühlgeräteart geeignet als die Modelle mit weitgehender stofflicher Verwertung.

Bei der Behandlung von VOC-Kühlgeräten tritt die Ressourcenschonung insgesamt in den Vordergrund, was hier zu einem besseren Abschneiden der Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung führt. Im nationalen Vergleich sowie bezogen auf den gesamten Lebenszyklus eines Kühlgerätes, sind die Unterschiede zwischen den beiden Verfahrenstypen aber kaum noch von Bedeutung. Ganz besonders gilt das, wenn auch die Unsicherheiten hinsichtlich der Verwertbarkeit eines gewissen Anteiles des Aluminiums (aluminiumbeschichteter Karton) in Betracht gezogen werden.

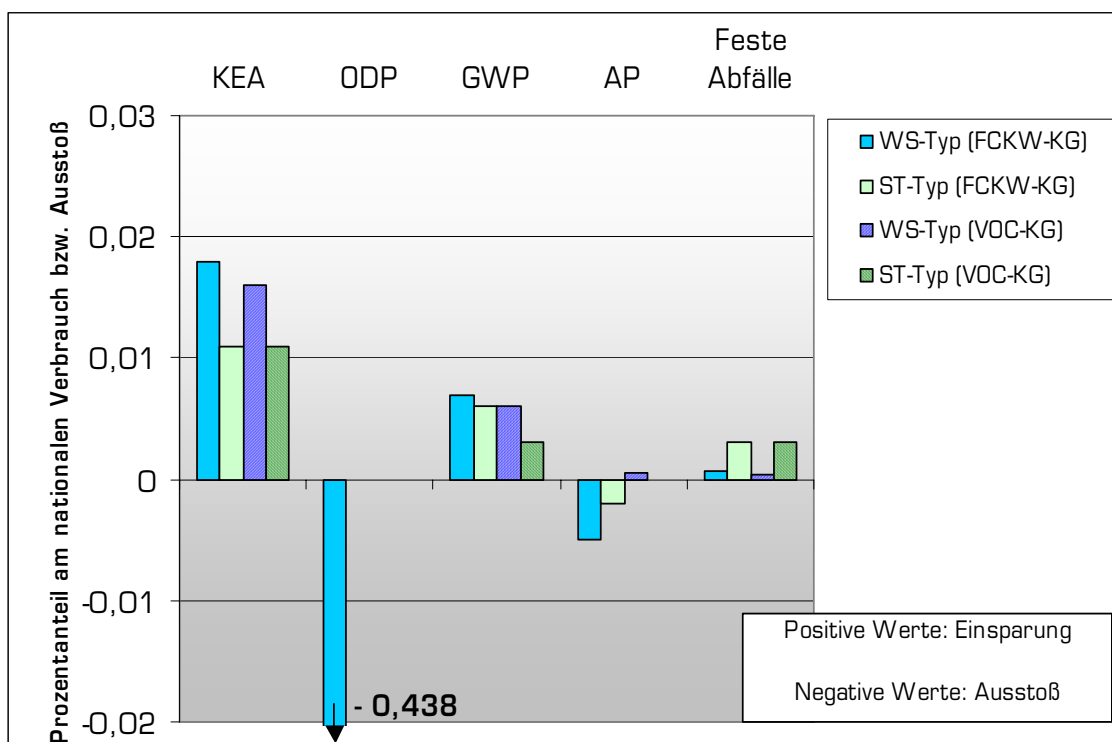


Abbildung 5-1: Darstellung der Bilanzierungsergebnisse ausgewählter Kennwerte bezogen auf den jeweiligen nationalen Verbrauch bzw. Ausstoß für Österreich

Ein optimales Kühlgerätebehandlungsverfahren hinsichtlich der abfallwirtschaftlichen Ziele „Ressourcenschonung“ und „Umweltschutz“ muss somit folgende Anforderungen erfüllen:

- Die Verwertung der Metalle muss mit maximaler Effizienz erfolgen, wobei vor allem der Rückgewinnung des Aluminiums große Bedeutung beizumessen ist.
- Die Ressourcenschonung durch die stoffliche Verwertung von Nicht-Metall-Fractionen ist anhand des jeweiligen Ersatzproduktes zu beurteilen. In vielen Fällen kann dabei kein Vorteil einer stofflichen gegenüber einer thermischen Verwertung festgestellt werden.
- Die Verwertung der PUR-Isolierung als Ölbindemittel ist für FCKW-Kühlgeräte generell abzulehnen. Es erfolgt dadurch praktisch keine Ressourcenschonung, da keine Primärrohstoffe sondern vor allem Abfälle ersetzt werden. Die FCKW-Emissionen, die durch den Austrag des PUR-Mehls hervorgerufen werden, stellen aber ein bedeutendes Umweltproblem dar. Für die PUR-Fraktion ist eine Verbrennung, bei der eine Zerstörung der FCKW erfolgt, vorzusehen. In jedem Fall sind auch FCKW-Freisetzen in die Atmosphäre vor dem Verbrennungsprozess zu minimieren.
- Anhaftungen von PUR-Isolierschaum an Outputfraktionen sind ebenfalls so gering wie möglich zu halten, da auch diese eine bedeutende Quelle von FCKW-Emissionen darstellen können.
- Bei der Behandlung von VOC-Kühlgeräten ist der optimale Verwertungsweg für die PUR-Fraktion die thermische Verwertung in einer MVA, da diese Option die maximale Ressourceneinsparung erzielt. Insgesamt rückt für die Behandlung zukünftiger Alt-Kühlgeräte die Zielsetzung „Ressourcenschonung“ immer stärker in den Vordergrund.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei der Behandlung von Kühlgeräten eine maximale stoffliche Verwertungsquote nicht unbedingt zu optimalen Lösungen im Sinne der Abfallwirtschaft führt. Aus den Ergebnissen dieser Arbeit wird deutlich, dass ein Kühlgerätebehandlungsverfahren mit geringerer stofflicher Verwertungsquote die Ziele „Ressourcenschonung“ und „Umweltschutz“ besser erfüllen kann, als ein Verfahren das auf eine maximale stoffliche Verwertung abzielt. Der jeweilige Verwertungsweg einer Outputfraktion muss anhand des Ersatzproduktes, welches den gleichen Nutzen erzielt und anhand der erzeugten Umweltwirkungen beurteilt werden. Auf dieser Basis sollte dann die Entscheidung zwischen stofflicher oder thermischer Verwertung getroffen werden. Die grundsätzliche Vorschreibung von stofflichen Verwertungsquoten ist daher kein Garant für ein optimales Behandlungsverfahren gemäß den Zielen der Abfallwirtschaft.



6 Literatur

AVE, 2003; Artikel: Neue Kühlgeräte-Recyclinganlage in Timelkam in Betrieb genommen, im Kunden-Magazin der AVE Entsorgung GmbH, Dezember 2003, Nr. 13.

Baehr H.D., 1989; Thermodynamik – Eine Einführung in die Grundlagen und ihre technische Anwendung, Siebente Auflage, Springer Verlag, Heidelberg.

BDE (Bundesverband der deutschen Entsorgungswirtschaft e.V.), 1995; Kreislaufwirtschaft in der Praxis – Nr.1 Elektroaltgeräte, Hrsg. ENTSORGA GmbH, Köln.

BIfA (Bayerisches Institut für Angewandte Umweltforschung und -technik GmbH), 2006; E-Mail vom 10.04.2006 „Kühlgeräte: Zusammensetzung nach Fraktionen“ von Christof Ziegler.

BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft), 2006; Bundesabfallwirtschaftsplan 2006, Lebensministerium, Wien.

Brunner P.H., Fehringer R., 1997; Kunststoffflüsse und Möglichkeiten der Kunststoffverwertung in Österreich, Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Wien.

Bundesverband Glasindustrie e.V., 2006; Informationen über die Verwertungswege von Alt-Flachglas per E-Mail vom 20.07.2006.

BUWAL, 2001; Kunststoffrecycling in der Schweiz, Positionspapier des BUWAL, Bern.

Corradini R., Hutter C., Köhler D., 1999; Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen, Studie erstellt durch die Forschungsstelle für Energiewirtschaft im Auftrag der Bayerischen Forschungstiftung, München.

di Chirico V., 1996; Müllverbrennungsanlagen, Schweizerische Rückversicherungsgesellschaft, Zürich.

Eberle U., 2000; Das Nachhaltigkeitszeichen: ein Instrument zur Umsetzung einer nachhaltigen Entwicklung? – Produktbeispiel Kühlgeräte, Dissertationsschrift an der Justus-Liebig-Universität, Gießen.

Fehrenbach H., Giegrich J., Schwarz M., 1997; Ökologische Bilanzen in der Abfallwirtschaft – Fallbeispiel: Verwertungswege von Haushaltskühlgeräten, Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu), Heidelberg.

Fernwärme Wien, 2006; E-Mail von Herrn Seitl vom 20.06.2006: Daten zum Kühlgerätebehandlungsverfahren der Fernwärme Wien.

Gabriel R., 2004; Ermittlung von Verwertungsquoten für Elektro- und Elektronikaltgeräte aus dem kommunalen Bereich der Stadt Wien, Endbericht der Studie im Auftrag der Magistratsabteilung 48 der Stadt Wien.

Gebhardt P., 2000; Stand der Technik bei der Rauchgasreinigung von Müllverbrennungsanlagen, erschienen in KGV-Rundbrief 1/2000 (Koordinationsstelle Genehmigungsverfahren), Darmstadt.

GMAG (Gerätschaften und Mittel zur Abwehr von Gewässergefährdungen), 2006; Telefongespräch vom 02.05.2006 mit Herrn Wunderlich, Leiter des Fachausschusses „Gerätschaften und Mittel zur Abwehr von Gewässergefährdungen“.

GÖC (Gemeinschaft der Hersteller geprüfter Öl- und Chemikalienbindemittel), 2006; Telefongespräch vom 02.05.2006 mit Herrn Scheidemann.

Guineé J., Gorrèe M., Heijungs R., Huppès G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Sleeswijk A.W., Suh S., de Haehs H.A.U., de Bruijn H., van Duin R., Huijbregts M.A.J., Lindeijer E., Roorda A.A.H., van der Ven B.L., Weidema B.P., 2001; Life cycle assessment – An operational guide to the Iso standards. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment and Centre of Environmental Science – Leiden University.

Harant M., 2001; Verwertung von Elektro- und Elektronikaltgeräten, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg.

Hornberger M., Janusz G., 2005; Analyse der Verwertungswege von kohlenwasserstoffgeschäumten Kühlgeräten, Studie mit Anhang erstellt am Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung im Auftrag des Zentralverbandes Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI), Frankfurt/Main.

Hug E., 2006; Mitteilung über die durchschnittliche Zusammensetzung von Kühlgeräten, Roos und Partner, Luzern.



Hug E., Hofstetter P., Nagel R. und Grasser Ch., 1995; Bewertung verschiedener Entsorgungsverfahren FCKW-haltiger Abfälle am Beispiel der Boilerentsorgung in der Schweiz, Studie im Auftrag der S.EN.S (Stiftung Entsorgung Schweiz), Oberkirch.

Hug-engineering, 2006; Informationen zum FCKW-Hochtemperaturspaltverfahren von der Homepage der Fa. Hug-engineering: <http://www.hug-engineering.de/>.

Institut für Umweltanalytik und Anlagenmesstechnik, 1995; Prüfbericht: Messen der Emissionen an R11 und R12 im Rauchgas aus der Drehrohrfeuerung in Simmering im Zuge von Versuchen zur thermischen Verwertung von Kühlschränken, Wien.

Jorde T., 1997; Ökologisch-ökonomischer Vergleich von Verfahren der Kühlschrankentsorgung in Österreich, Bericht erstellt durch das Österreichische Ökologie-Institut, Wien.

Kammer C., 2002; Aluminiumtaschenbuch 1 – Grundlagen und Wertstoffe, 16. Auflage, Aluminium-Verlag, Düsseldorf.

Koellner W., Fichtler W., 1996; Recycling von Elektro- und Elektronikschrott, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Land Steiermark, 2003; Kühlgeräteentsorgung in der Steiermark, Bericht erstellt durch die Fachabteilung 19D „Abfall- und Stoffflusswirtschaft“, Steiermark.

MA 48 (Magistratsabteilung 48 der Stadt Wien), 1996; „Kühlgeräteentsorgung – Metallrückgewinnung“ Bericht der Magistratsabteilung 48, Wien.

MA 48, 2006; E-Mail von Herrn Lassy vom 21.07.2006: Spezifischer Energieverbrauch der Schlacke-Sortieranlage in der Abfallbehandlungsanlage Rinterzelt in Wien.

NASA, 2006; Bilder, Daten und Informationen zur NASA-Ozonlochbeobachtung auf der Internetseite: <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>

Neubacher F., Stoiber H., Dornhofer Ch. und Scheidl K., 2003; „Restmüllbehandlung - Select 2004“, Endbericht der Studie im Auftrag der ARGEV Verpackungsverwertungs-GesmbH, Wien.

Obernosterer R., Neumayer St., Daxbeck H., 2001; Machbarkeitsstudie – Entsorgung der FCKW Altlasten, Endbericht der Studie im Auftrag des BMLUFW, Wien.

Öko-Institut, 1999; Institut für angewandte Ökologie: Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme Version 4.3 (Download: <http://www.oeko.de/service/gemis/>).

Öko-Institut, 2000; Angaben in ProBas (Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente), Datenbank des Umweltbundesamtes Deutschland (<http://www.probas.umweltbundesamt.de>). Datenquelle: Öko-Institut.

Patel M., 1999; KEA für Produkte der organischen Chemie, Studie erstellt am Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe.

Plastics Europe, 2005; Angaben in ProBas (Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente), Datenbank des Umweltbundesamtes Deutschland (<http://www.probas.umweltbundesamt.de>).

Pretz Th. und Meier-Kortwig J., 2000; Aufbereitung von Müllschlacken unter besonderer Berücksichtigung der Metallrückgewinnung, Zeitschrift: Aufbereitungstechnik, Heft Nr.3/2000, Gütersloh.

Puren GmbH, 2006; Informationen zum Heizwert von Polyurethan, Internetseite: <http://www.puren.com/>.

RAL, 2003; Güte- und Prüfbestimmungen: Rückproduktion von FCKW-haltigen Kühlgeräten, RAL Gütegemeinschaft, Orscholz.

RAL, 2005; Erzielte Recycling- und Verwertungsquoten für Kühl- und Gefriergeräte, Kurzbericht von Gabriel R. zur Monitoringstudie auf der Anlage der AVE in Timelkam im Jänner 2005.

RCN Chemie GmbH, 2006; E-Mail von Herrn Bojic vom 04.05.2006: Informationen bezüglich des FCKW-Reinigungsverfahrens der Fa. RCN Chemie GmbH in Goch, Deutschland.

RECOOL, 2006; E-Mail von Herrn Peter Schelenz vom 20.06.2006 und Informationen auf der Internetseite <http://www.recool.de>



S.EN.S (Stiftung Entsorgung Schweiz), 2000; Grundlagen und Systembetrachtungen zur umweltverträglichen Entsorgung von VOC-haltigen Geräten, Stiftung Entsorgung Schweiz, Zürich.

Salhofer S., Schneider F., Wassermann G., 2002; Ökologische Relevanz der Transportlogistik in der Abfallwirtschaft, in Waste Reports Nr. 10, 2002, Hrsg. Lechner P., ABF BOKU, Wien.

Sander K., Bünemann A., Zangl S., Bartnik S., 2004; Ermittlung von Verwertungskoeffizienten für die Fraktionen und Bauteile zur Dokumentation von Quoten auf der Basis von Artikel 7 der EU-Richtlinie zur Verwertung von Elektroaltgeräten (WEEE), Umweltbundesamt Deutschland, Berlin.

Schachermayer E., Bauer G., Ritter E., Brunner P.H., Maderner W., 1995; Messung der Güter- und Stoffbilanzen einer Müllverbrennungsanlage, Umweltbundesamt Wien

SEG, 2006; Informationen und Broschüren über das System SEG auf der Homepage: <http://www.seg-online.de>.

Statistik Austria, 2006; Statistische Übersichten – Hauptdaten der Energiebilanzen, Informationen auf der Internetseite: www.statistik.at.

Stubenvoll J., Böhmer S. und Szednyj I., 2002; Stand der Technik bei Abfallverbrennungsanlagen, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

Technologisches Gewerbemuseum (Staatlich autorisierte Versuchsanstalt für Kunststofftechnik), 1993; Gutachten über FCKW-Restmengen in PU-Schaum, Wien.

UBA (Umweltbundesamt), 2006; Emissionstrends 1990 – 2004, Umweltbundesamt GmbH, Wien.

Truttmann N. und Rechberger H., 2006; "Contribution to resource conservation by reuse of electrical and electronic household appliances", Journal of Resources, Conservation & Recycling, Vol. 48, 3, p. 249-262.

Umweltbundesamt Deutschland, 2004; Liste der geprüften Ölbinder, erstellt durch den Beirat beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Lagerung und Transport wassergefährdender Stoffe (LTwS).

VOEST-ALPINE Stahl, 2006; E-Mail vom 02.08.2006 von Herrn Prammer (Voestalpine Stahl GmbH) bezüglich der Qualitätsunterschiede zwischen Eisen aus Verbrennungsschlacken und unverbranntem Eisen.

Winkler, 1996; „Kühlgeräteentsorgung – Metallrückgewinnung“, Bericht der Magistratsabteilung 48, Wien.

ZAUG Recycling GmbH, 2006; Beschreibung der Kühlgeräterecyclingtechnologie der ZAUG Recycling GmbH, übermittelt im April und im Juni 2006.

ZVEI (Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.), 1998; Entsorgung von Haushalt-Kältegeräten in Deutschland, Information des Fachverbandes Elektro-Haushalt-Großgeräte im ZVEI, Frankfurt am Main.



7 Danksagung

Für die konstruktive Zusammenarbeit im Zuge dieser Studie gebührt Herrn Ing. Lassy und Herrn Wagner von der MA 48 sowie Herrn Ing. Seidl von der Fernwärme Wien besonderer Dank. Den Teilnehmern an den verschiedenen Projektsprechungen sei ebenfalls für ihre Beiträge und Anregungen gedankt.

An dieser Stelle möchten wir uns auch bei den beiden Anlagenbetreibern ZAUG Recycling und RECOOL für die bereitwillige Erteilung von Auskünften bedanken.

Die Stiftungsprofessur „Ressourcenmanagement“ an der TU Wien wird unterstützt von der Altstoff Recycling Austria AG (www.ara.at).



8 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

8.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Entwicklung der Anteile zu entsorgender Arten von Alt-Kühlgeräten (S.EN.S, 2000)	7 -
Abbildung 3-2: Systembild des Grundmodells der Verfahren mit weitestgehender stofflicher Verwertung	11 -
Abbildung 3-3: Darstellung der Material- und Energieflüsse für das Grundmodell des Systems mit weitestgehender stofflicher Verwertung	12 -
Abbildung 3-4: Systembild des Grundmodells der Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung	16 -
Abbildung 3-5: Darstellung der Material- und Energieflüsse für das Verfahren mit stofflicher und thermischer Verwertung FCKW-haltiger Alt-Kühlgeräte	17 -
Abbildung 3-6: Materialströme für das Aufbereitungsverfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung für VOC-Geräte	19 -
Abbildung 3-7: Darstellung der Stoffflüsse des Grundmodells der Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung von VOC-Geräten	21 -
Abbildung 3-8: Schematische Darstellung der energetischen Verfahrensbilanzierung	22 -
Abbildung 3-9: Exemplarische Ermittlung der Gutschrift für die Recyclingfraktion "Aluminiumschrott"	22 -
Abbildung 4-1: Erzielter Energiegewinn der Verfahrensmodelle des WS-Typs für FCKW-Geräte	33 -
Abbildung 4-2: Erzielter Energiegewinn der Verfahrensmodelle des ST-Typs für FCKW-Geräte	36 -
Abbildung 4-3: Energiegewinn der Verfahrensmodelle des WS-Typs für VOC-Geräte	38 -
Abbildung 4-4: Erzielter Energiegewinn der Verfahrensmodelle des ST-Typs für VOC-Geräte	39 -
Abbildung 4-5: Reduktion der CO ₂ -Emissionen durch die Behandlung eines FCKW-Kühlgerätes nach den Modellen des WS-Typs	43 -
Abbildung 4-6: Reduktion der CO ₂ -Emissionen durch die Behandlung eines FCKW-Kühlgerätes nach den Modellen des ST-Typs	46 -
Abbildung 4-7: CO ₂ -Einsparung der verschiedenen Modelle des WS-Typs für VOC-Geräte	47 -
Abbildung 4-8: CO ₂ -Einsparung der verschiedenen Modelle des ST-Typs für VOC-Geräte	48 -
Abbildung 4-9: FCKW-Flüsse für Szenario 1 des Grundmodells des WS-Typs	51 -
Abbildung 4-10: FCKW-Flüsse für das Grundmodell des ST-Typs	52 -
Abbildung 4-11: FCKW-Bilanzen für die ausgewählten Modelle der beiden Verfahrenstypen	53 -
Abbildung 4-12: Gesamtemissionen an HCl für die Verfahrensmodelle des WS-Typs	56 -
Abbildung 4-13: Gesamtemissionen an HCl für die Verfahrensmodelle des ST-Typs	57 -

Abbildung 4-14: Gesamtemissionen an HCl für die Verfahrensmodelle des WS-Typs für VOC-Geräte.....	- 58 -
Abbildung 4-15: Gesamtemissionen an HCl für die Verfahrensmodelle des ST-Typs für VOC-Geräte.....	- 60 -
Abbildung 4-16: Gesamtemissionen an HF für die Verfahrensmodelle des WS-Typs	- 62 -
Abbildung 4-17: Gesamtemissionen an HF für die Verfahrensmodelle des ST-Typs	- 63 -
Abbildung 4-18: Gesamtemissionen an HF für die Verfahrensmodelle des WS-Typs für VOC-Geräte.....	- 64 -
Abbildung 4-19: Gesamtemissionen an HF für die Verfahrensmodelle des ST-Typs für VOC-Geräte.....	- 65 -
Abbildung 4-20: Feste Abfälle der verschiedenen Behandlungsmodelle	- 68 -
Abbildung 4-21: Feste Abfälle der Behandlungsmodelle für VOC-Altkülgeräte.....	- 69 -
Abbildung 4-22: Verminderung des Treibhauspotentials durch Verfahrensmodelle des WS-Typs für FCKW-Kühlgeräte.....	- 70 -
Abbildung 4-23: Verminderung des Treibhauspotentials durch Verfahrensmodelle des ST-Typs für FCKW-Kühlgeräte	- 71 -
Abbildung 4-24: Verminderung des GWP durch die Verfahrensmodelle der beiden Behandlungstypen für VOC-Kühlgeräte	- 71 -
Abbildung 4-25: Beitrag zum Versauerungspotential durch die Verfahrensmodelle des WS-Typs für FCKW-Kühlgeräte.....	- 72 -
Abbildung 4-26: Beitrag zum Versauerungspotential durch die Verfahrensmodelle des ST-Typs für FCKW-Kühlgeräte	- 72 -
Abbildung 4-27: Beitrag zum Versauerungspotential durch die Verfahrensmodelle der beiden Behandlungstypen für VOC-Kühlgeräte	- 73 -
Abbildung 4-28: KEA-Einsparung für die Grundmodelle der beiden Verfahrenstypen	- 74 -
Abbildung 4-29: KEA-Einsparung der Grundmodelle der beiden Behandlungstypen im Vergleich zum Gesamtenergieverbrauch eines Kühlgerätes über den gesamten Lebenszyklus.....	- 75 -
Abbildung 4-30: KEA-Einsparung für ein VOC-Gerät unter Berücksichtigung des nicht verwertbaren Aluminiums.....	- 84 -
Abbildung 5-1: Darstellung der Bilanzierungsergebnisse ausgewählter Kennwerte bezogen auf den jeweiligen nationalen Verbrauch bzw. Ausstoß für Österreich	- 87 -



8.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Entwicklung der Kältemittel- sowie der Isolier- und Treibgasmengen pro Durchschnittskühlgerät (ZVEI, 1998)	6 -
Tabelle 3-2: Statistische Auswertung der Quellen über die Zusammensetzung eines FCKW-haltigen Alt-Kühlgerätes (Verwendete Quellen in Tabelle 9-1).....	7 -
Tabelle 3-3: Darstellung der ermittelten durchschnittlichen Zusammensetzung eines FCKW-haltigen Kühlgerätes (Medianwerte aus Tabelle 3-2 wurden herangezogen).....	8 -
Tabelle 3-4: Durchschnittliche Zusammensetzung eines Neu-VOC-Kühlgerätes (Quelle: Miele, 2003 zitiert in Hug, 2006 und in Sander et al., 2004)	8 -
Tabelle 3-5: Zur Ermittlung des Umrechnungsfaktors verwendete Ölbindemittel der Kategorie III R	25 -
Tabelle 4-1: Gutschriften aufgrund der stofflichen Verwertung von Outputfraktionen aus dem Grundmodell des WS-Typs.....	29 -
Tabelle 4-2: Gutschriften aufgrund der thermischen Verwertung von Outputfraktionen aus dem Grundmodell des WS-Typs	30 -
Tabelle 4-3: Gutschriften für die Spaltprodukte aus der FCKW-Hochtemperaturspaltung beim Grundmodell des WS-Typs	31 -
Tabelle 4-4: Abzüge für den Energieverbrauch der einzelnen Behandlungsschritte beim Grundmodell des WS-Typs.....	31 -
Tabelle 4-5: Abzüge aufgrund des Verbrauches an Hilfsmitteln beim Grundmodell des WS-Typs	32 -
Tabelle 4-6: Bilanzierungsergebnisse für die Varianten des WS-Typs.....	32 -
Tabelle 4-7: Gutschriften bei der Bilanzierung des Grundmodells des ST-Typs	34 -
Tabelle 4-8: Abzüge bei der Bilanzierung des Grundmodells des ST-Typs	35 -
Tabelle 4-9: Bilanzierungsergebnisse für die Modellvarianten des ST-Typs	35 -
Tabelle 4-10: Energiebilanzen der verschiedenen Behandlungsmodelle des WS-Typs für VOC-Geräte.....	37 -
Tabelle 4-11: Energiebilanzen für die Verfahrensmodelle des ST-Typs für VOC-Geräte.....	38 -
Tabelle 4-12: CO ₂ -Einsparung durch stoffliche Verwertung beim Grundmodell des WS-Typs	41 -
Tabelle 4-13: CO ₂ -Einsparung durch therm. Verwertung beim Grundmodell des WS-Typs	41 -
Tabelle 4-14: CO ₂ -Einsparung durch Spaltprodukte aus der FCKW-Vernichtung beim Grundmodell des WS-Typs.....	42 -
Tabelle 4-15: Direkter Ausstoß an CO ₂ im Zuge des Grundmodells des WS-Typs.....	42 -
Tabelle 4-16: Indirekte CO ₂ -Emissionen beim Grundmodell des WS-Typs	42 -
Tabelle 4-17: CO ₂ -Bilanzierungsergebnisse für die Modellvarianten des WS-Typs.....	43 -
Tabelle 4-18: CO ₂ -Bilanz für das Grundmodell des ST-Typs.....	44 -
Tabelle 4-19: CO ₂ -Bilanzierungsergebnisse für die Modellvarianten des ST-Typs	46 -
Tabelle 4-20: CO ₂ -Bilanzierungsergebnisse für die Modelle des WS-Typs für VOC-Geräte ...	47 -
Tabelle 4-21: CO ₂ -Bilanzierungsergebnisse für die Modelle des ST-Typs für VOC-Geräte	48 -

Tabelle 4-22: Szenarien zur FCKW-Freisetzung im Zuge des Grundmodells des WS-Typs	50 -
Tabelle 4-23: Gesamte FCKW-Emissionen der Modellvarianten des WS-Typs.....	51 -
Tabelle 4-24: HCl-Freisetzung aufgrund der Verbrennung von FCKW-haltigem PUR-Schaum für die Verfahrensmodelle des WS-Typs.....	54 -
Tabelle 4-25: Ergebnisse der HCl-Bilanzierung für die Modelle des WS-Typs (ohne HCl aus FCKW-Verbrennung (Tabelle 4-24)).....	55 -
Tabelle 4-26: Gesamtbilanz für die HCl-Emissionen der Verfahrensmodelle des WS-Typs	55 -
Tabelle 4-27: Ergebnisse der Bilanzierung der HCl-Emissionen für die Verfahrensmodelle des ST-Typs.....	57 -
Tabelle 4-28: Bilanzierungsergebnisse für die HCl-Emissionen der Verfahrensmodelle des WS-Typs für VOC-Geräte	58 -
Tabelle 4-29: Bilanzierungsergebnisse für die HCl-Emissionen der Verfahrensmodelle des ST-Typs für VOC-Geräte.....	59 -
Tabelle 4-30: HF-Freisetzung aufgrund der Verbrennung von FCKW-haltigem PUR-Schaum für die Verfahrensmodelle des WS-Typs.....	61 -
Tabelle 4-31: Ergebnisse der HF-Bilanzierung für die Modelle des WS-Typs (ohne HF aus FCKW-Verbrennung).....	61 -
Tabelle 4-32: Gesamtbilanz für die HF-Emissionen der Verfahrensmodelle des WS-Typs ...	61 -
Tabelle 4-33: Gesamtbilanz für die HF-Emissionen der Verfahrensmodelle des ST-Typs.....	63 -
Tabelle 4-34: Gesamtbilanz der HF-Emissionen der Verfahrensmodelle des WS-Typs für VOC-Geräte.....	64 -
Tabelle 4-35: Gesamtbilanz der HF-Emissionen der Verfahrensmodelle des ST-Typs für VOC-Geräte.....	65 -
Tabelle 4-36: Feste Abfälle aus dem Grundmodell des WS-Typs	66 -
Tabelle 4-37: Feste Abfälle aus dem Grundmodell des ST-Typs.....	67 -
Tabelle 4-38: Feste Abfälle der Modellvarianten des ST-Typs.....	67 -
Tabelle 4-39: Feste Abfälle der Modelle des ST-Typs für VOC-Geräte	69 -
Tabelle 4-40: Anteilige Darstellung der Bilanzierungsergebnisse (FCKW-Kühlgeräte) an den nationalen Emissionen bzw. am nationalen Bedarf des bilanzierten Gutes	76 -
Tabelle 4-41: Anteilige Darstellung der Bilanzierungsergebnisse (VOC-Kühlgeräte) an den nationalen Emissionen bzw. am nationalen Bedarf des bilanzierten Gutes	80 -
Tabelle 9-1: Verwendete Literaturwerte zur stofflichen Zusammensetzung von FCKW-haltigen Alt-Kühlgeräten	9-1
Tabelle 9-2: Auflistung des kumulierten Energieaufwandes und der Luftemissionen zur Bereitstellung bestimmter Güter.....	9-2
Tabelle 9-3: Heizwerte und CO ₂ -Emissionen der verschiedenen Brennmaterialien	9-3
Tabelle 9-4: Energiebedarf einzelner Prozessschritte der verschiedenen Behandlungsverfahren	9-4
Tabelle 9-5: Stoffbilanz für das FCKW-Hochtemperaturspaltverfahren	9-5
Tabelle 9-6: Massenmäßige Aufteilung des Kunststoffes in die einzelnen Verbrennungsprodukte	9-6



Tabelle 9-7: Ozonabbau Potentiale in kg R11-Äquivalent	9-6
Tabelle 9-8: Treibhauspotentiale in kg CO ₂ -Äquivalent.....	9-6
Tabelle 9-9: Versauerungspotentiale in kg SO ₂ -Äquivalent	9-6
Tabelle 9-10: Nationale Zahlen für Österreich über ausgewählte Emissionen bzw. Güterverbrauche.....	9-7
Tabelle 9-11: Bilanzunterschiede der Verfahrensvarianten zum Grundmodell des WS- Typs	9-8
Tabelle 9-12: Bilanzunterschiede der Verfahrensvarianten zum Grundmodell des ST- Typs	9-10
Tabelle 9-13: CO ₂ -Bilanzierungsunterschiede der Modellvarianten zum Grundmodell des WS-Typs	9-12
Tabelle 9-14: CO ₂ -Bilanzierungsunterschiede der Modellvarianten zum Grundmodell des ST-Typs	9-13
Tabelle 9-15: Vom Grundmodell abweichende FCKW-Emissionen der Modellvarianten WS-Typs	9-14
Tabelle 9-16: HCl- und HF-Emissionen aufgrund der Verbrennung von FCKW aus dem Isolierschaum von Kühlgeräten (Szenarien für das Grundmodell des WS-Typs)	9-15
Tabelle 9-17: HCl- und HF-Emissionen aufgrund der Verbrennung von FCKW aus dem Isolierschaum von Kühlgeräten (Varianten – WS-Typ)	9-16
Tabelle 9-18: HCl-Bilanz für das Grundmodell des WS-Typs	9-17
Tabelle 9-19: HCl-Teilbilanzen für die vom Grundmodell abweichenden Verfahrensteile der Varianten des WS-Typs	9-18
Tabelle 9-20: HCl-Gesamtbilanz für das Grundmodell des ST-Typs	9-19
Tabelle 9-21: HCl-Teilbilanzen für die Modellvarianten des ST-Typs	9-20
Tabelle 9-22: Bilanzierung der HF-Emissionen für das Grundmodell des WS-Typs	9-21
Tabelle 9-23: Teilbilanzierungen der HF-Emissionen für die Modellvarianten des WS- Typs	9-22
Tabelle 9-24: Bilanzierung der HF-Emissionen für das Grundmodell des ST-Typs	9-23
Tabelle 9-25: Teilbilanzierungen der HF-Emissionen für die Modellvarianten des ST-Typs ...	9-24
Tabelle 9-26: Feste Abfälle der Verfahrensvariante "PUR+Reststoffe" des WS-Typs	9-25
Tabelle 9-27: Feste Abfälle der Verfahrensvarianten des ST-Typs	9-25
Tabelle 9-28: Bilanzierung des Grundmodells der Verfahren des WS-Typs für VOC- Kühlgeräte.....	9-26
Tabelle 9-29: Bilanzierung der Modellvarianten des WS-Typs für VOC-Kühlgeräte	9-27
Tabelle 9-30: Bilanzierung des Grundmodells des ST-Typs für VOC-Kühlgeräte	9-29
Tabelle 9-31: Bilanzierung der Modellvarianten des ST-Typs für VOC-Kühlgeräte.....	9-30
Tabelle 9-32: CO ₂ -Bilanz des Grundmodells des WS-Typs für VOC-Kühlgeräte	9-32
Tabelle 9-33: CO ₂ -Teilbilanzen für die Modellvarianten des WS-Typs für VOC-Kühlgeräte ...	9-33
Tabelle 9-34: CO ₂ -Bilanz des Grundmodells des ST-Typs für VOC-Kühlgeräte	9-34
Tabelle 9-35: CO ₂ -Teilbilanzen für die Modellvarianten des ST-Typs für VOC-Kühlgeräte.....	9-35
Tabelle 9-36: Bilanz der HCl-Emissionen für das Grundmodell des WS-Typs für VOC- Geräte	9-36

Tabelle 9-37: Bilanzierung der vom Grundmodell abweichenden Verfahrensteile für die HCl-Emissionen der Modellvarianten des WS-Typs für VOC-Geräte.....	9-37
Tabelle 9-38: Bilanzierung der HCl-Emissionen für das Grundmodell des ST-Typs für VOC-Geräte.....	9-38
Tabelle 9-39: HCl-Bilanz für die, vom Grundmodell abweichenden, Verfahrensteile der Modellvarianten des ST-Typs für VOC-Geräte	9-39
Tabelle 9-40: Bilanzierung der HF-Emissionen für das Grundmodell des WS-Typs für VOC-Geräte.....	9-40
Tabelle 9-41: HF-Teilbilanzen für die Modellvarianten des WS-Typs für VOC-Geräte	9-41
Tabelle 9-42: Bilanzierung der HF-Emissionen für das Grundmodell des ST-Typs für VOC-Geräte.....	9-42
Tabelle 9-43: HF-Teilbilanzen für die Modellvarianten des ST-Typs für VOC-Geräte.....	9-43
Tabelle 9-44: Feste Abfälle des Grundmodells des WS-Typs für VOC-Geräte	9-44
Tabelle 9-45: Feste Abfälle der Modellvariante "PUR+Reststoffe" des WS-Typs für VOC- Geräte	9-44
Tabelle 9-46: Feste Abfälle des Grundmodells des ST-Typs für VOC-Geräte.....	9-45
Tabelle 9-47: Feste Abfälle der Modellvarianten des ST-Typs für VOC-Geräte	9-45



9 Anhang

9.1 Zusammensetzungen von FCKW-haltigen Alt-Kühlgeräten

Tabelle 9-1: Verwendete Literaturwerte zur stofflichen Zusammensetzung von FCKW-haltigen Alt-Kühlgeräten

(Quellen: [1] BlfA, 2006; [2] bvse, 1998 zitiert in Harant, 2001; [3] Fehrenbach et al., 1997; [4] BDE, 1995; [5] Hug, 2006; [6] Hofstetter, 1996 zitiert in Hug, 2006; [7] ZVEI, 1998; [8] Koellner et al., 1996; [9] Gabriel, 2004 und MA 48, 1996;)

Alle Angaben in Gewichts%	[1]	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]
Eisen	53,03	43,8	43	42	33,04	44,35	52	52	42,89	36
NE-Metalle	4,2	7,2	7	6,6	5,48	4,49	6,74	4	5,86	12
Kunststoff	15,08	33,8	34	14,75	24,58*	15,18	18,39	11	14,61	13
Glas	0,87	2,2	2,5*		2,18	3,47	2,89		1,7	0,5
Öl			0,5*	0,6		1,04	0,46		0,7	2
PUR-Schaum	8,97	11,1	11	8	10*	10,54	6,45	10	10,49	8
FCKW (Summe)	1,3		1	0,8		0,9			0,8	
Reststoffe	2,5	1		7	7,56	1,16	0,96	6	1,6	3,5
Elektrotechnik	0,53	1,3	1*	1,9	*	0,35	0,29		0,6	
Kompressor	24,7			20	17,16*	18,52	11,56	17	20,5	25
Gewicht [kg]				41				45	41,1	40

* Fraktionszuteilung wurde anhand von Durchschnittswerten vorgenommen

9.2 Bilanzierung

9.2.1 Grundlagen

Tabelle 9-2: Auflistung des kumulierten Energieaufwandes und der Luftemissionen zur Bereitstellung bestimmter Güter

(Quellen: [1] Öko-Institut, 2000; [2] Corradini R. et al., 1999; [3] Patel M., 1999; [4] Plastics Europe, 2005; [5] Öko-Institut, 1999;)

Gut	KEA [MJ/t]	CO ₂ [kg/kg]	HCl [kg/kg]	HF [kg/kg]	AP [kg SO ₂ -Äquivalent/kg]	GWP [kg CO ₂ -Äquivalent/kg]	Quellen	Anmerkung
Metalle								
Primär-Aluminium	196960	12,4	0,000287	62,1 * 10 ⁻⁶	0,0511	14,5	[1]	Ortsbezug: DE
Sekundär-Aluminium	27514	1,61	27,7 * 10 ⁻⁶	4,67 * 10 ⁻⁶	0,00452	1,79	[1]	Ortsbezug: DE
Oxygenstahl	18696	1,6	880 * 10 ⁻⁹	-68,2 * 10 ⁻⁹	0,00587	1,84	[2] KEA; [1] Luftemissionen	Ortsbezug: DE
Elektrostahl	8691	0,514	7,23 * 10 ⁻⁶	496 * 10 ⁻⁹	0,00107	0,556	[2] KEA; [1] Luftemissionen	Ortsbezug: DE
Primär-Kupfer	71484	5,56	0,000848	82,4 * 10 ⁻⁶	0,0405	5,96	[1]	Ortsbezug: DE
Sekundär-Kupfer	27780	1,88	23,8 * 10 ⁻⁶	1,39 * 10 ⁻⁶	0,00748	2,07	[1]	Ortsbezug: DE
Sonstige								
Flachglas	14360	1,07	3,15 * 10 ⁻⁶	287 * 10 ⁻⁹	0,00556	1,14	[2] KEA; [1] Luftemissionen	Ortsbezug: DE
Holzrohstoff	304	-	-	-	-	-	[1]	
Schnittholz	7184*	-	-	-	-	-	[2]	* [MJ/m ³]; Ortsbezug: DE
Flusssäure (HF)	-4627	-0,473	-80,1 * 10 ⁻⁶	0,000247	0,0117	-0,553	[1]	
Salzsäure (HCl)	17300	1,18	89 * 10 ⁻⁶	2,91 * 10 ⁻⁶	k.A.	4,56	[3] KEA; [4] Luftemissionen	
O ₂ (gasförmig)	1197	0,0681	1,94 * 10 ⁻⁶	141 * 10 ⁻⁹	96,3 * 10 ⁻⁶	0,0718	[1]	
H ₂	152789	8,3	0,000018	1,33 * 10 ⁻⁶	0,00524	8,84	[1]	
N ₂	1200						[1]	



Fortsetzung Tabelle 9-2 :

Strom und Energieträger	KEA [MJ/MJ]	CO ₂ [kg/MJ]	HCl [kg/MJ]	HF [kg/MJ]	AP [kg SO ₂ -Äquivalent/MJ]	GWP [kg CO ₂ -Äquivalent/MJ]	Quellen	Anmerkung
Elektrischer Strom	2,993	0,17	4,84*10 ⁻⁶	352*10 ⁻⁹	241*10 ⁻⁶	0,18	[1]	Netz: DE
Öl schwer	1,14	0,0106	337*10 ⁻⁹	23,8*10 ⁻⁹	120*10 ⁻⁶	0,0113	[1]	Ortsbezug: AT
Erdgas (Pipeline)	1,132	0,006	77,5*10 ⁻⁹	5,9*10 ⁻⁹	22,9*10 ⁻⁶	0,099	[1]	Ortsbezug: DE
Wärme aus Gas		0,062	77,5*10 ⁻⁹	5,9*10 ⁻⁹			[1]	
Diesel (Tankstelle)	1,152						[1]	Ortsbezug: DE
Transport	KEA [MJ/tkm]	CO ₂ [kg/tkm]	HCl [kg/tkm]	HF [kg/tkm]	AP [kg SO ₂ -Äquivalent/tkm]	GWP [kg CO ₂ -Äquivalent/tkm]	Quellen	Anmerkung
LKW+Anhänger	1,5793	0,11612	490,9*10 ⁻⁹	40,56*10 ⁻⁹	863,99*10 ⁻⁶	0,1191	[5]	Ortsbezug: DE

Tabelle 9-3: Heizwerte und CO₂-Emissionen der verschiedenen Brennmaterialien

(Quellen: [1] Baehr H.D., 1989; [2] BUWAL, 2001; [3] Puren GmbH, 2006; [4] Eigene Berechnungen;)

Brennstoff	Heizwert [MJ/kg]	CO ₂ [kg/kg]	Quellen	Anmerkung
Öl schwer	40,5	3,079	[1]	Berechnung der CO ₂ -Emissionen über C-Anteil
Polystyrol	39,6	3,347	[2] Heizwert, [4]	Berechnung der CO ₂ -Emissionen über C-Anteil
Polyurethan	25	0,738	[3] Heizwert, [4]	Berechnung der CO ₂ -Emissionen über C-Anteil
Kunststofffraktion - Mitverbrennung	40	3,000	[4]	Hauptsächlich Polystyrol und Polypropylen
Kunststoffmischfraktion	30	3,000	[4]	Kunststoffgemisch

Tabelle 9-4: Energiebedarf einzelner Prozessschritte der verschiedenen Behandlungsverfahren

Angaben zu den Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung						
Prozess	Leistung [kW/h]	Laufzeit pro KG [min]	Energiebedarf pro KG [MJ]	Energieform	KEA [MJ/KG]	Quelle
Zerkleinerung und Sortierung						
Shredder	100	1,5	9,0	el. Strom	26,9	Fehrenbach et al., 1997
Überbandmagnet	1,2	1,5	0,1	el. Strom	0,3	
Zerkleinerungsmühle	90	1,5	8,1	el. Strom	24,3	
Entstaubungsanlage	18	1,5	1,6	el. Strom	4,8	
Magnetabscheider	1,2	1,5	0,1	el. Strom	0,3	
1. Windsichterstufe	13	1,5	1,2	el. Strom	3,6	
2. Windsichterstufe	3,37	1,5	0,3	el. Strom	0,9	
Nachzerkleinerung (Granulator)	3	1,5	0,3	el. Strom	0,8	
Sonstige (Wirbelstromabscheider, Schwimm-Sink Verfahren, ...)			0,2	el. Strom	0,6	Eigene Berechnung*
* Annahmen basieren auf Fehrenbach et al., 1997						
Prozessluftbehandlung (Aktivkohlefilter)						
Absaugung	7	1,5	0,6	el. Strom	1,9	Fehrenbach et al., 1997
Rückgewinnung (Pumpe, Motor)	0,9	0,2 bzw. 0,75	0,0	el. Strom	0,1	
Heißdampf-Desorption			11,5	Wärme aus Gas	14,2	
Prozessluftbehandlung (Cryokondensation)						
Absaugung	15	2	1,8	el. Strom	5,4	Fehrenbach et al., 1997
Kondensationsanlage und Vorkühlung	0,7	3**	0,0		0,1	
Erzeugung: Flüssiger Stickstoff			5,4	el. Strom	16,2	
Reaktivierung: Aktivkohle			0,1	el. Strom	0,1	
** Annahme: 20 Kühlgeräte pro Stunde						



Fortsetzung Tabelle 9-4:

Angaben zu den Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung						
Prozess	Leistung [kW/h]	Laufzeit pro KG [min]	Energiebedarf pro KG [MJ]	Energieform	KEA [MJ/KG]	Quelle
Zerkleinerung und Sortierung						
Shredder	180	1,2	12,96	el. Strom	38,8	Fernwärme Wien, 2006
Förderbänder	20	1,2	1,44	el. Strom	4,3	
Schlackesortierung			0,12	el. Strom	0,35	MA 48, 2006
Prozessluftbehandlung						
Absaugung	22	1,2	1,58	el. Strom	4,7	Fernwärme Wien, 2006
Anmerkungen:						
Bei der Verbrennung im Drehrohr wird der Energiebedarf über den Wirkungsgrad berücksichtigt!						
Für die Sortierung mit vollständiger Fe-Abscheidung wird der 1,5 fache Energieverbrauch angenommen (lt. MA 48, 2006).						
Angaben bezüglich des Verwertungs- bzw. Beseitigungsverfahrens für FCKW						
Prozess	Energieverbrauch pro kg FCKW [MJ]		Energieform	KEA [MJ/kg]	Quelle	
FCKW-Hochtemperaturspaltung	1,08		el. Strom	3,23	Hug-engineering, 2006	
Anmerkungen:						
FCKW-Reinigung wird vernachlässigt, da der Energiebedarf ohnehin sehr gering ist (lt. RCN Chemie GmbH, 2006).						

Tabelle 9-5: Stoffbilanz für das FCKW-Hochtemperaturspaltverfahren

(Quelle: Hug-engineering, 2006;)

Eingangsgrößen	[kg]	Ausgangsgrößen	[kg]
CCl ₂ F ₂	1000	CO ₂	364
O ₂	390	HF	330
H ₂	40	HCl	605
Brauchwasser	272	Rest (Abwasser und Chlor)	403
Energieinput:	[kWh]		
Elektrischer Strom	300		
Hilfsmaterialien:	[kg]		
Kühlwasser	250 000		
<p>Obige Angaben beziehen sich auf die Spaltung von R12, sie werden hier aber auch für die Spaltung von R11 verwendet, da für diese keine gesonderten Daten verfügbar waren.</p> <p>Spaltung R12: $\text{CCl}_2\text{F}_2 + \text{O}_2 + 2 \text{H}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{HF} + 2 \text{HCl}$;</p> <p>Spaltung R11: $\text{CCl}_3\text{F} + \text{O}_2 + 2 \text{H}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{HF} + 3 \text{HCl}$;</p>			

Tabelle 9-6: Massenmäßige Aufteilung des Kunststoffes in die einzelnen Verbrennungsprodukte

(Quellen: Schachermayer et al., 1995; Fehring und Brunner, 1997;)

Kunststoff (Verbrennung)	Rauchgas	Abwasser	Deponierte Rückstände		
			Filterasche	Filterkuchen	Schlacke
100%	92,10%	2,30%	1,80%	0,03%	3,80%

Aggregierte Emissionskennwerte

Tabelle 9-7: Ozonabbaupotentiale in kg R11-Äquivalent

Stoff	Ozonabbaupotential (ODP)	Quellen
R11 (CCl ₃ F)	1	Hug et al., 1995
R12 (CCl ₂ F ₂)	0,82	Guineé et al., 2001

Tabelle 9-8: Treibhauspotentiale in kg CO₂-Äquivalent

Stoff	Treibhauspotential (GWP) Zeithorizont 100 Jahre	GWP _{netto} * Zeithorizont 100 Jahre	Quellen
CO ₂	1	1	Guineé et al., 2001
R11 (CCl ₃ F)	4000	1510	Guineé et al., 2001
R12 (CCl ₂ F ₂)	8500	7000	Guineé et al., 2001

*Die Verminderung des Treibhauspotentials durch die Ozon abbauende Wirkung der FCKW wird berücksichtigt.

Tabelle 9-9: Versauerungspotentiale in kg SO₂-Äquivalent

Stoff	Versauerungspotential nach de Leeuw (AP)	Quellen
SO ₂	1	Guineé et al., 2001
HCl	0,88	Guineé et al., 2001
HF	1,60	Guineé et al., 2001



Tabelle 9-10: Nationale Zahlen für Österreich über ausgewählte Emissionen bzw. Güterverbräuche

	Wert	Einheit pro Jahr	Bezugsjahr	Quelle
Energieverbrauch für Österreich	1080	Petajoule	2004	Statistik Austria, 2006
ODP für Österreich (Berechnung über Lagerabbau von 1993 – 2023)	553,3	Tonnen R11-Äquivalente	1993 - 2023	Obernosterer et al., 2001
Treibhausgasemissionen in Österreich (GWP)	91,30	Millionen Tonnen CO ₂ -Äquivalente	2004	UBA, 2006
Versauernde Luftschadstoffe für Österreich	9500	Tonnen SO ₂ -Äquivalente	2004	UBA, 2006
Aluminiumverbrauch für Österreich (Basierend auf pro Kopf Angaben)	163500	Tonnen	n.b.	Kammer C., 2002
Anfall an festen Abfälle in Österreich	54	Millionen Tonnen	2004	BMLFUW, 2006
Anfall an Alt-Kühlgeräten in Österreich	214000	Stück	2000	Salhofer et al., 2002

9.2.2 Verfahrensmodelle für FCKW-Kühlgeräte

Energetische Bilanzierung

Varianten des Grundmodells des WS-Typs

Bei den folgenden Bilanzierungstabellen für die einzelnen Varianten werden jeweils nur die Änderungen gegenüber dem Grundmodell angeführt. Die Bilanzierung des Grundmodells ist in Kapitel 4.1.1.1 erläutert.

Tabelle 9-11: Bilanzunterschiede der Verfahrensvarianten zum Grundmodell des WS-Typs

Variante Cryokondensation (Energiebedarf siehe Tabelle 9-4)						
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]		Energieform		KEA [MJ/KG]
Prozessluftbehandlung		7,37		el. Strom		22,06
Variante mit geringerer Sortiereffizienz (Nur Verbrennung des Polystyrols in MVA)						
stoffliche Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/m³]	KEA [MJ/KG]
Polystyrol	7,03	2,88	keine	0	0	0
Variante mit Berücksichtigung der Mischfraktion PUR-Mehl (PUR+Fremdstoffe)						
stoffliche Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/m³]	KEA [MJ/KG]
PUR	20,45	8,38	Holzmehl	304		3,64
Fe-Fraktion	53,04	21,74	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	10005		217,53
Kupfer	2,8	1,15	Cu _{prim} - Cu _{sek}	43709		50,17
Aluminium	4,73	1,94	Al _{prim} - Al _{sek}	169446		328,54
Anmerkung: Die anteilmäßige Zusammensetzung des PUR-Mehl-Gemisches wurde aus Hornberger et al., 2005 übernommen.						
Variante mit ausschließlich thermischer Verwertung der PUR-Isolierung						
stoffliche Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/m³]	KEA [MJ/KG]
PUR	9,92	4,07	keine	0	0	0



Fortsetzung Tabelle 9-11

Variante mit Berücksichtigung der Transportleistungen (Transportwege basieren auf dem in Österreich existierenden Verfahren dieses Typs)						
Energieverbrauch für die einzelnen Transportwege	Entfernung [km]	Transportgut	Transportbehälter	KG /tkm *	Spez. Aufwand [tkm/KG]	KEA [MJ/KG]
Timelkam (AUT) - Mettlach (DE)	690	KS-Mischfraktion	BigBags	89	7,75	12,24
Energieverbrauch für die einzelnen Transportwege	Entfernung [km]	Transportgut	Transportbehälter	KG /tkm *	Spez. Aufwand [tkm/KG]	KEA [MJ/KG]
Timelkam (AUT) - Mettlach (DE)	690	PUR-Mehl	BigBags	246	2,80	4,43
Timelkam (AUT) - Goch (DE)	810	Kältemittel	Druckfässer	2700	0,30	0,47
Goch (DE) - Frankfurt (DE)	305	Reines F(C)KW	Druckfässer	9090	0,03	0,05
Timelkam (AUT) - Frankfurt (DE)	515	F(C)KW	Tanks	4000	0,13	0,20
*Eine Tonne Transportgut wird anhand der durchschnittlichen Zusammensetzung eines FCKW-haltigen Kühlgerätes berechnet, das Gewicht der Transportbehälter bleibt also unberücksichtigt.						
Anmerkungen: Für alle Transportwege wird das Transportmittel „LKW mit Anhänger“ angesetzt. Transporte bis zur Anlieferung bei der Behandlungsanlage werden bei dieser Betrachtung vernachlässigt.						
Variante mit industrieller Mitverbrennung der Polystyrolfraktion						
stoffliche Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/m³]	KEA [MJ/KG]
Polystyrol	7,03	2,88	keine		0	0
therm. Verwertung	[%]	kg/KG	Ersatzbrennstoff	HW KS [MJ/kg]	kg KS / kg Öl	KEA [MJ/KG]
Polystyrol	7,03	2,88	Öl ($\omega_{\text{öl}}=0,85$; $\omega_{\text{KS}} = 0,85$)	39,6	1,02	130,16

Modellvarianten der Verfahren des ST-Typs

Wie auch bei den Verfahrensvarianten der Systeme mit weitgehender stofflicher Verwertung, werden auch hier die jeweils zum Grundmodell geänderten Annahmen in Tabelle 9-12 angeführt. Die Bilanzierung des Grundmodells findet sich in Kapitel 4.1.1.1.

Tabelle 9-12: Bilanzunterschiede der Verfahrensvarianten zum Grundmodell des ST-Typs

Variante: Metallabscheidung mit maximaler Effizienz (100 % Fe, 50 % Al;)					
stoffliche Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	60,23	24,69	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	10005	247,02
Aluminium (verwertet)	3,76	1,55	Al _{prim} - Al _{sek}	169446	262,64
Aluminium (nicht ww.)	1,74	0,71	keine	0	0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]		Energieform	KEA [MJ/KG]
Sortierung+Trennung		0,17		el. Strom	0,52
Variante: Metallabscheidung mit theoretisch möglicher Effizienz (100 % Fe, 35 % Al;)					
stoffliche Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	60,23	24,69	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	10005	247,02
Aluminium (verwertet)	3,24	1,33	Al _{prim} - Al _{sek}	169446	225,36
Aluminium (nicht ww.)	2,26	0,93	keine	0	0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]		Energieform	KEA [MJ/KG]
Sortierung+Trennung		0,17		el. Strom	0,52
Variante mit höherer Schlacke-Sortiereffizienz (100 % Fe, 15 % Al)					
stoffliche Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	60,23	24,69	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	10005	247,02
Aluminium (verwertet)	2,53	1,04	Al _{prim} - Al _{sek}	169446	176,22
Aluminium (nicht ww.)	2,97	1,22	keine	0	0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]		Energieform	KEA [MJ/KG]
Sortierung+Trennung		0,17		el. Strom	0,52



Fortsetzung Tabelle 9-12:

Variante mit Berücksichtigung der Transportleistungen (Transportwege basieren auf dem in Österreich existierenden Verfahren dieses Typs)						
Energieverbrauch für die einzelnen Transportwege	Entfernung [km]	Transportgut	Transportbehälter	KG /tkm *	Spez. Aufwand [tkm/KG]	KEA [MJ/KG]
ABA Rinterzelt – Fernwärme Wien	18	Entkernte KG	Mulde	24	0,75	1,18
Fernwärme Wien – ABA Rinterzelt	18	Schlacke	Mulde	73	0,25	0,39
Wien (AUT) - Goch (DE)	1040	Kältemittel	Druckfässer	2700	0,39	0,61
Goch (DE) - Frankfurt (DE)	305	Reines F(C)KW	Druckfässer	9090	0,03	0,05
<p>*Eine Tonne Transportgut wird anhand der durchschnittlichen Zusammensetzung eines FCKW-haltigen Kühlgerätes berechnet, das Gewicht der Transportbehälter bleibt also unberücksichtigt.</p> <p>Anmerkungen: Für alle Transportwege wird das Transportmittel „LKW mit Anhänger“ angesetzt. Transporte bis zur Anlieferung bei der Behandlungsanlage werden bei dieser Betrachtung vernachlässigt.</p>						

9.2.2.1 Bilanzierung der Emissionen

9.2.2.1.1 Bilanzierung der CO₂-Emissionen

Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung

Die Erstellung der CO₂-Bilanz des Grundmodells ist anhand der Tabelle 4-12 bis Tabelle 4-16 erläutert, für die betrachteten Varianten des Grundmodells erfolgt die Darstellung der vom Grundmodell abweichenden Bilanzteile in Tabelle 9-13.

Tabelle 9-13: CO₂-Bilanzierungsunterschiede der Modellvarianten zum Grundmodell des WS-Typs

Variante Cryokondensation (Energieverbrauch siehe TABELLE 9.4)						
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]	CO₂ [kg/MJ]	CO₂ [kg/KG]		
Energiebedarf - Strom		28,66	0,17	4,87		
Energiebedarf - Wärme (Gas)		0	0,062	0		
Variante mit Berücksichtigung der Mischfraktion PUR-Mehl (PUR+Fremdstoffe)						
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung CO₂	CO₂ [kg/kg]	CO₂ [kg/KG]	
PUR	20,45	8,38	Holzmehl	0	0,00	
Fe-Fraktion	53,04	21,74	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	1,09	23,61	
Kupfer	2,80	1,15	Cu _{prim} - Cu _{sek}	3,68	4,22	
Aluminium	4,73	1,94	Al _{prim} - Al _{sek}	10,79	20,92	
Anmerkung: Die anteilmäßige Zusammensetzung des PUR-Mehl-Gemisches wurde aus Hornberger et al., 2005 übernommen.						
Variante mit Berücksichtigung der Transportleistungen						
Transportprozess		CO₂ [kg/tkm]	[tkm/KG]*	CO₂ [kg/KG]		
LKW mit Anhänger		0,11612	11,02	1,28		
* Die Ermittlung des spezifischen Transportaufwandes pro Kühlgerät findet sich in Tabelle 9-11						
Variante mit industrieller Mitverbrennung der Polystyrolfraktion						
therm. Verwertung	[%]	kg/KG	kg KS / kg Öl*	CO₂ [kg/kg]	CO₂-Vorkette-Öl [kg/KG]	CO₂ [kg/KG]
Polystyrol	7,03	2,88	1,02	3,079	1,21	9,92

Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung

Die CO₂-Bilanz des Grundmodells dieses Verfahrenstyps findet sich in Tabelle 4-18, in Tabelle 9-14 sind für die Modellvarianten die Bilanzunterschiede zum Grundmodell angeführt.



Tabelle 9-14: CO₂-Bilanzierungsunterschiede der Modellvarianten zum Grundmodell des ST-Typs

Variante: Metallabscheidung mit maximaler Effizienz (100 % Fe, 50 % Al;)					
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung CO ₂	CO ₂ [kg/kg]	CO ₂ [kg/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	60,23	24,69	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	1,09	26,81
Aluminium (verwertet)	3,76	1,55	Al _{prim} - Al _{sek}	10,79	16,72
Aluminium (nicht vw.)	1,74	0,71	keine	0	0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]	CO₂ [kg/MJ]		CO₂ [kg/KG]
Sortierung+Trennung		0,17	0,17		0,03
Variante: Metallabscheidung mit theoretisch möglicher Effizienz (100 % Fe, 35 % Al;)					
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung CO ₂	CO ₂ [kg/kg]	CO ₂ [kg/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	60,23	24,69	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	1,09	26,81
Aluminium (verwertet)	3,24	1,33	Al _{prim} - Al _{sek}	10,79	14,35
Aluminium (nicht vw.)	2,26	0,93	keine	0	0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]	CO₂ [kg/MJ]		CO₂ [kg/KG]
Sortierung+Trennung		0,17	0,17		0,03
Variante mit höherer Schlacke-Sortiereffizienz (100 % Fe, 15 % Al;)					
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung CO ₂	CO ₂ [kg/kg]	CO ₂ [kg/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	60,23	24,69	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	1,09	26,81
Aluminium (verwertet)	2,53	1,04	Al _{prim} - Al _{sek}	10,79	11,22
Aluminium (nicht vw.)	2,97	1,22	keine	0	0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]	CO₂ [kg/MJ]		CO₂ [kg/KG]
Sortierung+Trennung		0,17	0,17		0,03
Variante mit Berücksichtigung der Transportleistungen					
Transportprozess		CO₂ [kg/tkm]		[tkm/KG]*	CO₂ [kg/KG]
LKW mit Anhänger		0,11612		1,42	0,16
*Die Ermittlung des spezifischen Transportaufwandes pro Kühlgerät findet sich in Tabelle 9-12					

9.2.2.1.2 FCKW-Ausstoß

Die Darstellung des FCKW-Ausstoßes für das Grundmodell der Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung findet sich in Tabelle 4-22. In Tabelle 9-15 sind nur die jeweils vom Grundmodell abweichenden freigesetzten FCKW-Mengen für die jeweiligen Modellvarianten angeführt.

Tabelle 9-15: Vom Grundmodell abweichende FCKW-Emissionen der Modellvarianten WS-Typs

Variante mit PUR+Fremdstoffe				
FCKW-Austrag	Maximum [g/Kühlgerät]	Minimum [g/Kühlgerät]	Szenario 1 [g/Kühlgerät]	Szenario 2 [g/Kühlgerät]
PUR-Mehl (Ölbindemittel)	16,77	8,39	16,77	16,77
0,1 Gewichts%* PUR-Anhaftungen an Fe-Fraktion	0,74	0,00	0,17	0,29
0,1 Gewichts%* PUR-Anteil in Kunststoff-Fe-NE- Mischfraktion zur Sortierung	0,54	0,00	0,37	0,21
*Annahme aufgrund der sehr guten Auftrennung des Materialverbundes im Querstromzerspaner.				
Variante mit thermischer Verwertung der PUR-Fraktion				
FCKW-Austrag	Maximum [g/Kühlgerät]	Minimum [g/Kühlgerät]	Szenario 1 [g/Kühlgerät]	Szenario 2 [g/Kühlgerät]
PUR-Mehl (Ölbindemittel)	8,10	2,03	6,48	7,29
Bemerkung	Rest-FCKW entweichen vollständig vor der Verbrennung	Verbrennung erfolgt innerhalb von 4 Stunden nach dem Aufmahlen (50 % der FCKW entweichen)	Verbrennung erfolgt innerhalb von 2 Tagen nach dem Aufmahlen (80 % der FCKW entweichen)	Verbrennung erfolgt nach mehr als 2 Tagen nach dem Aufmahlen (90 % der FCKW entweichen)



9.2.2.1.3 HCl-Emissionen

Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung (WS-Typ)

Tabelle 9-16: HCl- und HF-Emissionen aufgrund der Verbrennung von FCKW aus dem Isolierschaum von Kühlgeräten (Szenarien für das Grundmodell des WS-Typs)

Szenarien von FCKW- Austrag	Maximum* [g/Kühlgerät]		Minimum* [g/Kühlgerät]		Szenario 1* [g/Kühlgerät]		Szenario 2* [g/Kühlgerät]	
	Rauchgas	Reingas	Rauchgas	Reingas	Rauchgas	Reingas	Rauchgas	Reingas
Verbrennung der PUR-Anhaftungen bei der Stahlerzeugung (Keine Rauchgasreinigung)								
FCKW	0,00		4,46		3,43		2,75	
HCl	0,00	0,00	3,55	3,55	2,73	2,73	2,19	2,19
HF	0,00	0,00	0,65	0,65	0,50	0,50	0,40	0,40
Verbrennung der PUR-Anteile in Kunststoffmischfraktionen (Großteil des PUR in der Fraktion zur MVA → Rauchgasreinigung**)								
FCKW	0,00		2,01		0,62		1,24	
HCl	0,00	0,00	1,60	0,01	0,49	0,00	0,99	0,00
HF	0,00	0,00	0,29	0,01	0,09	0,00	0,18	0,00
Verbrennung der PUR-Anhaftungen an den NE-Metallen und Fe-Metallen aus der Sortierung (Keine Rauchgasreinigung)								
FCKW	0,00		1,12		0,34		0,69	
HCl	0,00	0,00	0,89	0,89	0,27	0,27	0,55	0,55
HF	0,00	0,00	0,16	0,16	0,05	0,05	0,10	0,10
Summe HCl	0,00	0,00	6,04	4,45	3,49	3,00	3,73	2,74
Summe HF	0,00	0,00	1,11	0,82	0,64	0,55	0,68	0,50
<p>*Szenarien entsprechen denen aus Tabelle 4-22.</p> <p>**Rauchgasreinigung: Für HCl wird eine Reinigungsleistung von 99,5 % angesetzt. Für HF wird eine Reinigungsleistung von 98 % angesetzt (Reinigungsleistung aus Durchschnittswerten berechnet – Quelle für Rauchgas: di Chirico, 1996; Quelle für Reingas: Gebhardt, 2000).</p> <p>Spaltreaktion für R11: $\text{CCl}_3\text{F} + \text{O}_2 + 2 \text{H}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{HF} + 3 \text{HCl}$</p> <p>Annahme: Beim FCKW-Spaltverfahren, bei der Polystyrolverwertung (sortenrein) und bei der Kunststofffraktion die industriell mitverbrannt wird treten keine HF- und HCl-Emissionen als FCKW-Spaltprodukte auf.</p>								

Tabelle 9-17: HCl- und HF-Emissionen aufgrund der Verbrennung von FCKW aus dem Isolierschaum von Kühlgeräten (Varianten – WS-Typ)

Variante mit Berücksichtigung der Mischfraktion PUR-Mehl (PUR+Fremdstoffe)								
Szenarien - FCKW-Austrag	Maximum [g/Kühlgerät]		Minimum [g/Kühlgerät]		Szenario 1 [g/Kühlgerät]		Szenario 2 [g/Kühlgerät]	
	Rauchgas	Reingas	Rauchgas	Reingas	Rauchgas	Reingas	Rauchgas	Reingas
Verbrennung der PUR-Anhaftungen bei der Stahlerzeugung (Keine Rauchgasreinigung)								
	0,00		0,74		0,57		0,45	
	0,00	0,00	0,59	0,59	0,45	0,45	0,36	0,36
	0,00	0,00	0,11	0,11	0,08	0,08	0,07	0,07
Verbrennung der PUR-Anteile in Kunststoffmischfraktionen (Großteil des PUR in der Fraktion zur MVA → Rauchgasreinigung)								
	0,00		0,35		0,11		0,21	
	0,00	0,00	0,28	0,00	0,09	0,00	0,17	0,00
	0,00	0,00	0,05	0,00	0,02	0,00	0,03	0,00
Verbrennung der PUR-Anhaftungen an den NE-Metallen und Fe-Metallen aus der Sortierung (Keine Rauchgasreinigung)								
	0,00		0,19		0,06		0,12	
	0,00	0,00	0,15	0,15	0,05	0,05	0,10	0,10
	0,00	0,00	0,03	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02
Summe HCl	0,00	0,00	1,02	0,74	0,59	0,50	0,62	0,45
Summe HF	0,00	0,00	0,19	0,14	0,11	0,09	0,11	0,08
Variante mit Verbrennung der PUR-Fraktion								
Szenarien - FCKW-Austrag	Maximum [g/Kühlgerät]		Minimum [g/Kühlgerät]		Szenario 1 [g/Kühlgerät]		Szenario 2 [g/Kühlgerät]	
	Rauchgas	Reingas	Rauchgas	Reingas	Rauchgas	Reingas	Rauchgas	Reingas
Verbrennung des PUR-Mehls (Rauchgasreinigung vorhanden)								
	0,00		2,03		1,62		0,81	
	0,00	0,00	1,62	0,01	1,29	0,01	0,64	0,00
	0,00	0,00	0,30	0,01	0,24	0,00	0,12	0,00
Summe HCl	0,00	0,00	9,27	4,46	4,78	3,01	4,37	2,75
Summe HF	0,00	0,00	1,70	0,83	0,88	0,56	0,80	0,51
Es sind nur die jeweils vom Grundmodell abweichenden Teile der Szenarien dargestellt. Sämtliche Annahmen und Reinigungsleistungen wie in Tabelle 9-16.								



Tabelle 9-18: HCl-Bilanz für das Grundmodell des WS-Typs

HCl-Einsparung						
stoffl. Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung HCl	HCl [g/kg]	HCl [g/KG]	
Flachglas	2,17	0,89	20 % bei Flachglasherstellung*	0,0006	0,0006	
PUR	9,92	4,07	Holzmehl	-	-	
Fe-Fraktion	60,23	24,69	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	-0,0064	-0,1568	
Kupfer	2,89	1,18	Cu _{prim} - Cu _{sek}	0,8242	0,9764	
Aluminium	5,50	2,25	Al _{prim} - Al _{sek}	0,2593	0,5846	
Polystyrol	7,03	2,88	Schnittholz (geh.)	-	-	
Summe					1,4048	
*Die 20 %ige Einsparung an HCl-Emissionen durch den Einsatz von Altglasscherben bei der Flachglasherstellung stellt eine Schätzung dar.						
therm. Verwertung	[%]	kg/KG	kg KS / kg Öl*	HCl [g/kg]	HCl-Vorkette-Öl [g/KG]	HCl [g/KG]
Polystyrol	7,03	2,88	1,24	0	0,0317	0,0317
Kunststoffe-Industrie.	1,77	0,73	1,01	0	0,0098	0,0098
Kunststoffe.-MVA	6,49	2,66	1,64	0	0,0222	0,0222
PUR-Ölbindemittel	9,92	4,07	2,75	0	0,0202	0,0202
Summe				0		0,0839
*Die Ermittlung des Umrechnungsfaktors von Kunststoffen auf Öl erfolgt wiederum hinsichtlich Nutzengleichheit, siehe dazu die Erläuterungen zu Tabelle 4-2.						
FCKW-Spaltprodukte	kg/kg FCKW	kg/Kühlgerät	HCl [g/kg]	HCl [g/KG]		
HF	0,33	0,12	0*	0		
HCl	0,61	0,22	0,089	0,0194		
Summe				0,0194		
*Die HCl-Emissionen werden auf Null gesetzt, da eine Bestrafung für die Bereitstellung eines Produktes nicht gerechtfertigt erscheint.						
HCl-Ausstoß						
Direkt (Verbrennung)*	[%]	kg/KG	HCl [g/kg]	HCl [g/kg] (Rauchgas)	HCl [g/kg] (Reingas**)	
Polystyrol	7,03	2,88	0	0	0	
Kunststoffe-Industrie.	1,77	0,73	11,68	8,4975	0,0425	
Kunststoffe.-MVA	6,49	2,66	11,68	31,0817	0,1554	
PUR-Ölbindemittel	9,92	4,07	0***	0	0	
Summe					0,1979	
*PVC-Anteil in den Kunststoffmischfraktionen 2 % → 1 g PVC verbrennt zu 0,5837 g HCl.						
**Reinigungsleistung 99,5 % (Tabelle 9-16).						
***PUR als Stoff (FCKW-Einschlüsse in den Poren nicht berücksichtigt).						
Indirekt (Energie)	Energiebedarf [MJ/KG]	HCl [g/MJ]		HCl [g/KG]		
Energiebedarf - Strom	22,0	0,0048		0,1100		
Energiebedarf - Wärme (Gas)	11,5	0,000078		0,0009		
Indirekt (Hilfsmaterialien)	Verbrauch [kg/KG]	HCl [g/MJ]		HCl [g/KG]		
O ₂	0,14	0,0019		0,0003		
H ₂	0,01	0,0180		0,0002		
Summe				0,1114		

Tabelle 9-19: HCl-Teilbilanzen für die vom Grundmodell abweichenden Verfahrensteile der Varianten des WS-Typs

Variante Cryokondensation (Energieverbrauch siehe Tabelle 9-4)						
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]		HCl [g/MJ]		HCl [g/KG]
Energiebedarf - Strom		28,66		0,0048		0,1433
Energiebedarf - Wärme (Gas)		0		0,000078		0
Variante mit Berücksichtigung der Mischfraktion PUR-Mehl (PUR+Fremdstoffe)						
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung HCl	HCl [g/kg]	HCl [g/KG]	
PUR	20,45	8,38	Holzmehl			
Fe-Fraktion	53,04	21,74	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	-0,0064	-0,1381	
Kupfer	2,80	1,15	Cu _{prim} - Cu _{sek}	0,8242	0,9460	
Aluminium	4,73	1,94	Al _{prim} - Al _{sek}	0,2593	0,5028	
Anmerkung: Die anteilmäßige Zusammensetzung des PUR-Mehl-Gemisches wurde aus Hornberger et al., 2005 übernommen.						
Variante mit Berücksichtigung der Transportleistungen						
Transportprozess		HCl [g/tkm]		[tkm/KG]*		HCl [g/KG]
LKW mit Anhänger		0,0005		11,02		0,0054
* Die Ermittlung des spezifischen Transportaufwandes pro Kühlgerät findet sich in Tabelle 9-11						
Variante mit industrieller Mitverbrennung der Polystyrolfraktion						
therm. Verwertung	[%]	kg/KG	kg KS / kg Öl*	HCl [g/kg]	HCl-Vorkette-Öl [g/KG]	HCl [g/KG]
Polystyrol	7,03	2,88	1,02	0	0,0386	0,0386



Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung (ST-Typ)

Tabelle 9-20: HCl-Gesamtbilanz für das Grundmodell des ST-Typs

HCl-Einsparung						
stoffl. Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung HCl	HCl [g/kg]	HCl [g/KG]	
Flachglas	2,17	0,89	20 % bei Flachglasherstellung*	0,0006	0,0006	
Fe-Fraktion	49,21	20,17	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	-0,0064	-0,1281	
Kupfer	2,89	1,18	Cu _{prim} - Cu _{sek}	0,8242	0,9764	
Aluminium	2,01	0,83	Al _{prim} - Al _{sek}	0,2593	0,2141	
Summe					1,0630	
*Die 20 %ige Einsparung an HCl-Emissionen durch den Einsatz von Altglasscherben bei der Flachglasherstellung stellt eine Schätzung dar.						
therm. Verwertung	[%]	kg/KG	kg KS / kg Öl*	HCl [g/kg]	HCl-Vorkette-Öl [g/KG]	HCl [g/KG]
Kunststoffe - Gehäuse	7,76	3,18	1,94	0	0,0224	0,0224
Kunststoffe - Demontage	7,54	3,09	1,38	0	0,0305	0,0305
PUR-Ölbindemittel	9,92	4,07	2,75	0	0,0202	0,0202
Summe						0,0731
*Die Ermittlung des Umrechnungsfaktors von Kunststoffen auf Öl erfolgt wiederum hinsichtlich Nutzengleichheit, siehe dazu die Erläuterungen zu Tabelle 4-2.						
FCKW-Spaltprodukte	kg/kg FCKW	kg/Kühlgerät	HCl [g/kg]	HCl [g/KG]		
HF	0,33	0,04	0*	0		
HCl	0,61	0,07	0,089	0,0194		
Summe				0,0059		
*Die HCl-Emissionen werden auf Null gesetzt, da eine Bestrafung für die Bereitstellung eines Produktes nicht gerechtfertigt erscheint.						
HCl-Ausstoß						
Direkt (Verbrennung)*	[%]	kg/KG	HCl [g/kg]	HCl [g/kg] (Rauchgas)	HCl [g/kg] (Reingas **)	
Mischfraktion Kunststoffe	15,30	6,27	6,3072	39,5461	0,1977	
PUR-Ölbindemittel	9,92	4,07	0***	0	0	
FCKW aus PUR-Isolierung	0,62	0,25	796	199	0,9950	
Summe					1,1927	
*PVC-Anteil in der Kunststoffmischfraktion äquivalent dem Anteil beim WS-Typ → Bei der Verbrennung von 1 g PVC entstehen 0,5837 g HCl.						
**Reinigungsleistung 99,5 % (Tabelle 9-16).						
***PUR als Stoff (FCKW-Einschlüsse in den Poren nicht berücksichtigt).						
Indirekt (Energie)	Energiebedarf [MJ/KG]	HCl [g/MJ]		HCl [g/KG]		
Energiebedarf - Strom	16,22	0,0048		0,0811		
Indirekt (Hilfsmaterialien)	Verbrauch [kg/KG]	HCl [g/MJ]		HCl [g/KG]		
O₂	0,04	0,0019		0,0001		
H₂	0,00	0,0180		0,0000		
Summe				0,0812		

Tabelle 9-21: HCl-Teilbilanzen für die Modellvarianten des ST-Typs

Variante: Metallabscheidung mit maximaler Effizienz (100 % Fe, 50 % Al;)					
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung HCl	HCl [g/kg]	HCl [g/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	60,23	24,69	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	-0,0064	-0,1580
Aluminium (verwertet)	3,76	1,55	Al _{prim} - Al _{sek}	0,2593	0,4019
Aluminium (nicht vw.)	1,74	0,71	keine	0	0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]	HCl [g/MJ]		HCl [g/KG]
Sortierung+Trennung		0,17	0,0048		0,0008
Variante: Metallabscheidung mit theoretisch möglicher Effizienz (100 % Fe, 35 % Al;)					
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung HCl	HCl [g/kg]	HCl [g/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	60,23	24,69	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	-0,0064	-0,1580
Aluminium (verwertet)	3,24	1,33	Al _{prim} - Al _{sek}	0,2593	0,3449
Aluminium (nicht vw.)	2,26	0,93	keine	0	0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]	HCl [g/MJ]		HCl [g/KG]
Sortierung+Trennung		0,17	0,0048		0,0008
Variante mit höherer Schlacke-Sortiereffizienz (100 % Fe, 15 % Al;)					
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung HCl	HCl [g/kg]	HCl [g/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	60,23	24,69	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	-0,0064	-0,1580
Aluminium (verwertet)	2,53	1,04	Al _{prim} - Al _{sek}	0,2593	0,2697
Aluminium (nicht vw.)	2,97	1,22	keine	0	0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]	HCl [g/MJ]		HCl [g/KG]
Sortierung+Trennung		0,17	0,0048		0,0008
Variante mit Berücksichtigung der Transportleistungen					
Transportprozess		HCl [g/tkm]		[tkm/KG]*	HCl [g/KG]
LKW mit Anhänger		0,0005		1,42	0,0007

*Die Ermittlung des spezifischen Transportaufwandes pro Kühlgerät findet sich in Tabelle 9-12



9.2.2.1.4 HF-Emissionen

Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung (WS-Typ)

Tabelle 9-22: Bilanzierung der HF-Emissionen für das Grundmodell des WS-Typs

HF-Einsparung						
stoffl. Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung HF	HF [g/kg]	HF [g/KG]	
Flachglas	2,17	0,89	20 % bei Flachglasherstellung*	0,0003	0,0003	
PUR	9,92	4,07	Holzmehl	0	-	
Fe-Fraktion	60,23	24,69	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	-0,0006	-0,0139	
Kupfer	2,89	1,18	Cu _{prim} - Cu _{sek}	0,0810	0,0960	
Aluminium	5,50	2,25	Al _{prim} - Al _{sek}	0,0574	0,1295	
Polystyrol	7,03	2,88	Schnittholz (geh.)	0	-	
Summe					0,2118	
*Die 20 %ige Einsparung an HF-Emissionen durch den Einsatz von Altglasscherben bei der Flachglasherstellung stellt eine Schätzung dar.						
therm. Verwertung	[%]	kg/KG	kg KS / kg Öl*	HF [g/kg]	HF-Vorkette- Öl [g/KG]	HF [g/KG]
Polystyrol	7,03	2,88	1,24	0	0,0022	0,0022
Kunststoffe-Industrie.	1,77	0,73	1,01	0	0,0007	0,0007
Kunststoffe.-MVA	6,49	2,66	1,64	0	0,0016	0,0016
PUR-Ölbindemittel	9,92	4,07	2,75	0	0,0014	0,0014
Summe						0,0059
*Die Ermittlung des Umrechnungsfaktors von Kunststoffen auf Öl erfolgt wiederum hinsichtlich Nutzengleichheit, siehe dazu die Erläuterungen zu Tabelle 4-2.						
FCKW-Spaltprodukte	kg/kg FCKW	kg/Kühlgerät	HF [g/kg]	HF [g/KG]		
HF	0,33	0,12	0,247	0,0293		
HCl	0,61	0,22	0,0029	0,0006		
Summe				0,0299		
HF-Ausstoß						
Direkt (Bei der Verbrennung der Kunststoffe entstehen keine direkten HF-Emissionen)						
Indirekt (Energie)	Energiebedarf [MJ/KG]	HF [g/MJ]	HF [g/KG]			
Energiebedarf - Strom	22,0	0,0004	0,0077			
Energiebedarf - Wärme (Gas)	11,5	0,0000	0,0001			
Indirekt (Hilfsmaterialien)	Verbrauch [kg/KG]	HF [g/MJ]	HF [g/KG]			
O ₂	0,14	0,0001	0,0000			
H ₂	0,01	0,0013	0,0000			
Summe			0,0078			

Für die Modellvarianten (Tabelle 9-23) werden nur die Teile der Bilanzierung dargestellt, die vom Grundmodell abweichende Emissionen aufweisen.

Tabelle 9-23: Teilbilanzierungen der HF-Emissionen für die Modellvarianten des WS-Typs

Variante Cryokondensation (Energieverbrauch siehe Tabelle 9-4)						
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]		HF [g/MJ]	HF [g/KG]	
Energiebedarf - Strom		28,66		0,0004	0,0101	
Energiebedarf - Wärme (Gas)		0			0	
Variante mit Berücksichtigung der Mischfraktion PUR-Mehl (PUR+Fremdstoffe)						
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung HCl	HF [g/kg]	HF [g/KG]	
PUR	20,45	8,38	Holzmehl	0	-	
Fe-Fraktion	53,04	21,74	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	-0,0006	-0,0123	
Kupfer	2,80	1,15	Cu _{prim} - Cu _{sek}	0,0810	0,0930	
Aluminium	4,73	1,94	Al _{prim} - Al _{sek}	0,0574	0,1114	
Anmerkung: Die anteilmäßige Zusammensetzung des PUR-Mehl-Gemisches wurde aus Hornberger et al., 2005 übernommen.						
Variante mit Berücksichtigung der Transportleistungen						
Transportprozess		HF [g/tkm]		[tkm/KG]*	HF [g/KG]	
LKW mit Anhänger		0,0000		11,02	0,0004	
* Die Ermittlung des spezifischen Transportaufwandes pro Kühlgerät findet sich in Tabelle 9-11						
Variante mit industrieller Mitverbrennung der Polystyrolfraktion						
therm. Verwertung	[%]	kg/KG	kg KS / kg Öl	HF [g/kg]	HF-Vorkette-Öl [g/KG]	HF [g/KG]
Polystyrol	7,03	2,88	1,02	0	0,0027	0,0027



Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung (ST-Typ)

Tabelle 9-24: Bilanzierung der HF-Emissionen für das Grundmodell des ST-Typs

HF-Einsparung						
stoffl. Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung HF	HF [g/kg]	HF [g/KG]	
Flachglas	2,17	0,89	20 % bei Flachglasherstellung*	0,0003	0,0003	
Fe-Fraktion	49,21	20,17	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	-0,0006	-0,0114	
Kupfer	2,89	1,18	Cu _{prim} - Cu _{sek}	0,0810	0,0960	
Aluminium	2,01	0,83	Al _{prim} - Al _{sek}	0,0574	0,0474	
Summe					0,1323	
*Die 20 %ige Einsparung an HF-Emissionen durch den Einsatz von Altglasscherben bei der Flachglasherstellung stellt eine Schätzung dar.						
therm. Verwertung	[%]	kg/KG	kg KS / kg Öl*	HF [g/kg]	HF-Vorkette- Öl [g/KG]	HF [g/KG]
Kunststoffe-Gehäuse	7,76	3,18	1,94	0	0,0016	0,0016
Kunststoffe-Demontage	7,54	3,09	1,38	0	0,0022	0,0022
PUR-Ölbindemittel	9,92	4,07	2,75	0	0,0014	0,0014
Summe				0		0,0052
*Die Ermittlung des Umrechnungsfaktors von Kunststoffen auf Öl erfolgt wiederum hinsichtlich Nutzengleichheit, siehe dazu die Erläuterungen zu Tabelle 4-2.						
FCKW-Spaltprodukte	kg/kg FCKW	kg/Kühlgerät	HF [g/kg]	HF [g/KG]		
HF	0,33	0,04	0,247	0,0090		
HCl	0,61	0,07	0,0029	0,0002		
Summe					0,0092	
*Die HCl-Emissionen werden auf Null gesetzt, da eine Bestrafung für die Bereitstellung eines Produktes nicht gerechtfertigt erscheint.						
HF-Ausstoß						
Direkt (Verbrennung)	[%]	kg/KG	HF [g/kg]	HF [g/kg] (Rauchgas)	HF [g/kg] (Reingas **)	
FCKW aus PUR-Isolierung	0,62	0,25	146	36,50	0,730	
Summe					0,730	
Indirekt (Energie)		Energiebedarf [MJ/KG]	HF [g/MJ]	HF [g/KG]		
Energiebedarf - Strom		16,22	0,0004	0,0057		
Indirekt (Hilfsmaterialien)		Verbrauch [kg/KG]	HF [g/MJ]	HF [g/KG]		
O ₂		0,04	0,0001	0,0000		
H ₂		0,00	0,0013	0,0000		
Summe					0,0057	

Auch für diesen Verfahrenstyp werden für die Bilanzierung der Modellvarianten nur die jeweiligen Unterschiede zum Grundmodell angeführt (Tabelle 9-25).

Tabelle 9-25: Teilbilanzierungen der HF-Emissionen für die Modellvarianten des ST-Typs

Variante: Metallabscheidung mit maximaler Effizienz (100 % Fe, 50 % Al;)					
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung HF	HF [g/kg]	HF [g/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	60,23	24,69	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	-0,0006	-0,0139
Aluminium (verwertet)	3,76	1,55	Al _{prim} - Al _{sek}	0,0574	0,0890
Aluminium (nicht vv.)	1,74	0,71	keine	0	0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]	HF [g/MJ]		HF [g/KG]
Sortierung+Trennung		0,17	0,0004		0,0000
Variante: Metallabscheidung mit theoretisch möglicher Effizienz (100 % Fe, 35 % Al;)					
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung HCl	HF [g/kg]	HF [g/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	60,23	24,69	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	-0,0006	-0,0139
Aluminium (verwertet)	3,24	1,33	Al _{prim} - Al _{sek}	0,0574	0,0764
Aluminium (nicht vv.)	2,26	0,93	keine	0	0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]	HF [g/MJ]		HF [g/KG]
Sortierung+Trennung		0,17	0,0004		0,0000
Variante mit höherer Schlacke-Sortiereffizienz (100 % Fe, 15 % Al;)					
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung HF	HF [g/kg]	HF [g/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	60,23	24,69	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	-0,0006	-0,0139
Aluminium (verwertet)	2,53	1,04	Al _{prim} - Al _{sek}	0,0574	0,0597
Aluminium (nicht vv.)	2,97	1,22	keine	0	0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]	HF [g/MJ]		HF [g/KG]
Sortierung+Trennung		0,17	0,0004		0,0000
Variante mit Berücksichtigung der Transportleistungen					
Transportprozess		HF [g/tkm]		[tkm/KG]*	HF [g/KG]
LKW mit Anhänger		0,0000		1,42	0,0001
*Die Ermittlung des spezifischen Transportaufwandes pro Kühlgerät findet sich in Tabelle 9-12					



9.2.2.1.5 Feste Abfälle

Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung

Tabelle 9-26: Feste Abfälle der Verfahrensvariante "PUR+Reststoffe" des WS-Typs

Direkte Ablagerungen	[%]	kg/KG	Abgelagertes Material			Gesamt [kg/KG]
Metalle im Ölbindemittel (nicht vw.)	8,05	3,30	Metallstaub nach Verbrennung des PUR-Ölbindemittels			3,30
Quecksilberschalter, Kondensatoren	0,00	0,00	Gefährlicher Abfall			0,00
Kunststoffverbrennung	[%]	kg/KG	Flugasche [kg/KG]	Filterkuchen [kg/KG]	Schlacke [kg/KG]	Gesamt [kg/KG]
Kunststoffe (PS und gemischt)	15,30	6,27	0,113	0,002	0,238	0,353
PUR-Mehl	12,40	5,09	0,092	0,002	0,193	0,229
Gesamtanfall an festen Abfällen			3,94 kg pro Kühlgerät			

Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung

Tabelle 9-27: Feste Abfälle der Verfahrensvarianten des ST-Typs

Variante: Metallabscheidung mit maximaler Effizienz (100 % Fe, 50 % Al;)						
Verbrennung	[%]	kg/KG	Flugasche [kg/KG]	Filterkuchen [kg/KG]	Schlacke [kg/KG]	Gesamt [kg/KG]
Kühlgerätegehäuse	53,12	21,78	1,42	0,14	0,84*	7,64
Gesamtanfall an festen Abfällen			2,57 kg pro Kühlgerät			
*Restschlacke nach Abtrennung der verwerteten Metallfraktionen						
Variante: Metallabscheidung mit theoretisch möglicher Effizienz (100 % Fe, 35 % Al;)						
Verbrennung	[%]	kg/KG	Flugasche [kg/KG]	Filterkuchen [kg/KG]	Schlacke [kg/KG]	Gesamt [kg/KG]
Kühlgerätegehäuse	53,12	21,78	1,42	0,14	1,06*	7,64
Gesamtanfall an festen Abfällen			2,79 kg pro Kühlgerät			
*Restschlacke nach Abtrennung der verwerteten Metallfraktionen						
Variante: Metallabscheidung mit höherer Effizienz (100 % Fe, 15 % Al;)						
Verbrennung	[%]	kg/KG	Flugasche [kg/KG]	Filterkuchen [kg/KG]	Schlacke [kg/KG]	Gesamt [kg/KG]
Kühlgerätegehäuse	53,12	21,78	1,42	0,14	1,35*	7,64
Gesamtanfall an festen Abfällen			3,08 kg pro Kühlgerät			
*Restschlacke nach Abtrennung der verwerteten Metallfraktionen						

9.2.3 Verfahrensmodelle für VOC-Kühlgeräte

9.2.3.1 Energetische Bilanzierung

Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung

Grundmodell:

Tabelle 9-28: Bilanzierung des Grundmodells der Verfahren des WS-Typs für VOC-Kühlgeräte

Gutschriften						
stoffliche Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/m ³]	KEA [MJ/KG]
Flachglas	1,61	0,66	20 % bei Flachglasherstellung *	2872		1,9
Öl **	0,63	0,26				-
PUR	8,15	3,34	Holzmehl	304		1,45
Fe-Fraktion	57,4	23,54	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	10005		235,51
Kupfer	0,66	0,27	Cu _{prim} - Cu _{sek}	43709		11,83
Aluminium	3,32	1,36	Al _{prim} - Al _{sek}	169446		230,7
Polystyrol	12,26	5,03	Schnittholz (geh.)		7184	34,4
Summe						515,78
*Die 20 %ige Energieeinsparung durch den Einsatz von Altglasscherben bei der Flachglasherstellung stellt eine Schätzung dar.						
**Die Verwertung des Kälteöls bleibt unberücksichtigt, einerseits ist das Ersatzprodukt unklar und andererseits gibt es hinsichtlich der Öl-Rückgewinnung ohnehin keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellen.						
therm. Verwertung *	[%]	kg/KG	Ersatzbrennstoff	HW KS [MJ/kg]	kg KS / kg Öl	KEA [MJ/KG]
Polystyrol	12,26	5,03	Öl ($\omega_{\text{O}}=0,85$; $\kappa_{\text{S}} = 0,7$)	39,6	1,2 4	187,00
KS-Industrie.	3,09	1,27	Öl ($\omega_{\text{O}}=0,85$; $\kappa_{\text{S}} = 0,85$)	25,0	1,01	57,91
Kunststoffe.-MVA	11,32	4,64	Öl ($\omega_{\text{O}}=0,85$; $\kappa_{\text{S}} = 0,7$)	25,0	1,64	130,68
PUR-Ölbindemittel	8,15	3,34	Öl ($\omega_{\text{O}}=0,85$; $\kappa_{\text{S}} = 0,5$)	25,0	2,75	55,99
Summe						431,59
*Verbrennung der VOC aus den Kühlgeräten wird nicht berücksichtigt.						
Abzüge						
Prozess	Energiebedarf [MJ/KG]		Energieform	KEA [MJ/KG]		
Shredder	9,0		el. Strom	26,9		
Prozessluftbehandlung	12,2		el. Strom und Wärme	15,0		
Zerkleinerung und Materialauftrennung	9,8		el. Strom	29,4		
Trennung (SEG)	2,1		el. Strom	6,3		
Summe				77,6		
Hilfsmittel	kg/Kühlgerät		KEA [MJ/t]	KEA [MJ/KG]		
N ₂	?*		1200	0		
Summe				0		
*Stickstoffverbrauch nicht bekannt und in der Bilanz nicht berücksichtigt.						



Varianten des Grundmodells:

Auch hier werden für die Modellvarianten nur jene Teile der Bilanzierung dargestellt, die sich von der Bilanzierung des Grundmodells unterscheiden.

Tabelle 9-29: Bilanzierung der Modellvarianten des WS-Typs für VOC-Kühlgeräte

Variante Crykondensation (Energiebedarf siehe Tabelle 9-4)						
(Ob diese Variante auch für VOC-Geräte in Frage kommt ist nicht bekannt, sie wird hier der Vollständigkeit halber angeführt.)						
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]		Energieform		KEA [MJ/KG]
Prozessluftbehandlung		7,37		el. Strom		22,06
Variante mit geringerer Sortiereffizienz (Nur Verbrennung des Polystyrols in MVA)						
stoffliche Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/m³]	KEA [MJ/KG]
Polystyrol	12,26	5,03	keine	0	0	0
Variante mit Berücksichtigung der Mischfraktion PUR-Mehl (PUR+Fremdstoffe)						
stoffliche Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/m³]	KEA [MJ/KG]
PUR	16,15	6,62	Holzmehl	304		2,87
Fe-Fraktion	50,66	20,77	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	10005		207,85
Kupfer	0,62	0,25	Cu _{prim} - Cu _{sek}	43709		11,11
Aluminium	2,88	1,18	Al _{prim} - Al _{sek}	169446		200,12
Anmerkung: Die anteilmäßige Zusammensetzung des PUR-Mehl-Gemisches wurde aus Hornberger et al., 2005 übernommen.						
Variante mit ausschließlich thermischer Verwertung der PUR-Isolierung						
stoffliche Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/m³]	KEA [MJ/KG]
PUR	8,15	3,34	keine	0	0	0

Fortsetzung Tabelle 9-29:

Variante mit Berücksichtigung der Transportleistungen (Transportwege basieren auf dem in Österreich existierenden Verfahren dieses Typs)						
Energieverbrauch für die einzelnen Transportwege	Entfernung [km]	Transportgut	Transportbehälter	KG /tkm *	Spez. Aufwand [tkm/KG]	KEA [MJ/KG]
Timelkam (AUT) - Mettlach (DE)	690	KS-Mischfraktion	BigBags	89	7,75	12,24
Timelkam (AUT) - Mettlach (DE)	690	PUR-Mehl	BigBags	246	2,80	4,43
*Eine Tonne Transportgut wird anhand der durchschnittlichen Zusammensetzung eines VOC-Kühlgerätes berechnet, das Gewicht der Transportbehälter bleibt also unberücksichtigt. Anmerkungen: Für alle Transportwege wird das Transportmittel „LKW mit Anhänger“ angesetzt. Transporte bis zur Anlieferung bei der Behandlungsanlage werden bei dieser Betrachtung vernachlässigt.						
Variante mit industrieller Mitverbrennung der Polystyrolfraktion						
stoffliche Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/m ³]	KEA [MJ/KG]
Polystyrol	12,26	5,03	keine		0	0
therm. Verwertung	[%]	kg/KG	Ersatzbrennstoff	HW KS [MJ/kg]	kg KS / kg Öl	KEA [MJ/KG]
Polystyrol	12,26	5,03	Öl ($\rho_{\text{öl}}=0,85$; $\rho_{\text{KS}} = 0,85$)	39,6	1,02	227,07



Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung

Grundmodell:

Tabelle 9-30: Bilanzierung des Grundmodells des ST-Typs für VOC-Kühlgeräte

Gutschriften						
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/m ³]	KEA [MJ/KG]
Flachglas	1,61	0,66	20 % bei Flachglasherstellung*	2872		1,90
Öl**	0,63	0,26				-
Fe-Fraktion (verwertet)	46,90	19,23	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	10005		192,41
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/m ³]	KEA [MJ/KG]
Fe-Fraktion (nicht vw.)	10,50	4,31	keine			0
Kupfer	0,66	0,27	Cu _{prim} - Cu _{sek}	43709		11,83
Aluminium (verwertet)	1,22	0,50	Al _{prim} - Al _{sek}	169446		84,77
Aluminium (nicht vw.)	2,10	0,86	keine			0
Summe						290,90
*Die 20 %ige Energieeinsparung durch den Einsatz von Altglasscherben bei der Flachglasherstellung stellt eine Schätzung dar.						
**Die Verwertung des Kälteöls bleibt unberücksichtigt, einerseits ist das Ersatzprodukt unklar und andererseits gibt es hinsichtlich der Öl-Rückgewinnung ohnehin keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellen.						
Therm. Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Ersatzbrennstoff	HW KS [MJ/kg]	kg KS / kg Öl	KEA [MJ/KG]
Kunststoffe - Gehäuse	13,53	5,55	Öl ($\omega_{\text{Öl}}=0,85$; $\omega_{\text{KS}} = 0,5$)	31,7*	1,94	132,42
Kunststoffe - Demontage	13,15	5,39	Öl ($\omega_{\text{Öl}}=0,85$; $\omega_{\text{KS}} = 0,7$)	31,7*	1,38	180,04
PUR-Isolierung	8,15	3,34	Öl ($\omega_{\text{Öl}}=0,85$; $\omega_{\text{KS}} = 0,5$)	25,0	2,75	55,99
Summe						368,46
*Die Mischfraktion Kunststoffe besitzt anteilig den Heizwert der einzelnen Fraktionen aus Tabelle 4-2						
Abzüge						
Prozess	Energiebedarf [MJ/KG]		Energieform	KEA [MJ/KG]		
Shredder	12,96		el. Strom	38,79		
Absaugung	1,58		el. Strom	4,74		
Förderbänder	1,44		el. Strom	4,31		
Sortierung+Trennung	0,12		el. Strom	0,35		
Summe:				48,19		

Varianten des Grundmodells:

Für die Modellvarianten werden wiederum nur jene Teile der Bilanzierung dargestellt, die sich vom Grundmodell unterscheiden.

Tabelle 9-31: Bilanzierung der Modellvarianten des ST-Typs für VOC-Kühlgeräte

Variante: Metallabscheidung mit maximaler Effizienz (100 % Fe, 50 % Al;)						
stoffliche Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/m ³]	KEA [MJ/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	57,40	23,54	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	10005		235,48
Aluminium (verwertet)	2,27	0,93	Al _{prim} - Al _{sek}	169446		157,72
Aluminium (nicht vw.)	1,05	0,43	keine	0		0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]		Energieform		KEA [MJ/KG]
Sortierung+Trennung		0,17		el. Strom		0,52
Variante: Metallabscheidung mit theoretisch möglicher Effizienz (100 % Fe, 35 % Al;)						
stoffliche Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/m ³]	KEA [MJ/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	57,40	23,54	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	10005		235,48
Aluminium (verwertet)	1,96	0,80	Al _{prim} - Al _{sek}	169446		136,18
Aluminium (nicht vw.)	1,36	0,56	keine	0		0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]		Energieform		KEA [MJ/KG]
Sortierung+Trennung		0,17		el. Strom		0,52
Variante mit höherer Schlacke-Sortiereffizienz (100 % Fe, 15 % Al)						
stoffliche Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung	KEA [MJ/t]	KEA [MJ/m ³]	KEA [MJ/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	57,40	23,54	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	10005		235,48
Aluminium (verwertet)	1,54	0,63	Al _{prim} - Al _{sek}	169446		107,00
Aluminium (nicht verwertet)	1,78	0,73	keine	0		0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]		Energieform		KEA [MJ/KG]
Sortierung+Trennung		0,17		el. Strom		0,52


Fortsetzung Tabelle 9-31:

Variante mit Berücksichtigung der Transportleistungen (Transportwege basieren auf dem in Österreich existierenden Verfahren dieses Typs)						
Energieverbrauch für die einzelnen Transportwege	Entfernung [km]	Transportgut	Transportbehälter	KG /tkm *	Spez. Aufwand [tkm/KG]	KEA [MJ/KG]
ABA Rinterzelt – Fernwärme Wien	18	Entkernte KG	Mulde	24	0,75	1,18
Fernwärme Wien – ABA Rinterzelt	18	Schlacke	Mulde	73	0,25	0,39
*Eine Tonne Transportgut wird anhand der durchschnittlichen Zusammensetzung eines VOC-Kühlgerätes berechnet, das Gewicht der Transportbehälter bleibt also unberücksichtigt. Anmerkungen: Für alle Transportwege wird das Transportmittel „LKW mit Anhänger“ angesetzt. Transporte bis zur Anlieferung bei der Behandlungsanlage werden bei dieser Betrachtung vernachlässigt.						

9.2.3.2 Bilanzierung der Emissionen

9.2.3.2.1 CO₂

Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung

Grundmodell:

Tabelle 9-32: CO₂-Bilanz des Grundmodells des WS-Typs für VOC-Kühlgeräte

stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung CO ₂	CO ₂ [kg/kg]	CO ₂ [kg/KG]
Flachglas	1,61	0,66	20 % bei Flachglasherstellung*	0,21	0,14
PUR	8,15	3,34	Holzmehl	0	0
Fe-Fraktion	57,40	23,54	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	1,09	25,56
Kupfer	0,66	0,27	Cu _{prim} - Cu _{sek}	3,68	1,00
Aluminium	3,32	1,36	Al _{prim} - Al _{sek}	10,79	14,69
Polystyrol	12,26	5,03	Schnittholz (geh.)	0	0
Summe					41,39

*Die 20 %ige Kohlendioxideinsparung durch den Einsatz von Altglasscherben bei der Flachglasherstellung stellt eine Schätzung dar.

therm. Verwertung	[%]	kg/KG	kg KS / kg Öl*	CO ₂ [kg/kg]	CO ₂ -Vorkette-Öl [kg/KG]	CO ₂ [kg/KG]
Polystyrol	12,26	5,03	1,24	3,079	1,74	14,22
Kunststoffe-Industrie.	3,09	1,27	1,01	3,079	0,54	4,40
Kunststoffe.-MVA	11,32	4,64	1,64	3,079	1,22	9,93
PUR-Ölbindemittel	8,15	3,34	2,75	3,079	0,52	4,26
Summe						32,80

*Die Ermittlung des Umrechnungsfaktors von Kunststoffen auf Öl erfolgt wiederum hinsichtlich Nutzengleichheit, siehe dazu die Erläuterungen zu Tabelle 4-2.

Direkt (Verbrennung)	[%]	kg/Kühlgerät	CO ₂ [kg/kg]	CO ₂ [kg/KG]
Polystyrol	12,26	5,03	3,35	16,83
Kunststoffe-Industrie.	3,09	1,27	3,00	3,81
Kunststoffe.-MVA	11,32	4,64	3,00	13,92
PUR-Ölbindemittel	8,15	3,34	0,74	2,47
Verbrennung VOC	0,76	0,31	3,06	0,95
Summe				37,97

Anmerkung: Die Grundlagen zu dieser Aufstellung finden sich in Tabelle 9-3 und in Tabelle 9-5.

Indirekt (Energie)	Energiebedarf [MJ/KG]	CO ₂ [kg/MJ]	CO ₂ [kg/KG]
Energiebedarf - Strom	21,6	0,17	3,67
Energiebedarf - Wärme (Gas)	11,5	0,062	0,71
Summe			4,39



Modellvarianten:

Für die Varianten des Grundmodells werden wieder nur die teile der Bilanzierung dargestellt, die sich vom Grundmodell unterscheiden.

Tabelle 9-33: CO₂-Teilbilanzen für die Modellvarianten des WS-Typs für VOC-Kühlgeräte

Variante Cryokondensation (Energieverbrauch siehe TABELLE 9.4)						
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]	CO₂ [kg/MJ]	CO₂ [kg/KG]		
Energiebedarf - Strom		28,66	0,17	4,87		
Energiebedarf - Wärme (Gas)		0	0,062	0		
Variante mit Berücksichtigung der Mischfraktion PUR-Mehl (PUR+Fremdstoffe)						
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung CO₂	CO₂ [kg/kg]	CO₂ [kg/KG]	
PUR	16,15	6,62	Holzmehl	0	0,00	
Fe-Fraktion	50,66	20,77	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	1,09	22,56	
Kupfer	0,62	0,25	Cu _{prim} - Cu _{sek}	3,68	0,94	
Aluminium	2,88	1,18	Al _{prim} - Al _{sek}	10,79	12,74	
Anmerkung: Die anteilmäßige Zusammensetzung des PUR-Mehl-Gemisches wurde aus Hornberger et al., 2005 übernommen.						
Variante mit Berücksichtigung der Transportleistungen						
Transportprozess		CO₂ [kg/tkm]	[tkm/KG]*	CO₂ [kg/KG]		
LKW mit Anhänger		0,11612	10,56	1,23		
* Die Ermittlung des spezifischen Transportaufwandes pro Kühlgerät findet sich in Tabelle 9-14						
Variante mit industrieller Mitverbrennung der Polystyrolfraktion						
therm. Verwertung	[%]	kg/KG	kg KS / kg Öl*	CO₂ [kg/kg]	CO₂-Vorkette-Öl [kg/KG]	CO₂ [kg/KG]
Polystyrol	12,26	5,03	1,02	3,079	2,12	17,29

Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung

Grundmodell:

Tabelle 9-34: CO₂-Bilanz des Grundmodells des ST-Typs für VOC-Kühlgeräte

stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung CO ₂	CO ₂ [kg/kg]	CO ₂ [kg/KG]	
Flachglas	1,61	0,66	20 % bei Flachglasherstellung*	0,21	0,14	
Fe-Fraktion	46,90	19,23	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	1,09	20,88	
Kupfer	0,66	0,27	Cu _{prim} - Cu _{sek}	3,68	1,00	
Aluminium	1,22	0,50	Al _{prim} - Al _{sek}	10,79	5,40	
Summe					27,42	
*Die 20 %ige Kohlendioxideinsparung durch den Einsatz von Altglasscherben bei der Flachglasherstellung stellt eine Schätzung dar.						
therm. Verwertung	[%]	kg/KG	kg KS / kg Öl*	CO ₂ [kg/kg]	CO ₂ -Vorkette-Öl [kg/KG]	CO ₂ [kg/KG]
Kunststoff-Gehäuse	13,53	5,55	1,94	3,079	1,23	10,06
Kunststoff-Demontage	13,15	5,39	1,38	3,079	1,67	13,68
PUR-Isolierung	8,15	3,34	2,75	3,079	0,52	4,26
Summe						28,01
*Die Ermittlung des Umrechnungsfaktors von Kunststoffen auf Öl erfolgt wiederum hinsichtlich Nutzengleichheit, siehe dazu die Erläuterungen zu Tabelle 4-2.						
Direkt (Verbrennung)	[%]	kg/Kühlgerät	CO ₂ [kg/kg]	CO ₂ [kg/KG]		
Kunststoffe	26,68	10,94	3,16	34,56		
PUR-Ölbindemittel	8,15	3,34	0,74	2,47		
Verbrennung VOC	0,76	0,31	3,06	0,95		
Summe				37,97		
Anmerkung: Die Grundlagen zu dieser Aufstellung finden sich in Tabelle 9-3 und in Tabelle 9-5.						
Indirekt (Energie)	Energiebedarf [MJ/KG]	CO ₂ [kg/MJ]	CO ₂ [kg/KG]			
Energiebedarf - Strom	16,1	0,17	2,74			
Summe			2,74			



Modellvarianten:

Tabelle 9-35: CO₂-Teilbilanzen für die Modellvarianten des ST-Typs für VOC-Kühlgeräte

Variante: Metallabscheidung mit maximaler Effizienz (100 % Fe, 50 % Al;)					
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung CO ₂	CO ₂ [kg/kg]	CO ₂ [kg/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	60,23	24,69	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	1,09	26,81
Aluminium (verwertet)	2,27	0,93	Al _{prim} - Al _{sek}	10,79	10,04
Aluminium (nicht vw.)	1,05	0,43	keine	0	0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]	CO ₂ [kg/MJ]		CO ₂ [kg/KG]
Sortierung+Trennung		0,17	0,17		0,03
Variante: Metallabscheidung mit theoretisch möglicher Effizienz (100 % Fe, 35 % Al;)					
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung CO ₂	CO ₂ [kg/kg]	CO ₂ [kg/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	60,23	24,69	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	1,09	26,81
Aluminium (verwertet)	1,96	0,80	Al _{prim} - Al _{sek}	10,79	8,67
Aluminium (nicht vw.)	1,36	0,56	keine	0	0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]	CO ₂ [kg/MJ]		CO ₂ [kg/KG]
Sortierung+Trennung		0,17	0,17		0,03
Variante mit höherer Schlacke-Sortiereffizienz (100 % Fe, 15 % Al;)					
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung CO ₂	CO ₂ [kg/kg]	CO ₂ [kg/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	60,23	24,69	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	1,09	26,81
Aluminium (verwertet)	1,54	0,63	Al _{prim} - Al _{sek}	10,79	6,81
Aluminium (nicht vw.)	1,78	0,73	keine	0	0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]	CO ₂ [kg/MJ]		CO ₂ [kg/KG]
Sortierung+Trennung		0,17	0,17		0,03
Variante mit Berücksichtigung der Transportleistungen					
Transportprozess		CO ₂ [kg/tkm]	[tkm/KG]*		CO ₂ [kg/KG]
LKW mit Anhänger		0,11612	1,0		0,12
*Die Ermittlung des spezifischen Transportaufwandes pro Kühlgerät findet sich in Tabelle 9-12					

9.2.3.2.2 HCl

Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung

Tabelle 9-36: Bilanz der HCl-Emissionen für das Grundmodell des WS-Typs für VOC-Geräte

HCl-Einsparung						
stoffl. Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung HCl		HCl [g/kg]	HCl [g/KG]
Flachglas	1,61	0,66	20 % bei Flachglasherstellung*		0,0006	0,0004
PUR	8,15	3,34	Holzmehl		-	
Fe-Fraktion	57,40	23,54	Stahl _{ox} - Stahl _{el}		-0,0064	-0,1495
Kupfer	0,66	0,27	Cu _{prim} - Cu _{sek}		0,8242	0,2231
Aluminium	3,32	1,36	Al _{prim} - Al _{sek}		0,2593	0,3530
Polystyrol	12,26	5,03	Schnittholz (geh.)		-	-
Summe						0,4270
*Die 20 %ige Kohlendioxideinsparung durch den Einsatz von Altglasscherben bei der Flachglasherstellung stellt eine Schätzung dar.						
therm. Verwertung	[%]	kg/KG	kg KS / kg Öl*	HCl [g/kg]	HCl-Vorkette-Öl [g/KG]	CO ₂ [g/KG]
Polystyrol	12,26	5,03	1,24	0	0,0553	0,0553
Kunststoffe-Industrie.	3,09	1,27	1,01	0	0,0171	0,0171
Kunststoffe.-MVA	11,32	4,64	1,64	0	0,0386	0,0386
PUR-Ölbindemittel	8,15	3,34	2,75	0	0,0166	0,0166
Summe				0		0,1277
*Die Ermittlung des Umrechnungsfaktors von Kunststoffen auf Öl erfolgt wiederum hinsichtlich Nutzengleichheit, siehe dazu die Erläuterungen zu Tabelle 4-2.						
HCl-Ausstoß						
Direkt (Verbrennung)*	[%]	kg/KG	HCl [g/kg]	HCl [g/kg] (Rauchgas)	HCl [g/kg] (Reingas**)	
Polystyrol	12,26	5,03	0	0	0	
Kunststoffe-Industrie.	3,09	1,27	11,68	14,8336	0,0742	
Kunststoffe.-MVA	11,32	4,64	11,68	54,1952	0,2710	
PUR-Ölbindemittel	8,15	3,34	0	0	0	
Summe					0,3452	
*PVC-Anteil in den Kunststoffmischfraktionen 2 % → 1 g PVC verbrennt zu 0,5837 g HCl.						
**Reinigungsleistung 99,5 % (Tabelle 9-16).						
Indirekt (Energie)		Energiebedarf [MJ/KG]	HCl [g/MJ]		HCl [g/KG]	
Energiebedarf - Strom		21,6	0,0048		0,1080	
Energiebedarf - Wärme (Gas)		11,5	0,000078		0,0009	
Summe					0,1089	



Tabelle 9-37: Bilanzierung der vom Grundmodell abweichenden Verfahrensteile für die HCl-Emissionen der Modellvarianten des WS-Typs für VOC-Geräte

Variante Cryokondensation (Energieverbrauch siehe Tabelle 9-4)						
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]		HCl [g/MJ]		HCl [g/KG]
Energiebedarf - Strom		28,66		0,0048		0,1433
Energiebedarf - Wärme (Gas)		0		0,000078		
Variante mit Berücksichtigung der Mischfraktion PUR-Mehl (PUR+Fremdstoffe)						
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung HCl	HCl [g/kg]	HCl [g/KG]	
PUR	16,15	6,62	Holzmehl			
Fe-Fraktion	50,66	20,77	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	-0,0064	-0,1319	
Kupfer	0,62	0,25	Cu _{prim} - Cu _{sek}	0,8242	0,2096	
Aluminium	2,88	1,18	Al _{prim} - Al _{sek}	0,2593	0,3062	
Anmerkung: Die anteilmäßige Zusammensetzung des PUR-Mehl-Gemisches wurde aus Hornberger et al., 2005 übernommen.						
Variante mit Berücksichtigung der Transportleistungen						
Transportprozess		HCl [g/tkm]		[tkm/KG]*		HCl [g/KG]
LKW mit Anhänger		0,0005		10,56		0,0052
* Die Ermittlung des spezifischen Transportaufwandes pro Kühlgerät findet sich in Tabelle 9-11						
Variante mit industrieller Mitverbrennung der Polystyrolfraktion						
therm. Verwertung	[%]	kg/KG	kg KS / kg Öl*	HCl [g/kg]	HCl-Vorkette-Öl [g/KG]	HCl [g/KG]
Polystyrol	12,26	5,03	1,02	0	0,0673	0,0673

Verfahren mit kombinierter stofflicher und thermischer Verwertung

Tabelle 9-38: Bilanzierung der HCl-Emissionen für das Grundmodell des ST-Typs für VOC-Geräte

HCl-Einsparung						
stoffl. Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung HCl		HCl [g/kg]	HCl [g/KG]
Flachglas	1,61	0,66	20 % bei Flachglasherstellung*		0,0006	0,0004
Fe-Fraktion	46,90	19,23	Stahl _{ox} - Stahl _{el}		-0,0064	-0,1221
Kupfer	0,66	0,27	Cu _{prim} - Cu _{sek}		0,8242	0,2231
Aluminium	1,22	0,50	Al _{prim} - Al _{sek}		0,2593	0,1297
Summe						0,2311
*Die 20 %ige Einsparung an HCl-Emissionen durch den Einsatz von Altglasscherben bei der Flachglasherstellung stellt eine Schätzung dar.						
therm. Verwertung	[%]	kg/KG	kg KS / kg Öl*	HCl [g/kg]	HCl-Vorkette-Öl [g/KG]	HCl [g/KG]
Kunststoffe-Gehäuse	13,53	5,55	1,94	0	0,0392	0,0392
Kunststoffe-Demontage	13,15	5,39	1,38	0	0,0532	0,0532
PUR-Ölbindemittel	8,15	3,34	2,75	0	0,0166	0,0166
Summe				0		0,109
*Die Ermittlung des Umrechnungsfaktors von Kunststoffen auf Öl erfolgt wiederum hinsichtlich Nutzengleichheit, siehe dazu die Erläuterungen zu Tabelle 4-2.						
HCl-Ausstoß						
Direkt (Verbrennung)*	[%]	kg/KG	HCl [g/kg]	HCl [g/kg] (Rauchgas)	HCl [g/kg] (Reingas **)	
Mischfraktion Kunststoffe	26,68	10,94	6,3072	69,0008	0,3450	
PUR-Ölbindemittel	8,15	3,34	0	0	0	
Summe					0,3450	
*PVC-Anteil in der Kunststoffmischfraktion äquivalent dem Anteil beim WS-Typ → Bei der Verbrennung von 1 g PVC entstehen 0,5837 g HCl.						
**Reinigungsleistung 99,5 % (Tabelle 9-16).						
Indirekt (Energie)		Energiebedarf [MJ/KG]	HCl [g/MJ]		HCl [g/KG]	
Energiebedarf - Strom		16,1	0,0048		0,0805	
Summe					0,0805	



Tabelle 9-39: HCl-Bilanz für die, vom Grundmodell abweichenden, Verfahrensteile der Modellvarianten des ST-Typs für VOC-Geräte

Variante: Metallabscheidung mit maximaler Effizienz (100 % Fe, 50 % Al;)					
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung HCl	HCl [g/kg]	HCl [g/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	57,40	23,54	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	-0,0064	-0,1495
Aluminium (verwertet)	2,27	0,93	Al _{prim} - Al _{sek}	0,2593	0,2414
Aluminium (nicht ww.)	1,05	0,43	keine	0	0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]	HCl [g/MJ]		HCl [g/KG]
Sortierung+Trennung		0,17	0,0048		0,0008
Variante: Metallabscheidung mit theoretisch möglicher Effizienz (100 % Fe, 35 % Al;)					
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung HCl	HCl [g/kg]	HCl [g/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	57,40	23,54	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	-0,0064	-0,1495
Aluminium (verwertet)	1,96	0,80	Al _{prim} - Al _{sek}	0,2593	0,2084
Aluminium (nicht ww.)	1,36	0,56	keine	0	0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]	HCl [g/MJ]		HCl [g/KG]
Sortierung+Trennung		0,17	0,0048		0,0008
Variante mit höherer Schlacke-Sortiereffizienz (100 % Fe, 15 % Al;)					
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung HCl	HCl [g/kg]	HCl [g/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	57,40	23,54	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	-0,0064	-0,1495
Aluminium (verwertet)	1,54	0,63	Al _{prim} - Al _{sek}	0,2593	0,1637
Aluminium (nicht ww.)	1,78	0,73	keine	0	0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]	HCl [g/MJ]		HCl [g/KG]
Sortierung+Trennung		0,17	0,0048		0,0008
Variante mit Berücksichtigung der Transportleistungen					
Transportprozess		HCl [g/tkm]		[tkm/KG]*	HCl [g/KG]
LKW mit Anhänger		0,0005		1,00	0,0005
*Die Ermittlung des spezifischen Transportaufwandes pro Kühlgerät findet sich in Tabelle 9-12					

9.2.3.2.3 HF

Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung

Tabelle 9-40: Bilanzierung der HF-Emissionen für das Grundmodell des WS-Typs für VOC-Geräte

HF-Einsparung						
stoffl. Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung HF	HF [g/kg]	HF [g/KG]	
Flachglas	1,61	0,66	20 % bei Flachglasherstellung*	0,0003	0,0002	
PUR	8,15	3,34	Holzmehl	0	0	
Fe-Fraktion	57,40	23,54	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	-0,0006	-0,0133	
Kupfer	0,66	0,27	Cu _{prim} - Cu _{sek}	0,0810	0,0219	
Aluminium	3,32	1,36	Al _{prim} - Al _{sek}	0,0574	0,0782	
Polystyrol	12,26	5,03	Schnittholz (geh.)	0	0	
Summe					0,0870	
*Die 20 %ige Einsparung an HF-Emissionen durch den Einsatz von Altglasscherben bei der Flachglasherstellung stellt eine Schätzung dar.						
therm. Verwertung	[%]	kg/KG	kg KS / kg Öl*	HF [g/kg]	HF-Vorkette- Öl [g/KG]	HF [g/KG]
Polystyrol	12,26	5,03	1,24	0	0,0039	0,0039
Kunststoffe-Industrie.	3,09	1,27	1,01	0	0,0012	0,0012
Kunststoffe.-MVA	11,32	4,64	1,64	0	0,0027	0,0027
PUR-Ölbindemittel	8,15	3,34	2,75	0	0,0012	0,0012
Summe						0,0090
*Die Ermittlung des Umrechnungsfaktors von Kunststoffen auf Öl erfolgt wiederum hinsichtlich Nutzengleichheit, siehe dazu die Erläuterungen zu Tabelle 4-2.						
HF-Ausstoß						
Direkt (Bei der Verbrennung der Kunststoffe entstehen keine direkten HF-Emissionen)						
Indirekt (Energie)		Energiebedarf [MJ/KG]		HF [g/MJ]	HF [g/KG]	
Energiebedarf - Strom		21,6		0,0004	0,0076	
Energiebedarf - Wärme (Gas)		11,5		0,0000	0,0001	
Indirekt (Hilfsmaterialien)		Verbrauch [kg/KG]		HF [g/MJ]	HF [g/KG]	
N ₂		?			-	
Summe					0,0077	



Tabelle 9-41: HF-Teilbilanzen für die Modellvarianten des WS-Typs für VOC-Geräte

Variante Cryokondensation (Energieverbrauch siehe Tabelle 9-4)						
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]	HF [g/MJ]	HF [g/KG]		
Energiebedarf - Strom		28,66	0,0004	0,0101		
Energiebedarf - Wärme (Gas)		0		0		
Variante mit Berücksichtigung der Mischfraktion PUR-Mehl (PUR+Fremdstoffe)						
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung HF	HF [g/kg]	HF [g/KG]	
PUR	16,15	6,62	Holzmehl	0	0	
Fe-Fraktion	50,66	20,77	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	-0,0006	-0,0117	
Kupfer	0,62	0,25	Cu _{prim} - Cu _{sek}	0,0810	0,0206	
Aluminium	2,88	1,18	Al _{prim} - Al _{sek}	0,0574	0,0678	
Anmerkung: Die anteilmäßige Zusammensetzung des PUR-Mehl-Gemisches wurde aus Hornberger et al., 2005 übernommen.						
Variante mit Berücksichtigung der Transportleistungen						
Transportprozess		HF [g/tkm]	[tkm/KG]*	HF [g/KG]		
LKW mit Anhänger		0,0000	10,56	0,0004		
* Die Ermittlung des spezifischen Transportaufwandes pro Kühlgerät findet sich in Tabelle 9-11						
Variante mit industrieller Mitverbrennung der Polystyrolfraktion						
therm. Verwertung	[%]	kg/KG	kg KS / kg Öl	HF [g/kg]	HF-Vorkette-Öl [g/KG]	HF [g/KG]
Polystyrol	12,26	5,03	1,02	0	0,0048	0,0048

Verfahren mit kombinierter thermischer und stofflicher Verwertung

Tabelle 9-42: Bilanzierung der HF-Emissionen für das Grundmodell des ST-Typs für VOC-Geräte

HF-Einsparung						
stoffl. Verwertung	[%]	kg/KG	Einsparung HF		HF [g/kg]	HF [g/KG]
Flachglas	1,61	0,66	20 % bei Flachglasherstellung*		0,0003	0,0002
Fe-Fraktion	46,90	19,23	Stahl _{ox} - Stahl _{el}		-0,0006	-0,0109
Kupfer	0,66	0,27	Cu _{prim} - Cu _{sek}		0,0810	0,0219
Aluminium	1,22	0,50	Al _{prim} - Al _{sek}		0,0574	0,0287
Summe						0,0400
*Die 20 %ige Einsparung an HF-Emissionen durch den Einsatz von Altglasscherben bei der Flachglasherstellung stellt eine Schätzung dar.						
therm. Verwertung	[%]	kg/KG	kg KS / kg Öl*	HF [g/kg]	HF-Vorkette-Öl [g/KG]	HF [g/KG]
Kunststoffe-Gehäuse	13,53	5,55	1,94	0	0,0028	0,0028
Kunststoffe-Demontage	13,15	5,39	1,38	0	0,0038	0,0038
PUR-Ölbindemittel	8,15	3,34	2,75	0	0,0014	0,0012
Summe				0		0,0077
*Die Ermittlung des Umrechnungsfaktors von Kunststoffen auf Öl erfolgt wiederum hinsichtlich Nutzengleichheit, siehe dazu die Erläuterungen zu Tabelle 4-2.						
HF-Ausstoß						
Indirekt (Energie)		Energiebedarf [MJ/KG]		HF [g/MJ]		HF [g/KG]
Energiebedarf - Strom		16,1		0,0004		0,0057
Summe						0,0057



Tabelle 9-43: HF-Teilbilanzen für die Modellvarianten des ST-Typs für VOC-Geräte

Variante: Metallabscheidung mit maximaler Effizienz (100 % Fe, 50 % Al;)					
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung HF	HF [g/kg]	HF [g/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	57,40	23,54	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	-0,0006	-0,0133
Aluminium (verwertet)	2,27	0,93	Al _{prim} - Al _{sek}	0,0574	0,0535
Aluminium (nicht vw.)	1,05	0,43	keine	0	0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]	HF [g/MJ]		HF [g/KG]
Sortierung+Trennung		0,17	0,0004		0,0000
Variante: Metallabscheidung mit theoretisch möglicher Effizienz (100 % Fe, 35 % Al;)					
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung HCl	HF [g/kg]	HF [g/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	57,40	23,54	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	-0,0006	-0,0133
Aluminium (verwertet)	1,96	0,80	Al _{prim} - Al _{sek}	0,0574	0,0462
Aluminium (nicht vw.)	1,36	0,56	keine	0	0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]	HF [g/MJ]		HF [g/KG]
Sortierung+Trennung		0,17	0,0004		0,0000
Variante mit höherer Schlacke-Sortiereffizienz (100 % Fe, 15 % Al;)					
stoffliche Verwertung	[%]	kg/Kühlgerät	Einsparung HF	HF [g/kg]	HF [g/KG]
Fe-Fraktion (verwertet)	57,40	23,54	Stahl _{ox} - Stahl _{el}	-0,0006	-0,0133
Aluminium (verwertet)	1,54	0,63	Al _{prim} - Al _{sek}	0,0574	0,0363
Aluminium (nicht vw.)	1,78	0,73	keine	0	0
Energieverbrauch		Energiebedarf [MJ/KG]	HF [g/MJ]		HF [g/KG]
Sortierung+Trennung		0,17	0,0004		0,0000
Variante mit Berücksichtigung der Transportleistungen					
Transportprozess		HF [g/tkm]		[tkm/KG]*	HF [g/KG]
LKW mit Anhänger		0,0000		1,00	0,0000

*Die Ermittlung des spezifischen Transportaufwandes pro Kühlgerät findet sich in Tabelle 9-12

9.2.3.2.4 Feste Abfälle

Verfahren mit weitgehender stofflicher Verwertung
Tabelle 9-44: Feste Abfälle des Grundmodells des WS-Typs für VOC-Geräte

Direkte Ablagerung	[%]	kg/KG	Abgelagertes Material			Gesamt [kg/KG]
Restmaterialien (nicht verwertet)	0,78	0,32	Ungefährlicher Abfall			0,32
Quecksilberschalter, Kondensatoren	0,00	0,00	Gefährlicher Abfall			0,00
Kunststoffverbrennung (Rückstände)*	[%]	kg/KG	Flugasche [kg/KG]	Filterkuchen [kg/KG]	Schlacke [kg/KG]	Gesamt [kg/KG]
Kunststoffe (PS und gemischt)	26,68	10,94	0,197	0,003	0,416	0,62
PUR-Mehl	8,81	3,34	0,060	0,001	0,127	0,19
Gesamtanfall an festen Abfällen			1,12 kg pro Kühlgerät			
*Die massenmäßige Aufteilung der Kunststoffe in die verschiedenen Verbrennungsrückstände findet sich in Tabelle 9-6						

Tabelle 9-45: Feste Abfälle der Modellvariante "PUR+Reststoffe" des WS-Typs für VOC-Geräte

Direkte Ablagerungen	[%]	kg/KG	Abgelagertes Material			Gesamt [kg/KG]
Metallanteil im Ölbindemittel (nicht vw.)	7,22	2,96	Metallstaub nach Verbrennung des PUR-Ölbindemittels			2,96
Quecksilberschalter, Kondensatoren	0,00	0,00	Gefährlicher Abfall			0,00
Kunststoffverbrennung	[%]	kg/KG	Flugasche [kg/KG]	Filterkuchen [kg/KG]	Schlacke [kg/KG]	Gesamt [kg/KG]
Kunststoffe (PS und gemischt)	26,68	10,94	0,197	0,003	0,416	0,62
PUR-Mehl	9,59	3,66	0,066	0,001	0,139	0,21
Gesamtanfall an festen Abfällen			3,78 kg pro Kühlgerät			

**Tabelle 9-46: Feste Abfälle des Grundmodells des ST-Typs für VOC-Geräte**

Direkte Ablagerungen	[%]	kg/KG	Abgelagertes Material			Gesamt [kg/KG]
Quecksilberschalter, Kondensatoren	0,00	0,00	Gefährlicher Abfall			0,00
Verbrennung	[%]	kg/KG	Flugasche [kg/KG]	Filterkuchen [kg/KG]	Schlacke [kg/KG]	Gesamt [kg/KG]
Kunststoffe* (aus Demontage)	13,16	5,39	0,097	0,002	0,205	0,30
Kühlgerätegehäuse	52,73	21,62	1,43	0,16	5,29**	6,88
Gesamtanfall an festen Abfällen			7,18 kg pro Kühlgerät			
* Die massenmäßige Aufteilung der Kunststoffe in die verschiedenen Verbrennungsrückstände findet sich in Tabelle 9-6						
** Restschlacke nach Abtrennung der verwerteten Metallfraktionen						

Tabelle 9-47: Feste Abfälle der Modellvarianten des ST-Typs für VOC-Geräte

Variante: Metallabscheidung mit maximaler Effizienz (100 % Fe, 50 % Al;)						
Verbrennung	[%]	kg/KG	Flugasche [kg/KG]	Filterkuchen [kg/KG]	Schlacke [kg/KG]	Gesamt [kg/KG]
Kühlgerätegehäuse	52,73	21,62	1,43	0,16	0,55*	2,14
Gesamtanfall an festen Abfällen			2,44 kg pro Kühlgerät			
*Restschlacke nach Abtrennung der verwerteten Metallfraktionen						
Variante: Metallabscheidung mit theoretisch möglicher Effizienz (100 % Fe, 35 % Al;)						
Verbrennung	[%]	kg/KG	Flugasche [kg/KG]	Filterkuchen [kg/KG]	Schlacke [kg/KG]	Gesamt [kg/KG]
Kühlgerätegehäuse	52,73	21,62	1,43	0,16	0,68*	2,27
Gesamtanfall an festen Abfällen			2,57 kg pro Kühlgerät			
*Restschlacke nach Abtrennung der verwerteten Metallfraktionen						
Variante: Metallabscheidung mit höherer Effizienz (100 % Fe, 15 % Al;)						
Verbrennung	[%]	kg/KG	Flugasche [kg/KG]	Filterkuchen [kg/KG]	Schlacke [kg/KG]	Gesamt [kg/KG]
Kühlgerätegehäuse	52,73	21,62	1,43	0,16	0,85*	2,44
Gesamtanfall an festen Abfällen			2,74 kg pro Kühlgerät			
*Restschlacke nach Abtrennung der verwerteten Metallfraktionen						