

Untersuchung des Ozonschicht- zerstörungs- und Klimaschädi- gungspotenzials bei der Durch- führung des Kühlgeräterecyclings mittels Handdemontage

Darmstadt, 14. September 2010

Auftraggeber:

RAL – Gütegemeinschaft Rückproduktion von
Kühlgeräten e.V.

Autoren:

Günter Dehoust
Dr. Doris Schüler

Öko-Institut e.V.

Geschäftsstelle Freiburg
Postfach 50 02 40
79028 Freiburg, Deutschland
Hausadresse
Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg, Deutschland
Tel. +49 (0) 761 - 4 52 95-0
Fax +49 (0) 761 - 4 52 95-88

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt, Deutschland
Tel. +49 (0) 6151 - 81 91-0
Fax +49 (0) 6151 - 81 91-33

Büro Berlin

Novalisstraße 10
10115 Berlin, Deutschland
Tel. +49 (0) 30 – 40 50 85-361
Fax +49 (0) 30 – 40 50 85 - 388

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Versuche.....	2
2.1	Versuchskonzeption.....	2
2.2	Versuchsdurchführung	2
2.3	Methodik der Versuchsauswertung.....	3
2.4	Versuchsergebnisse.....	5
2.4.1	Ergebnisse für den Korpus	5
2.4.2	Ergebnisse für die Türen	6
2.4.3	Ergebnisse für das gesamte Gerät	8
2.4.4	Fehlerbetrachtung	9
2.4.5	Zusammenhang zwischen Größe und FCKW-Verlust.....	11
2.4.6	Diskussion der Ergebnisse	11
3	Bewertung der Versuchsergebnisse	14
4	Ozonschichtzerstörungs- und Klimaschädigungspotenzial	16
4.1	Ozonschichtzerstörungspotenzial	16
4.2	Klimaschädigungspotenzial	16
5	Schlussfolgerungen für die Praxis des Kühlgeräte- Recyclings	18
6	Literatur	19
7	Anhang 1: Bilddokumentation zur händischen Zerlegung von Kühlgeräten in der Praxis in den USA.....	20
8	Anhang 2: Bilddokumentation zum Limburger Versuch vom 14. – 16. September 2009.....	21

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1	Korrelation zwischen Gerätegröße und FCKW-Verlust	11
---------------	---	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Versuchsergebnisse für den Korpus	6
Tabelle 2-2:	Versuchsergebnisse für die Türen	7
Tabelle 2-3:	Versuchsergebnisse für die Gesamtgeräte	9
Tabelle 3-1:	Versuchsergebnisse für die Gesamtgeräte, ohne die drei größtenGeräte	14

1 Einleitung

Bei dem Recycling von Alt-Kühlgeräten nach dem Stand der Technik werden die Geräte in voll gekapselten Anlagen zerlegt, geschreddert und die einzelnen Wert- und Schadstoffe für eine Verwertung oder Beseitigung getrennt. Erfolgt dies beispielsweise nach den Vorgaben und unter der Qualitätssicherung des RAL (RAL-GZ 728) werden dabei mehr als 90 % der besonders schädlichen FCKW abgetrennt und einer sicheren Zerstörung zugeführt.

In einzelnen Staaten der Welt ist angedacht, bei der Einführung eines geordneten Kühlgeräte-Recyclings aus wirtschaftlichen Erwägungen auf die vollmechanische Behandlung entsprechende dem allgemein anerkannten Stand der Technik zu verzichten. Vielmehr sollen dort nach der Entfernung der Kühlflüssigkeit in der Stufe I die Geräte per Hand zerlegt und die Schäume danach entweder deponiert, verbrannt oder einer (bis dato weder im Detail geplanten, noch in die Praxis umgesetzten) Behandlung in speziellen Entgasungsanlagen (mit Extraktion und späterer Verflüssigung der FCKW) zugeführt werden.

Zur Beantwortung der Frage, zu welchen (Mehr-)Emissionen an FCKW dieses Vorgehen führt, sind die Emissionen der Händischen Zerlegung und der Entsorgung in einer MVA sowie auf einer Deponie zu ermitteln und mit den Emissionen bei einer Behandlung der Kühlgeräte und Entsorgung der Rest- und Wertstoffe nach dem Stand der Technik abzugleichen. Es ist ferner das Ozonschichtzerstörungs- und Klimaschädigungspotential zu ermitteln.

Die relativ geringen FCKW-Emissionen bei der Kühlgeräteentsorgung nach dem Stand der Technik (Einhaltung der Vorgaben zur Erlangung des RAL-Gütezeichens GZ 728) wurden in einer Ökobilanz des Öko-Instituts e.V. für die RAL – Gütegemeinschaft Rückproduktion von Kühlgeräten e.V. [Öko-Institut 2007] berechnet und bewertet. Dabei wurden Emissionen je durchschnittlichem Kühlgerät (40 kg je Gerät, 80 % FCKW-Geräte) etwa 0,45 g FCKW (angegeben als R11-Äquivalente) emittiert. Als Hauptemissionsquelle waren die Restanhaftungen im entgasten PUR-Schaum identifiziert worden, die bei der weiteren Verwendung der Schäume zu einem geringen Teil freigesetzt werden.

In dieser Studie werden durch einen Versuch zur händischen Zerlegung von Kühlgeräten die durchschnittlichen Emissionen ausschließlich während der Zerlegungsphase ermittelt. Die zu erwartenden Emissionen während der Entsorgungsphase werden zu einem späteren Zeitpunkt in separaten Gutachten ermittelt und sollen dann in einem gemeinsamen Endbericht bewertet werden.

2 Versuche

2.1 Versuchskonzeption

Die Konzeption des Versuchs erfolgte aufgrund von Berichten und Bild- sowie Filmdokumentationen über das Vorgehen der händischen Zerlegung von Kühlgeräten in Anlagen in den USA (Freep 2009).

2.2 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden vom 14. – 16. September 2009 am Entsorgungszentrum der GAB mbH in Limburg durchgeführt. Die GAB mbH Limburg ist seit mehr als 10 Jahren mit der umweltgerechten Demontage von Elektro-Altgeräten befasst. Die Demontage wurde vom geschultem Personal der GAB mbH durchgeführt. Die Wägung und Protokollierung erfolgte durch das Öko-Institut.

Die Vor-Demontage der Geräte erfolgte nach US-amerikanischen Vorbild fast ausschließlich mit professionellen Werkzeugen, unter anderem mit einem hochwertigen Elektrofuchsschwanz, mit dem sowohl die Kunststoff- als auch die Metallkorpusse leicht durchgetrennt werden konnten. Außerdem wurden spezielle Montageeisen bzw. Brechstangen eingesetzt. Zur Abschabung der PUR-Schäume wurde ein Spezialwerkzeug eingesetzt. Geräte, die viele Staubabsonderungen verursachen, z.B. Winkelschleifer, kamen nicht zum Einsatz.

Es muss hier angemerkt werden, dass die GAB eine Demontage, gewissermaßen im Pilotbetrieb, vorgenommen hat. Inwieweit in der Praxis tatsächlich so sauber wie in dieser „Modell-Anordnung“ gearbeitet wird, kann im Rahmen dieser Studie nicht geklärt werden.

Die Demontageversuche wurden fotografisch dokumentiert (siehe Anlage 2).

Folgende Waage wurde verwendet:

Rhewa Waage 833C, Wägebereich 0 - 40 kg, Ziffernschritt 1 g, Linearität +/- 5 g.

Der Versuchsablauf war folgender:

1. Die GAB mbH hat rund 20 Kühlgeräte in verschiedenen Größen zur Verfügung gestellt und die Behandlung der Geräte in Stufe 1 durchgeführt (Absaugung/Entnahme von FCKW R12 und dem Kältemaschinenöl aus dem Kältekreislauf sowie die Demontage von Glas, Kondensatoren, Hg-Schalter, Kompressor, Abdeckungen und losen Kunststoffteilen). Die Türen wurden abgeschraubt. Für den weiteren Versuchsablauf standen damit die reinen Korpusse und Türen getrennt zur Verfügung.

2. In den nächsten Schritten wurden für 9 Korpuse und 9 Türen die Massen ermittelt. Es wurden nur Geräte untersucht, bei denen sowohl im Korpus als auch in der Tür PUR-Schaum enthalten war. Styroporhaltige Geräte wurden nicht betrachtet. Von allen neun Geräten wurden nach den Versuchen PUR-Schaum-Proben im Labor auf ihre Gehalte untersucht. Das Labor hat bestätigt, dass in allen neun Proben das FCKW R11 enthalten war.
3. Korpuse und Türen wurden getrennt untersucht. Zunächst wurden die Korpuse bzw. Türen in eine große Wanne gestellt und in der Wanne demontiert. Die Demontage kann als Grobdemontage bezeichnet werden, da im Wesentlichen der Fuchsschwanz zum Einsatz kam und die Schaumteile größtenteils händisch entnommen wurden bzw. mit einem Montageeisen abgetrennt wurden. Es erfolgte, wie in den bekannten USA-Betrieben kein kleinflächiges Abschaben der Restanhaftung! Es fielen folgende Demontagefraktionen an: Metall- und Kunststofffraktion mit PUR-Restanhaftung, grobe PUR-Schaum-Stücke und eine massenmäßig kleine Feinfraktion (v.a. Metall- und Kunststoffspäne). Die Feinfraktion bestand aus den kleinen Partikeln, die auf den Wannenboden fielen sowie Kehrgut aus dem Umkreis der Wanne. Kleinere PUR-Stücke vom Wannenboden oder dem Fußboden wurden zur PUR-Fraktion zugegeben. Anschließend wurde das Gewicht von allen Fraktionen (einschließlich Feinfraktion und Kehrgut) ermittelt.
4. Abschließend wurde das Gewicht der PUR-Restanhaftung an Metallen und Kunststoff ermittelt. Zu diesem Zweck wurde der PUR-Schaum händisch mit Stechbeiteln, Drahtbürste und weiteren Werkzeugen bis auf von den Gehäusebauteilen abgeschabt und anschließend verwogen.
5. Von 7 Geräten wurde die PUR-Fraktion in offenen Säcken gelagert und nach 24 Stunden erneut verwogen. Die Massendifferenz des PUR wurde bestimmt.
6. Von 4 Geräten wurde die PUR-Fraktion nach 2 Wochen ein weiteres Mal verwogen.

2.3 Methodik der Versuchsauswertung

Die ermittelten Daten aus den Versuchen wurden für die Korpuse und Türen getrennt ausgewertet. Das Ziel der Auswertung war abzuschätzen, wie viel FCKW durch die händische Demontage in die Luft entweicht, wie viel FCKW in der Restanhaftung verbleibt und wie viel FCKW bei der nachfolgenden Lagerung der PUR-Fraktion in die Luft entweicht.

Für die Abschätzung wurden folgende Annahmen getroffen:

- Der ursprüngliche FCKW-Gehalt des PUR-Schaums wurde nach [UBA 1998] mit durchschnittlich 8,5 % für alle Geräte angesetzt.
- Es wurde davon ausgegangen, dass der Massenverlust bei der Grobdemontage ausschließlich auf der FCKW-Entgasung beruht.
- Der verbleibende FCKW-Gehalt in der Restanhaftung (PUR-Schaum an den Gehäuseteilen nach Grobdemontage) wird auf 50 % des ursprünglichen FCKW-

Gehalts geschätzt. Dieser Wert wurde aus folgenden Überlegungen abgeleitet: Die Restanhaftung beim Kühlgeräterecycling im Normalbetrieb der Stufe II (Behandlung von FCKW-haltigen und FCKW-freien Geräten) mit einer starken Zerkleinerung des Gehäuses enthält noch rund 30% der ursprünglichen FCKW-Menge [UBA 1998] [Elektrolux 1989] [iuta 2005]¹. Im Parallelbetrieb der Stufe II (getrennte Verarbeitung von FCKW-haltigen und FCKW-freien Geräten) werden gröbere PUR-Schaumstücke gewonnen, deren FCKW-Gehalt von Firmenvertretern auf rund 70 % der ursprünglichen FCKW-Menge abgeschätzt wird [Öko-Institut 2007]. Der FCKW-Gehalt in der Resthaftung nach der Handdemontage dürfte zwischen diesen beiden Werten liegen. Es erfolgt keine so starke Zerkleinerung wie beim Mischbetrieb. Zugleich sind die Restanhaftungen deutlich weniger kompakt und haben deutlich größere spezifisch Oberflächen als die Stücke aus der PUR-Output-Fraktion beim Parallelbetrieb. Aus diesem Grunde scheint ein verbleibender FCKW-Gehalt in der Restanhaftung nach der Handdemontage mit 50 % des ursprünglichen FCKW-Gehalts bzw. 4,25 % des verbleibenden Schaums eine sehr plausible Annahme zu sein.

- Es wurde davon ausgegangen, dass der Massenverlust der PUR-Fraktion während der Lagerung ausschließlich auf der FCKW-Entgasung beruht.
- Für die FCKW-Verluste werden vier Pfade betrachtet:
 - o Die FCKW-Freisetzung in die Luft während des Sägevorganges
 - o die FCKW-Freisetzung in die Luft während der weiteren Demontage mit Montageeisen bzw. Brechstangen und dem Spezialwerkzeug zur Abschabung der PUR-Schäume,
 - o der FCKW-Verbleib in der Restanhaftung. Es ist davon auszugehen, dass dieser FCKW-Anteil im Zuge des weiteren Kunststoff- und Metallrecyclings bei Zerkleinerungsprozessen nahezu vollständig freigesetzt wird,
 - o die FCKW-Verluste während der Lagerung der PUR-Schaum-Fraktion nach der Demontage.

Eine Diskussionen zu den Datenunsicherheiten und die Ergebnisse von Fehlerrechnungen werden in Kap. 2.4.4 dargestellt.

¹ Vgl. UBA-Leitfaden [UBA 1998]. Dort wird angenommen, dass nach dem Shreddern noch 20-30% des R11 im zerkleinerten Schaum enthalten sind. Untersuchungen eines Anlagenbetreibers [iuta 2005] ergaben, dass nach der Zerkleinerung mit einer Rotorschere noch 28 – 34% des R11 im Schaum eingeschlossen sind. Untersuchungen nach [Elektrolux 1989] zeigen, dass bei einer Zerkleinerung von PU-Schaum auf Korngrößen von 10 – 15 mm 37 % der R11 im eingeschlossen bleibt.

2.4 Versuchsergebnisse

2.4.1 Ergebnisse für den Korpus

Tabelle 2-1 zeigt die Versuchsergebnisse für den Korpus (ohne Tür).

Die Versuchsnummern beziehen sich auf die Nummerierung der für den Versuch insgesamt vorbereiteten 20 Geräte. Bei der Auswahl wurde auf die prinzipielle Eignung und eine passende Größenverteilung geachtet. Beispielsweise wurden Geräte aussortiert, die teilweise nicht mit PUR-Schaum gedämmt waren.

Die untersuchten Korpusse wogen durchschnittlich 17 kg. Der leichteste Korpus lag bei 9,5 kg, der schwerste bei 34,3 kg.

PUR-Schaum enthielten die untersuchten Gerätekörper zwischen 1,6 kg und 11,6 kg, im Mittel 4,4 kg.

Die bilanzierte Gesamtmenge an ursprünglich in den Geräten enthaltenem FCKW R11 betrug minimal 136 g, maximal 986 g und im Mittel 371 g.

Die FCKW-Verluste über die Grobdemontage betragen zwischen 12 g und 224 g, im Mittel 81 g.

Durch Restanhaftungen an den Materialien der demontierten Korpusse gingen zwischen 2,4 g und 10 g, im Mittel 6,8 g FCKW verloren.

Die Gesamt-FCKW-Verluste während der Demontage der Korpusse (inkl. Verluste über Restanhaftungen) betragen also 15 g bis 233 g und lagen im Mittel bei 88 g je Gerät. Das entspricht prozentualen Verlusten etwa zwischen 10 % und 33 %. Der Mittelwert lag bei 23,8 %.

Erwartungsgemäß trägt die Grobdemontage mit durchschnittlich etwa 92 % deutlich stärker zum Gesamtergebnis bei, als die Restanhaftungen.

Sehr bemerkenswert ist, dass bei einer Zwischenlagerung der abgeschabten PUR-Schäume nennenswerte FCKW-Ausgasungen stattfinden. Bereits bei einer 24-stündigen Lagerung wurden weitere FCKW-Verluste von 1,3 bis 5,5 % der Ursprungsbeladung festgestellt.

Tabelle 2-1: Versuchsergebnisse für den Korpus

Versuch	Gewicht vor Demontage kg	Verlust während der Grob-demontage g	Masse PUR-Grob-Fraktion nach Grob-Demontage kg	Masse PUR-Schaum von der Feinabschabung der Restanhaftung kg	Summe PUR-Schaum ursprünglich (Schaum nach Grobmontage + Restanhaftung + Verluste nach Grobdemontage) kg	Anteil PUR-Feinabschabung an Gesamt-PUR %	Masse PUR / Gesamtmasse %
1	12,6	41	2,5	0,3	2,8	9,5	22,5
2	11,6	36	3,1	0,1	3,2	3,0	27,7
4	11,5	12	1,7	0,1	1,8	7,7	15,9
19	34,3	224	11,0	0,3	11,6	3,0	33,8
20	27,3	171	5,9	0,4	6,4	6,1	23,6
6	9,5	16	1,4	0,2	1,6	12,3	17,2
7	14,7	64	3,0	0,2	3,3	7,3	22,2
8	15,8	78	4,0	0,3	4,4	6,9	28,0
12	15,6	91	3,5	0,4	4,0	9,6	25,7
Min	9,5	11,7	1,4	0,1	1,6	3,0	15,9
Max	34,3	224,0	11,0	0,4	11,6	6,9	33,8
Mittel	17,0	81,3	4,0	0,3	4,4	7,3	24,1

Versuch	FCKW gesamt vor Demontage g	FCKW-Verlust in Luft bei Grobdemontage %	FCKW in Restanhaftung g	FCKW in Restanhaftung %	FCKW-Verluste bei Grobdemontage + FCKW in Restanhaftung Bezug: Ursprungs-FCKW %	FCKW-Verluste bei Grobdemontage + FCKW in Restanhaftung g	Weitere FCKW-Verluste nach 24-h Lagerung Bezug: Ursprungs-FCKW %	Weitere FCKW-Verluste nach 2-Wochen-Lagerung Bezug: Ursprungs-FCKW %
1	241	17	7	3	19,7	47,6	2,1	
2	272	13	2	1	14,0	38,1	1,5	
4	155	8	4	2	9,8	15,3	1,9	
19	985	23	9	1	23,6	232,9	2,5	0,5
20	547	31	10	2	33,2	181,4	5,5	1,9
6	139	12	5	4	15,4	21,5		
7	279	23	6	2	25,1	69,8	1,8	2,5
8	376	21	8	2	22,7	85,5	1,3	1,2
12	341	27	10	3	29,5	100,5		
Min	155	7,5	2,4	0,9	9,8	15,3	1,3	0,5
Max	985	31,3	10,1	3,7	33,2	232,9	5,5	2,5
gew. Mittel	371	21,9	6,8	1,8	23,8	88,1	3,0	1,5

2.4.2 Ergebnisse für die Türen

Tabelle 2-2 zeigt die Versuchsergebnisse für die Türen.

Die untersuchten Türen wogen durchschnittlich 6,7 kg. Die leichteste Tür lag bei 3,6 kg, die schwerste bei 15,6 kg.

Tabelle 2-2: Versuchsergebnisse für die Türen

Versuch	Gewicht vor Demontage kg	Verlust während der Grob-demontage g	Masse PUR-Grob-Fraktion nach Grob-Demontage kg	Masse PUR-Schaum von der Feinabschabung der Restanhaftung kg	Summe PUR-Schaum, ursprünglich (Schaum nach Grobmontage + Restanhaftung + Verluste nach Grobdemontage) kg	Anteil PUR-Feinabschabung an Gesamt-PUR %	Masse PUR / Gesamtmasse %
1	4,4	1	0,3	0,0	0,3	0,0	6,0
2	4,2	12	0,8	0,1	0,9	12,9	21,0
4	3,6	6	0,3	0,1	0,4	21,9	9,8
19	7,1	8	1,6	0,1	1,7	5,4	24,7
20	10,3	6	1,0	0,2	1,3	17,1	12,2
6	4,3	2	0,2	0,1	0,2	22,4	5,7
7	4,2	6	0,4	0,2	0,6	25,7	14,2
8	6,5	4	0,3	0,1	0,4	29,2	5,9
12	15,6	9	0,7	0,1	0,8	10,0	5,1
Min	3,6	1	0,2	0,0	0,2	0,0	5,1
Max	15,6	12	1,6	0,2	1,7	29,2	24,7
Mittel	6,7	6	0,6	0,1	0,7	16,0	11,6

Versuch	FCKW gesamt vor Demontage g	FCKW-Verlust in Luft bei Grobdemontage %	FCKW in Restanhaftung g	FCKW in Restanhaftung %	FCKW-Verluste in Luft bei Grobdemontage + FCKW in Restanhaftung Bezug: Ursprungs-FCKW %	FCKW-Verluste in Luft bei Grobdemontage + FCKW in Restanhaftung g
1	23	6	0	0	5,8	1,3
2	75	16	5	6	22,3	16,7
4	30	21	3	11	32,4	9,7
19	149	6	4	3	8,3	12,3
20	107	6	9	9	14,5	15,5
6	21	11	2	11	22,4	4,7
7	50	13	6	13	25,4	12,8
8	33	13	5	15	27,9	9,1
12	68	14	3	5	18,7	12,7
Min	21	5,6	2,3	0,0	5,8	1,3
Max	149	21,4	9,1	14,6	27,9	15,5
gew. Mittel	62	10,2	4,2	6,9	17,1	10,5

PUR-Schaum enthielten die untersuchten Türen zwischen 0,2 kg und 1,7 kg, im Mittel 0,7 kg.

Die bilanzierte Gesamtmenge FCKW R11 vor der Demontage betrug minimal 21 g, maximal 149 g und im Mittel 62 g.

Die FCKW-Verluste über die Grobdemontage der Türen betragen zwischen 1 g und 12 g, im Mittel 6 g.

Durch Restanhaftungen an den Materialien der demontierten Türen gingen zwischen 2,3 g und 9 g, im Mittel 4 g FCKW verloren.

Die Gesamt-FCKW-Verluste während der Demontage der Türen betragen inkl. der Verluste über Restanhaftungen zwischen 1,3 g bis 15,5 g, im Mittel bei 10,5 g je Tür. Das entspricht prozentualen Verlusten etwa zwischen 6 % und 28 %. Der Mittelwert lag bei ca. 17 %.

Im Mittel trägt die Grobdemontage bei den Türen mit etwa 60 % zum Gesamtergebnis bei. Damit ist der Anteil der FCKW-Verluste über die Restanhaftungen an den Materialteilen der Türen deutlich höher als bei den Korpussen.

2.4.3 Ergebnisse für das gesamte Gerät

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Versuchsergebnisse für den Korpus mit Tür (Gehäuse).

Die untersuchten Gehäuse wogen durchschnittlich 23,7 kg. Das leichteste Gehäuse lag bei 13,8 kg, das schwerste bei 41,4 kg.

PUR-Schaum enthielten die untersuchten Gehäuse zwischen 1,9 kg und 13,3 kg, im Mittel 5,1 kg.

Die bilanzierte Gesamtmenge FCKW R11, die ursprünglich in den Geräten enthalten war, betrug minimal 160 g, maximal 1.134 g und im Mittel 432 g.

Tabelle 2-3: Versuchsergebnisse für die Gesamtgeräte

Versuch	Gewicht vor Demontage kg	Summe PUR-Schaum ursprünglich (Schaum nach Grobmontage + Restanhaftung + Verluste nach Grobdemontage) kg	FCKW gesamt vor Demontage g	FCKW-Verlust in Luft bei Grob-demontage g	FCKW-Verlust in Luft bei Grob-demontage %	FCKW in Restanhaftung g	FCKW in Restanhaftung %	FCKW-Verluste in Luft bei Grobdemontage + FCKW in Restanhaftung Bezug: Ursprungs-FCKW %	FCKW-Verluste in Luft bei Grobdemontage + FCKW in Restanhaftung g
1	17,0	3,1	264	42	15,9	7	3	18,5	48,9
2	15,8	4,1	348	48	13,7	7	2	15,8	54,8
4	15,1	2,2	185	18	9,8	7	4	13,5	24,9
19	41,4	13,3	1.134	232	20,5	13	1	21,6	245,2
20	37,6	7,7	654	178	27,2	19	3	30,1	196,9
6	13,8	1,9	160	19	11,7	7	5	16,3	26,1
7	18,9	3,9	329	70	21,3	13	4	25,1	82,6
8	22,2	4,8	408	82	20,1	13	3	23,2	94,6
12	31,2	4,8	410	100	24,4	13	3	27,7	113,2
Min	13,8	1,9	160	18	9,8	7,3	1,1	15,8	24,9
Max	41,4	13,3	1.134	232	27,2	19,2	4,7	30,1	245,2
gew. Mittel	23,7	5,1	432	88	18,3	11,0	2,5	22,8	98,6

Die FCKW-Verluste über die Grobdemontage der Gehäuse (Korpuse plus Türen) betragen zwischen 18 g und 232 g, im Mittel 88 g.

Durch Restanhaftungen an den Materialien der demontierten Gehäuse gingen zwischen 7 g und 19 g, im Mittel 11 g FCKW verloren.

Die Gesamt-FCKW-Verluste während der Demontage der Gehäuse betragen 25 g bis 245 g und lagen im Mittel bei 98,6 g je Gehäuse. Das entspricht prozentualen Verlusten etwa zwischen 16 % und 30 %. Der Mittelwert lag bei ca. 23 %.

Im Mittel trägt die Grobdemontage mit etwa 89 % zum Gesamtergebnis bei.

2.4.4 Fehlerbetrachtung

Zur Auswertung der Ergebnisse wurden folgende Fehlerquellen und ihre Auswirkungen auf das Ergebnis betrachtet:

1. Es ist denkbar, dass der PUR-Schaum während des Versuchs Feuchtigkeit aus der Luft aufgenommen hat. Wenn dies der Fall gewesen wäre, wären die ermittelten FCKW-Verluste zu gering angesetzt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass dieser mögliche Effekt gering ist, da die Messungen nach der Lagerung gezeigt haben, dass das Gewicht weiter abgenommen hat. Bei einer relevanten Wasseraufnahme wären bei einigen Chargen vermutlich Gewichtszunahmen aufgetreten.
2. Es ist ebenso denkbar, dass der PUR-Schaum während des Versuchs Feuchtigkeit abgegeben hat. Wenn dies der Fall gewesen wäre, wären die ermittelten FCKW-Verluste zu hoch angesetzt. Bei der Demontage wurde nur

bei einem Gerät Feuchtigkeit festgestellt (Korpus Nr. 8). Die errechneten FCKW-Verluste von diesem Gerät während der Demontage lagen jedoch sehr dicht am Mittelwert aller Versuche, und der weitere Massenverlust bei der Lagerung lag sogar unter dem Mittelwert. Damit ist davon auszugehen, dass die Feuchtigkeitsabgabe so langsam erfolgt, dass sie einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die Versuchsergebnisse hat.

3. Der ursprüngliche FCKW-Gehalt, der mit 8,5 % angesetzt wurde, ist nicht bei allen FCKW-Schäumen konstant sondern kann in einem nicht exakt bestimmbar Bereich schwanken. Er wäre nur mit sehr hohem Aufwand zu bestimmen, da beim Entnehmen eines Probestücks für die Laboranalyse bereits FCKW in unbekannter Menge entweicht. Eine Sensitivitätsanalyse mit 7 % hat gezeigt, dass das Ergebnis für die FCKW-Verluste während der Demontage incl. des FCKWs in der Restanhaftung sich nur wenig ändert, wenn der Parameter von 8,5 % auf 7 % herabgesetzt wird. (97 g statt 99 g).
4. Der FCKW-Gehalt in der Restanhaftung wurde auf 50 % abgeschätzt. Der Ansatz hierzu wird oben erläutert. Da der Anteil des an den verbleibenden Metallteilen anhaftenden PUR-Schaums am gesamten PUR-Schaum klein ist (im Mittel rund 7 %) wirkt sich dieser Parameter wenig auf das Gesamtergebnis aus. Eine Sensitivitätsanalyse hat dies bestätigt. Das Ergebnis für die FCKW-Verluste während der Demontage incl. des FCKWs in der Restanhaftung ändert sich nur wenig, wenn der Parameter von 50 % auf 40 % herabgesetzt wird. (98 g statt 99 g).
5. Die Linearität der Waage beträgt +/- 5 g. Ihre Ungenauigkeiten wirken sich vor allem auf die errechnet FCKW-Freisetzung in die Luft während der Demontage sowie in weit geringerem Umfang auf die FCKW-Verluste in der Restanhaftung aus.
6. Weitere Datenunsicherheit können durch den Verlust von staubförmigem Abrieb entstehen sowie durch den Eintrag von Staub aus der umgebenden Halle. Bei den Korpusen wurde zwischen 5 und 77 g Bodenmaterial nach der Grobdemontage aufgekehrt, im Mittel 28 g. Das nochmalige Kehren des Bodens nach Beendigung aller Versuche am 14.9. (erster Tag) ergab eine Aufnahme von weiteren 12 g.

Fazit zur Fehlerbetrachtung und Fehlerrechnung:

Die oben diskutierten ersten vier möglichen Fehlerquellen haben nur einen geringen Einfluss auf die Versuchsergebnisse im Vergleich zu den letzten beiden Datenunsicherheiten: die Linearität der Waage und die Datenunsicherheit durch Bodenstaubaustrag oder -eintrag bewirken eine Datenunsicherheit bei der Bestimmung der FCKW-Verlust in die Luft während der Montage. Eine obere maximale Abschätzung für die dadurch entstehende Datenunsicherheit ist +/- 20%. Für das Gesamtergebnis „FCKW-Verlust durch die Demontage und den FCKW-Verbleib in der Restanhaftung“ beträgt die maximale Datenunsicherheit dann +/- 18 %. Der ermittelte Mittelwert der Versuche (Korpus und Türen) kann demnach angegeben als FCKW-

Verluste von 21,3 % +/- 3,8 % zuzüglich der Lagerverluste in der Größenordnung von 4 % bei zweiwöchiger Lagerung.

2.4.5 Zusammenhang zwischen Größe und FCKW-Verlust

Die nachfolgende Abbildung zeigt die ermittelten FCKW-Verluste für das gesamte Gerät incl. Tür in Korrelation zum Gerätegewicht vor der Demontage.

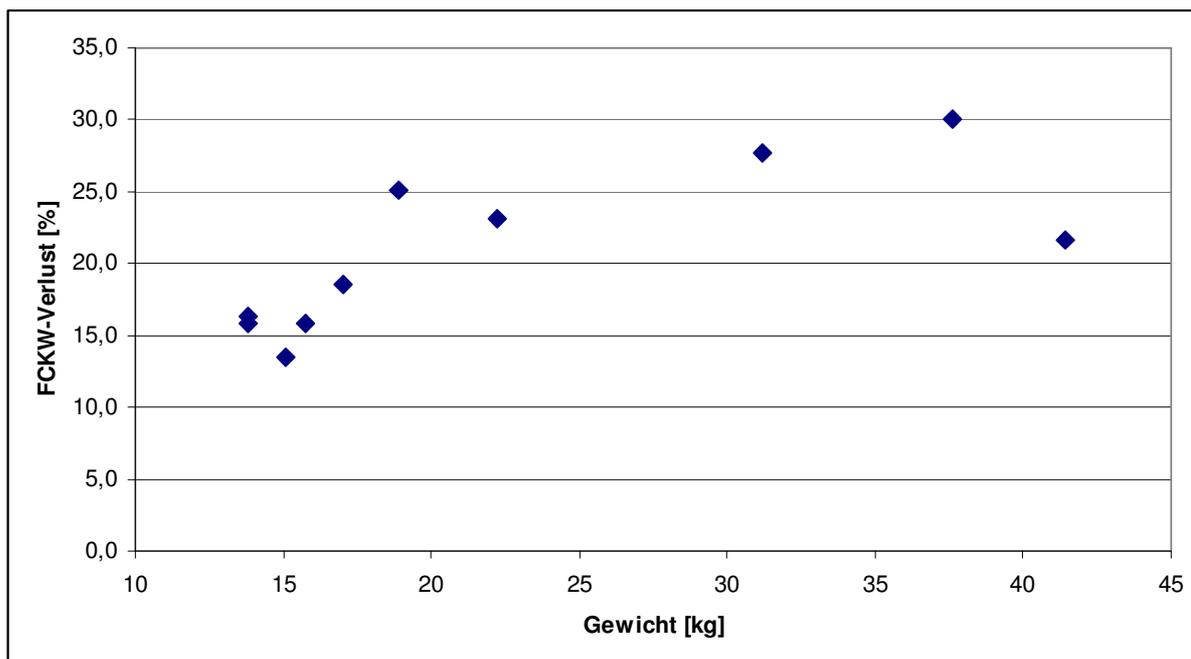


Abbildung 2.1 Korrelation zwischen Gerätegröße und FCKW-Verlust

Die Abbildung zeigt, dass der Trend der Versuche dahin geht, dass größere Geräte deutlich höhere FCKW-Verluste aufweisen. Während die Geräte in der Gewichtsklasse von rund 15 kg FCKW-Verluste im Bereich von 15 % aufweisen weisen die drei großen Geräte mit einem Gewicht über 30 kg deutlich höhere Verluste (bis zu 30%) auf.

Ob dies ein allgemeingültiger Trend ist, lässt sich aus der geringen Anzahl von Geräten pro Größenklasse nicht ableiten. Zu vermuten wäre eher eine Korrelation zwischen dem FCKW-Verlust und der durchschnittlichen PUR-Schaumgröße nach der Demontage. Bei den durchgeführten Versuchen lagen die erzeugten PUR-Schaumfraktionen aber alle in der gleichen Größenbandbreite.

2.4.6 Diskussion der Ergebnisse

Die Versuchsergebnisse weisen eine gewisse Streuung auf, was angesichts der Bandbreite an Gerätegrößen nicht überrascht. Die Fehlerbetrachtung hat gezeigt, dass die durchschnittliche Datenunsicherheit bei konservativer Abschätzung bei +/- 18 % liegt. Diese Datenunsicherheit liegt innerhalb der Streubreite der Ergebnisse und ist für

die Grundaussage der Studie – die Abschätzung der potentiellen FCKW-Verluste bei Handdemontage – akzeptabel.

Zusammenfassend hat die Auswertung von 9 Versuchen mit Geräten verschiedener Größen gezeigt, dass durch die Demontage und der FCKW-Verbleib in der Restanhaftung zwischen 25 und 245 Gramm FCKW pro Gerät verloren gehen (durchschnittlich ca. 99 Gramm pro Gerät). Aussagekräftiger als die absoluten Werte sind die prozentualen Werte, da die untersuchten Geräte unterschiedlich groß waren. Prozentual zu dem ursprünglichen Gesamt-FCKW-Gehalt der unbehandelten **Geräte (Korpus und Tür)** gingen zwischen 16 % und 30 % der Gesamt-FCKW-Massen verloren (**Mittelwert: 23 %** der ursprünglich enthaltenen FCKW-Masse).

Für die **Korpuse (ohne Tür)** waren die ermittelten FCKW-Verluste folgende:

absolute Werte: 15 – 233 g; Mittelwert 88 g.

prozentuale Werte: 5 – 33 % ; **Mittelwert 24 %**.

Für die **Türen** waren die ermittelten FCKW-Verluste folgende:

absolute Werte: 1 – 17 g; Mittelwert 11 g.

prozentuale Werte: 6 – 28 %; **Mittelwert 17 %**.

Für die kompletten Gehäuse waren demzufolge die ermittelten FCKW-Verluste folgende:

absolute Werte: 25 – 245 g; Mittelwert 99 g.

prozentuale Werte: 16 – 30 %; Mittelwert 23 %.

FCKW-Emissionen entstehen möglicherweise in den bestehenden Anlagen zusätzlich indem PUR-Schaumhaltige Türen nicht demontiert werden, sondern anderen Verwertungswegen zugeordnet werden. Aus den bekannten Praxis-Beispielen (z.B. USA) ist berichtet, dass die Demontage der Türen sehr viel aufwändiger und damit kostenintensiver ist und daher die unbehandelten PUR/FCKW-haltigen Türen direkt dem Schrotthandel zugeführt werden. Bei den untersuchten Geräten war rund 14 % des PUR-Schaums bzw. des FCKW in den Türen enthalten. Der erhöhte Aufwand zur Demontage der Türen hat sich bei den Versuchen im Rahmen dieser Studie absolut bestätigt. Im Worst-Case-Scenario müsste daher also mit bis zu 47 % FCKW-Verlusten gerechnet werden, wenn Türen nicht ordnungsgemäß demontiert werden, sondern ohne weitere Demontage zur Metallverwertung (Autoshredder) gelangen würden.

Weiterhin wurden für einige Geräte abgeschätzt, wie viel FCKW bei der nachfolgenden Lagerung der PUR-Output-Fraktion in offenen Säcken entweicht. Die Säcke wurden nach 24 Stunden (für 7 Geräte) und nach 14 Tagen (für vier Geräte) verwogen. Es wurde davon ausgegangen, dass die Massendifferenz vollständig auf der FCKW-

Entgasung beruht. Nach einer 24-stündigen Lagerung wurde ein durchschnittlicher FCKW-Verlust von 3 % ermittelt. Nach einer 14-tägigen Lagerung entgasten im Schnitt weitere 1,5 % (jeweils bezogen auf den ursprünglichen FCKW-Gehalt).

3 Bewertung der Versuchsergebnisse

Um die Ergebnisse der Untersuchungen in Relation zu den in [Öko-Institut 2007] berechneten FCKW-Emissionen zu setzen, muss berücksichtigt werden, dass bei der vergleichenden Ökobilanz Großgeräte nicht in dem Umfang des Versuchs berücksichtigt wurden. Um den Vergleich auf der Datenbasis vergleichbarer Geräte, bezogen auf die Gesamtmengen an PUR-Schaum und FCKW durchzuführen, bzw. eine eher konservative Basis zu ermöglichen, werden hierfür nur die Daten der 6 kleineren Geräte des Versuchs ausgewertet.

Tabelle 3-1: Versuchsergebnisse für die Gesamtgeräte, ohne die drei größten Geräte

Versuch	Gewicht vor Demontage kg	Summe PUR-Schaum ursprünglich (Schaum nach Grobmontage + Restanhaftung + Verluste nach Grobdemontage) kg	FCKW gesamt vor Demontage g	FCKW-Verluste in Luft bei Grobdemontage + FCKW in Restanhaftung Bezug: Ursprungs-FCKW %	FCKW-Verluste in Luft bei Grobdemontage + FCKW in Restanhaftung Bezug: Ursprungs-FCKW g
1	17,0	3,1	264	18,5	49
2	15,8	4,1	348	15,8	55
4	15,1	2,2	185	13,5	25
6	13,8	1,9	160	16,3	26
7	18,9	3,9	329	25,1	83
8	22,2	4,8	408	23,2	95
Min	13,8	1,9	160	15,8	25
Max	22,2	4,8	408	25,1	95
Mittel	17,1	3,3	282	19,6	55

Desweiteren ist zu beachten, dass die in der Ökobilanz 2007 ermittelten Werte für FCKW-Emissionen in Aufbereitungsanlagen für Kühlgeräte nach dem Stand der Technik für einen Mix aus 80 % FCKW-Geräten und 20 % VOC-Geräten entsprachen. Der dort ermittelte Wert von 0,45 g FCKW-Emissionen (angegeben als R11 Äquivalente) je durchschnittlichem Gerät muss deshalb auf 0,54 g je Gerät korrigiert werden.

Außerdem ist zu berücksichtigen, dass bei der Ökobilanz die Emissionen des gesamten Entsorgungsweges bilanziert wurden und dass der Hauptanteil der Emissionen mit über 50 % aus der Entsorgungsphase der entgasten PUR-Schäume stammt. Diese Phase der Entsorgung wurde bei den Versuchen dieser Studie nicht mit betrachtet. Die Emissionen aus der Stufe 1 die ebenfalls in die Ökobilanz eingingen, aber bei den Versuchen nicht erfasst wurden, können mit einem Anteil von < 3 % dagegen vernachlässigt werden.

Als weitere wichtige Rahmengrößen für eine vergleichende Bewertung sind die bilanzierten Mengen an PUR-Schaum und R11 je bilanziertem bzw. untersuchtem Gerät von Bedeutung. In der Ökobilanz 2007 wurden den Berechnungen 4,0 kg PUR-Schaum und 340 g R11 je Gerät zugrunde gelegt.

Die Versuche der 6 kleineren Geräte ergaben als Mittelwerte 3,3 kg PUR-Schaum und 282 g R11 je Gerät (vgl. Tabelle 3-1).

Die Ergebnisse des Versuchs ohne Berücksichtigung der Großgeräte lagen im Durchschnitt bei 55 g FCKW-Emissionen je Gerät, also etwa dem 100fachen der Emissionen, die bei Anlagen nach dem Stand der Technik zu erwarten wären. Für den Minimalwert des Versuchs von 25 g je Gerät ergibt sich ein Faktor von 46, bei dem Maximalwert von 99 g je Gerät ein Faktor von 175.

Berücksichtigt man noch die Ausgasung innerhalb einer Lagerzeit der Schäume von 24 Stunden bis zur Entsorgung steigt der bei den Zerlegeversuchen der 6 kleineren Geräte für die Demontagephase inkl. der Bereitstellung ermittelte Wert für die durchschnittlichen FCKW-Emissionen auf 62 g je Gerät an und liegt damit beim 115fachen der Emissionen einer Anlage nach dem Stand der Technik für den gesamten Entsorgungsweg.

Im Übrigen wurden nach einschlägiger Experten-Meinung PUR-Schäume in der Kühlgeräteproduktion nicht nur europa- sondern auch weltweit mit einer einheitlichen Rezeptur hergestellt. Obgleich minimale Änderungen im Alterungsprozess der Schäume nicht auszuschließen sind, ist davon auszugehen dass auch die Altkühlgeräte auf dem Entsorgungsmarkt zumindest in Europa, wahrscheinlich aber auch weltweit (gleichlautende Auffassung der Experten) einen annähernd gleichen Gehalt an FCKW (85 g/kg PUR-Schaum) enthalten. Die in der vorliegenden Studie gefundenen Ergebnisse sind daher nach Auffassung der Autoren in hohem Maße übertragbar auf europäische Länder und Länder außerhalb Europas.

4 Ozonschichtzerstörungs- und Klimaschädigungspotenzial

4.1 Ozonschichtzerstörungspotenzial

Das Ozonschichtzerstörungspotenzial bzw. ODP (ozone depletion potential) beschreibt die Ozonreduktion in der Stratosphäre, die sich in rund 15 bis 40 km Höhe über der Erde befindet. Sie wird durch langlebige chlor-, brom- und fluorhaltige Kohlenwasserwasserstoffe geschädigt. Hierzu zählen insbesondere die FCKW. Ein verstärkter Ozonabbau geht mit einer Zunahme der UV-B-Strahlung an der Erdoberfläche einher, da die Ozonschicht einen großen Teil der UV-B-Strahlung herausfiltert. Eine Zunahme der UV-B-Strahlung an der Erdoberfläche kann beim Menschen zu einem verstärkten Auftreten von Haut- und Augenerkrankungen und einer Beeinträchtigung des Immunsystems führen. Selbst bei geringer Erhöhung des mittleren UV-B-Strahlenflusses ist mit einer Schädigung von Ökosystemen und einer nachteiligen Beeinflussung der Nahrungskette zu rechnen [UBA 2006]. Die Aggregation erfolgt nach R11-Äquivalenzeinheiten.

Da bei den Bilanzen der Versuchsergebnisse in Kapitel 2.4 ausschließlich die Verluste an R11 berechnet wurden und R11 mit dem Faktor 1 eingeht, stellen die dort genannten Ergebnisse gleichzeitig die Werte für ODP dar!

4.2 Klimaschädigungspotenzial

Die Berechnung des Klimaschädigungspotenzials in Form von CO₂-Äquivalenten wird allgemein anerkannt. Mit dem Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) besteht zudem ein internationales Fachgremium, das sowohl die Methode als auch die entsprechenden Kennzahlen für jede klimawirksame Substanz errechnet und fortschreibt. Bei der Berechnung von CO₂-Äquivalenten wird die Verweilzeit der Gase in der Troposphäre berücksichtigt; daher stellt sich die Frage, welcher Zeitraum der Klimamodellrechnung für die Zwecke der Ökobilanz verwendet werden soll. Das Umweltbundesamt empfiehlt die Modellierung auf der 100-Jahre-Basis, da sie am ehesten die langfristigen Auswirkungen des Treibhauseffektes widerspiegelt. R11 hat einen Wirkfaktor von 4.680. Das bedeutet, 1 kg R11 weist die gleiche Klimaschädlichkeit auf wie 4.680 kg CO₂ [IPCC 2005].

Aus den ermittelten R11 Emissionen bei der händischen Demontage eines Kühlgerätes von 25 g bis 245 g ergeben sich je Gerät Klimaschädigungspotenziale zwischen ca. 120 kg bis 1.150 kg CO₂-Äquivalenten. Im Mittelwert wurden je Gerät 99 g R11 freigesetzt, was einem mittleren Klimaschädigungspotenzial von 460 kg CO₂-Äquivalenten entspricht.

Ein Vergleich dieser Menge mit dem Pkw-Verkehr in Deutschland zeigt, dass ausgehend von durchschnittlichen Emissionen für Pkw von derzeit etwa 180 g CO₂/km die mittleren Emissionen aus der händischen Zerlegung eines Kühlgeräts den Emissionen einer Fahrstrecke mit einem durchschnittlichen Pkw über 2.600 km entsprechen.

Bei einer durchschnittlichen Fahrleistung von ca. 13.000 km/a (www.kba.de) kann ein durchschnittlicher Pkw über mehr als 10 Wochen bei mittlerer km-Leistung gefahren werden, bis das gleiche Klimaschädigungspotenzial emittiert wird, wie bei die Zerlegung eines mittleren Kühlgeräts.

5 Schlussfolgerungen für die Praxis des Kühlgeräte-Recyclings

Die aus den Versuchen resultierenden FCKW-Emissionen und die sich daraus ergebenden Schädigungspotentiale für Ozonschicht und Klima führen zu dem Schluss, dass eine manuelle Demontage der PUR-Schäume aus FCKW-haltigen Kühlgeräten nicht empfohlen werden kann.

Die im Rahmen der Versuchsdurchführungen in Limburg gegebenen Bedingungen müssen als optimal bezeichnet werden. Die mit der Demontage beauftragten Arbeiter der GAB zeigten höchste Motivation, führten die Aufgabe sehr gewissenhaft durch und hatten insbesondere keine zeitlichen Vorgaben für die Arbeiten. Es ist zu bezweifeln, ob die Arbeitsbedingungen in der täglichen Praxis gleiche Resultate liefern wie die Limburger Versuche. Es ist vielmehr damit zu rechnen, dass aufgrund geringerer Motivation sowie starkem Zeit- und Leistungsdruck der Arbeiter höhere FCKW – Emissionen entstehen. Genauso wenig ist davon auszugehen, dass Vorgaben hinsichtlich der zu demontierenden Teilchengröße der Schäume in der täglichen Praxis eingehalten werden können. Insbesondere bei der sehr aufwändigen Demontage der Türen werden sich solche Vorgaben als undurchführbar erweisen.

Die in der vorliegenden Studie gefundenen Ergebnisse sind nach Auffassung der Autoren in hohem Maße übertragbar auf europäische Länder und Länder außerhalb Europas, weil es als gesichert gilt, dass Altkühlgeräte weltweit einen annähernd gleichen Wert für den Restgehalt an FCKW in den gealterten Schäumen aufweisen.

An der Zerkleinerung der Geräte-Korpuse in gekapselten Shreddern führt daher aus Sicht der Autoren kein Weg vorbei.

6 Literatur

- Electrolux 1989 Holmberg, B.: Förklaring till CFC-Analys på kylskapsisolering, Electrolux Industrial Systems, 1989
- Freep 2009 www.freep.com
- IPCC 2005 Intergovernmental Panel on Climatic Change (IPCC): Special Report on Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System; Issues related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons; Chapter 2: Chemical and Radiative Effects of Halocarbons and Their Replacement Compounds, 23 th Session at Addis Ababa, April 2005
- iuta 2005 Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V., Duisburg: Analysenbericht zu drei Proben von PUR-Schaum nach der Vorzerkleinerung mit einer Rotorschere. 2005
- KBA 2009 Kraftfahrt-Bundesamt: www.kba.de
- Öko-Institut 2007 Dehoust, G.; Schüler, D.: Ökobilanzielle Untersuchung zur Verwertung von FCKW- und KW-haltigen Kühlgeräten, Darmstadt 2007
- UBA 1998a Umweltbundesamt, FG III 3.2: Leitfaden zur Entsorgung von Kältegeräten, Stand Januar 1998
- UBA 2006d Umweltbundesamt: Schutz der Ozonschicht - FCKW und Halone; Stand ; download unter <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/fckw/halone.htm>, Stand 18.7.2006

7 Anhang 1: Bilddokumentation zur händischen Zerlegung von Kühlgeräten in der Praxis in den USA

In den folgenden Bildern wird die händische Zerlegung von Kühlgeräten in den USA dokumentiert (www.freep.com).



8 Anhang 2: Bilddokumentation zum Limburger Versuch vom 14. – 16. September 2009





