

Fluorierte Treibhausgase vermeiden

Wege zum Ausstieg

Fluorierte Treibhausgase vermeiden Wege zum Ausstieg

von

**Katja Becken
Dr. Daniel de Graaf
Dr. Cornelia Elsner
Gabriele Hoffmann
Dr. Franziska Krüger
Kerstin Martens
Dr. Wolfgang Plehn
Dr. Rolf Sartorius**

Umweltbundesamt

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
<http://www.uba.de/uba-info-medien/3962.html>
verfügbar. Hier finden Sie auch eine englische Fassung.

Überarbeitete Fassung des Berichts „Fluorierte Treibhausgase
in Produkten und Verfahren – Technische Maßnahmen zum
Klimaschutz“, Umweltbundesamt, Berlin 2004

ISSN 1862-4359

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>
<http://fuer-mensch-und-umwelt.de/>

Redaktion: Fachgebiet III 1.4 Stoffbezogene Produktfragen
Katja Becken, Dr. Wolfgang Plehn

Dessau-Roßlau, November 2010

Erratum

zum Bericht des Umweltbundesamtes „Fluorierte Treibhausgase vermeiden – Wege zum Ausstieg“ vom November 2010

Fundstelle	Alt	Neu (korrigiert)
Kap. 1.1, S.10	ChemOzonschichtV 2005	ChemOzonschichtV <u>2006</u>
Kap. 1.2, S.12	Weitere Anwendungen ...	Weitere Anwendungen/ <u>Emissionsquellen</u> ...
Kap. 1.2, S.14	Lediglich bei den FKW kommt es zu einer ungewollten Entstehung bei der Herstellung von Primäraluminium ...	Lediglich bei den <u>HF</u> FKW und bei <u>den</u> FKW kommt es zu einer ungewollten Entstehung bei der <u>HFCKW-22</u> Produktion und bei der Herstellung von Primäraluminium ...
Kap. 2, S.32	So ist z. B. der Verkauf von Neuware...	So ist z. B. das <u>Inverkehrbringen</u> von Neuware...
Kap 3.3.4, S. 84	Frachtvolumen bewegt	Fracht <u>transportleistung</u> <u>erbracht</u>
Kap 3.3.4, S. 84	Frachtvolumen	Fracht <u>transportleistung</u>
Kap 3.3.4, S.84	(ATP –Prüfung)	(ATP- <u>Abkommen</u>)
Kap. 3.3.4, S.90	In Kühlcontainern ist der Einsatz von Kohlenwasserstoffen oder Ammoniak wegen ihrer Brennbarkeit <u>nach den internationalen Regeln für die Schifffahrt (IMO-Regularien)</u> nicht zulässig.	In Kühlcontainern ist der Einsatz von Kohlenwasserstoffen oder Ammoniak wegen Ihrer Brennbarkeit <u>bzw. Giftigkeit bisher nicht in Betracht gekommen.</u>
Kap. 3.3.5.2, S. 101	Sie können gegenüber Kompressionskälteanlagen energetisch günstig betrieben werden, wenn der jährliche Deckungsanteil und die Kälteleistungszahl ausreichend groß sind [Schölkopf 2008.]	Sie können gegenüber Kompressionskälteanlagen energetisch günstig betrieben werden, wenn der jährliche <u>solare</u> Deckungsanteil und die Kälteleistungszahl ausreichend groß sind [Schölkopf 2008].
Kap 3.3.7, S. 112	120 t/a	133 t/a
Kap 3.3.7, S. 112	0,15 Mio	0,17 Mio
Kap 3.3.7, S. 113	Verdichter, Verflüssiger oder Kompressor	Verdichter (bzw. Kompressor), Verflüssiger (bzw. Kondensator)
Kap. 8.1, S. 219	In Abbildung 8.1 ist die Emissionsentwicklung im Zeitraum von 1995 bis 2002 dargestellt.	In Abbildung 8.1 ist die Emissionsentwicklung im Zeitraum von 1995 bis <u>2008</u> dargestellt.
Kap. 11, S. 260	Gegenüber Scheiben mit Luft- oder Edelgas-Füllung <u>reduziert</u> SF ₆ die Schalldämmung ...	Gegenüber Scheiben mit Luft- oder Edelgas-Füllung <u>verbessert</u> SF ₆ die Schalldämmung ...

Vorwort

Fluorierte Treibhausgase (F-Gase) sind 100- bis 24.000-mal schädlicher für das Klima als CO₂. Und: Der Anteil fluorierter Treibhausgase an den Gesamtemissionen klimaschädlicher Gase wird sich weltweit von heute annähernd 2 % auf ungefähr 6 % im Jahr 2050 verdreifachen. Dies zeigen im Auftrag des Umweltbundesamtes erstellte globale Projektionen in einem Szenario ohne neue Maßnahmen. Der Handlungsbedarf ist offensichtlich. F-Gase werden überwiegend in ähnlicher Weise verwendet wie früher FCKW und Halone, die für die Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht verantwortlich sind. Deshalb verhandelt die internationale Staatengemeinschaft seit gut einem Jahr über die Aufnahme einiger fluorierter Treibhausgase in das Montrealer Protokoll – dem internationalen Umweltabkommen zum Schutz der Ozonschicht. Es gibt daher einen großen Bedarf an einer aktuellen wissenschaftlichen Aufbereitung der klimaschonenden und innovativen Alternativen für F-Gase. Hier setzt der vorliegende Bericht an.

80 % der F-Gas-Emissionen des Jahres 2050 werden aus stationären und mobilen Kälte- und Klimaanlageanwendungen stammen. Es handelt sich um Emissionen, die vermeidbar sind, wenn zukünftig klimafreundliche, natürliche Kältemittel eingesetzt werden: In Haushalts- und seit wenigen Jahren auch in Laborkühlgeräten setzen Hersteller erfolgreich Kohlenwasserstoffe ein. In Supermärkten und Discountern zeigen immer mehr Beispiele aus der Praxis, dass halogenfreie Kältemittel wie CO₂ oder Kohlenwasserstoffe nicht nur die erforderliche Kälte erzeugen können, sondern auch durch gute Energieeffizienz und Nutzung der Abwärme ganz wesentlich zur Energieeinsparung beitragen können. Auch in der mobilen Klimatisierung gibt es entsprechende innovative Entwicklungen. Wissenschaftler und Entwicklungsingenieure sehen für moderne Fahrzeuge mit kraftstoffsparender Technik und für Elektrofahrzeuge in CO₂ ein geeignetes Kältemittel für Klimaanlageanlagen, da es nicht brennbar ist und die Klimaanlage auch als Wärmepumpe umgeschaltet werden kann. Die Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) testen seit 2010 als erstes Verkehrsunternehmen Linienbusse mit diesem Kältemittel. Das UBA selbst betreibt seit dem Jahr 2009 ein Dienstfahrzeug mit einer CO₂-Klimaanlage und hat damit sehr gute Erfahrungen gemacht. Diese und weitere „Wege zum Ausstieg“ stellt dieser neue Bericht dar. Die Industrie hat viele klimaschonende Lösungen entwickelt; jetzt sind die Anwender wie der Handel, die Personenverkehrsunternehmen und die Automobilindustrie gefordert, diese innovativen Techniken einzusetzen. Der Bericht ist unser Beitrag zur Maßnahmendiskussion auf europäischer und internationaler Ebene.

Jochen Flasbarth

Präsident des Umweltbundesamtes

Dessau-Roßlau, November 2010

Inhalt

Einleitung	1
Ziel und Aufbau des Berichts	5
Teil A Allgemeiner Teil	7
1 Eigenschaften und ökologische Auswirkungen fluorierter Gase	7
1.1 Struktur, Nomenklatur und chemisch-physikalische Eigenschaften	7
1.2 Globale Produktion, Anwendung und Emissionsprognose	10
1.3 Ökologische Auswirkungen (Schwerpunkt Klima)	15
1.3.1 Abbau in der Atmosphäre/Senken und Persistenz	16
1.3.2 Abbau von stratosphärischem Ozon	17
1.3.3 Beitrag zur photochemischen Oxidantienbildung	17
1.3.4 Beitrag zum globalen Klimawandel	17
1.4 Überblick über mögliche Ersatzstoffe	21
1.4.1 Kohlendioxid (CO ₂)	23
1.4.2 Kohlenwasserstoffe	24
1.4.3 Ammoniak (NH ₃)	24
1.4.4 Dimethylether (DME)	25
1.4.5 Stickstoff (N ₂)	25
1.4.6 Hydrofluoralkene	26
1.4.7 Zusammenfassung	26
In Einleitung, Ziel und Aufbau und Kapitel 1 verwendete Literatur	27
2 Emissionsentwicklung in Deutschland	33
In Kapitel 2 verwendete Literatur	39
Teil B Anwendungsbereiche und –verfahren: Verwendung, Emissionen und Alternativen	41
3 HFKW- und FKW als Kältemittel in Kälte- und Klimaanlage	41
3.1 Überblick über mögliche Arten der Kälteerzeugung	41

3.1.1	Kälteerzeugungssystemen mit mechanischem Antrieb	41
3.1.2	Kältemaschinen mit thermischem Antrieb	44
3.2	Verwendung und Emissionen	46
3.3	Anwendungsbereiche und Minderungsmöglichkeiten	49
3.3.1	Haushaltskühl- und Gefriergeräte	52
3.3.2	Gewerbekälteanlagen	56
3.3.3	Industrielle Kälteerzeugung (Industrieanlagen, Kühlhäuser, Lebensmittelverarbeitung etc.)	71
3.3.4	Transportkälte	85
3.3.5	Klimatisierung von Räumen und Gebäuden	92
3.3.6	Wärmepumpen (Hauswärmepumpen)	104
3.3.7	Fahrzeugklimatisierung	111
3.3.8	Sonstige Anwendungen / Einsatz von FKW	131
	In Kapitel 3 verwendete Literatur	132
4	HFKW als Treibmittel zur Herstellung von Schaumstoffen	159
4.1	Hartschäume zur Wärmedämmung	161
4.1.1	XPS-Hartschaum	162
4.1.2	PUR-Hartschaum	167
4.2	PUR-Weichschäume	176
4.3	PUR-Integralschäume	177
4.4	Montageschaum	179
	In Kapitel 4 verwendete Literatur	182
5	HFKW als Treibgas in technischen und anderen Aerosolen	189
5.1	Technische Sprays	191
5.1.1	Kälte- und Druckluftsprays zur Wartung elektrischer und elektronischer Geräte	191
5.1.2	Sonstige technische Sprays	192
5.2	Medizinische Sprays	192

5.3	Sonstige Sprays	194
5.3.1	Haushalts- und Kosmetiksprays	195
5.3.2	Dekorationssprays und Partyartikel	196
5.3.3	Schallgeräte (Signalhörner)	197
5.3.4	Pfeffersprays	199
5.3.5	Insektizide, Pflanzenschutzmittel etc.	199
	In Kapitel 5 verwendete Literatur	200
6	HFKW als Feuerlöschmittel	205
	In Kapitel 6 verwendete Literatur	213
7	HFKW als Lösemittel	215
	In Kapitel 7 verwendete Literatur	218
8	HFKW, FKW und SF₆ als Ätze	221
8.1	Halbleiterindustrie	222
8.2	Dünnschichtsolarzellen- und Flachbildschirmproduktion	227
8.3	Leiterplattenherstellung	229
	In Kapitel 8 verwendete Literatur	231
9	SF₆ als Lös	235
9.1	Schaltanlagen im Spannungsbereich 52-380 kV	238
9.2	Schaltanlagen im Spannungsbereich > 1-52 kV	241
	In Kapitel 9 verwendete Literatur	244
10	SF₆ Anwendungen in der Nichteisen(NE)-Metallindustrie	249
10.1	SF ₆ zur Verwendung als Schutzgas (Magnesiumverarbeitung)	247
10.2	SF ₆ als Reinigungsgas für den Sekundäraluminiumguss	254
	In Kapitel 10 verwendete Literatur	255
11	SF₆ als Füllgas in Isolierverglasungen von Schallschutzfenstern	261
	In Kapitel 11 verwendete Literatur	264
12	SF₆ als Lecksuch- und Tracergas	267

	In Kapitel 12 verwendete Literatur	269
13	SF₆ als Füllgas in Autoreifen	271
	In Kapitel 13 verwendete Literatur	272
14	SF₆ als Dämpfungsgas in Schuhen	273
	In Kapitel 14 verwendete Literatur	273
15	Übersicht über Substitutions- und weitere Emissionsminderungsmöglichkeiten in den einzelnen Anwendungsbereichen	275
16	Abkürzungsverzeichnis	281
17	Glossar	287

Einleitung

Klimaschutz hat seit der Rio-Konferenz im Jahr 1992 und der dort unterzeichneten Klimarahmenkonvention (KRK) zunehmende Bedeutung. In Artikel 2 der Klimarahmenkonvention hat sich die Staatengemeinschaft das Ziel gesetzt, „die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird. Ein solches Niveau soll innerhalb eines Zeitraums erreicht werden, der ausreicht, damit sich die Ökosysteme auf natürliche Weise den Klimaänderungen anpassen können, die Nahrungsmittelerzeugung nicht bedroht wird und die wirtschaftliche Entwicklung auf nachhaltige Weise fortgeführt werden kann...“ [KRK 1992]. Um dieses Ziel zu erreichen, war die weitere Ausgestaltung erforderlich. Hierzu fanden und finden regelmäßige Vertragsstaatenkonferenzen (VSK) statt. Als wichtigstes Ergebnis dieser Konferenzen ist das im Dezember 1997 verabschiedete Kyoto-Protokoll [Kyoto-Protokoll 1997] anzusehen. Darin haben die Industrieländer erstmals eine verbindliche Reduzierung ihrer Treibhausgasemissionen zugesagt. Während sich die Industriestaaten zu einer durchschnittlichen Reduktion um 5,2 % verpflichtet haben, übernahm die Europäische Union das nach erfolgter Ratifizierung des Protokolls völkerrechtlich verbindliche Ziel, die Treibhausgasemissionen bis zum Zeitraum 2008 - 2012 um insgesamt 8 % gegenüber 1990 zu reduzieren. Im Rahmen der Lastenteilung der Europäischen Union hat sich die Bundesrepublik Deutschland verpflichtet, die Emissionen um 21 % zu reduzieren. Im Jahr 2012 endet die erste Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls. Vor diesem Hintergrund verhandeln die Vertragsstaaten aktuell über ein neues internationales Klimaschutzabkommen für die Zeit nach 2012. Auf der UN-Klimakonferenz in Kopenhagen im Dezember 2009 sollten mindestens die Eckpunkte dieses Folgeabkommens vereinbart werden, was jedoch nicht gelang. Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen bis 2020 um 40 Prozent gegenüber 1990 zu reduzieren. Dieses Ziel besteht unabhängig von einem Folgeabkommen.

Einleitung

Neben den klassischen Treibhausgasen Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) wurden 1997 auch die fluorierten Treibhausgase HFKW, FKW und SF₆¹ wegen ihres zum Teil extrem hohen Treibhauspotenzials in das Kyoto-Protokoll aufgenommen.

Die Bundesregierung hat die fluorierten Treibhausgase erstmals im Jahr 2000 als eigenständigen Baustein in ihr Klimaschutzprogramm einbezogen [Klimaschutzprogramm 2000]. Im Jahr 2002 hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) in einem Eckpunktepapier („Umsetzung des nationalen Klimaschutzprogramms im Bereich der fluorierten Treibhausgase“) die prognostizierte Emissionsentwicklung fluorierter Treibhausgase problematisiert, daraus Handlungsbedarf abgeleitet und Wege zur Emissionsminderung aufgezeigt [EckpPapier 2002]. Die Vorschläge sind vom 28. bis 30. Januar 2003 und vom 12. bis 14. Februar 2003 in Bonn intensiv mit den interessierten Kreisen diskutiert worden [Anhörung 2003]. Die Gespräche waren eine wesentliche Basis für die erste Auflage dieses Berichts.

Im Rahmen des Europäischen Klimaschutzprogramms (ECCP) haben die Europäische Kommission (KOM), Vertreter von Industrie, Mitgliedstaaten und Nicht-Regierungsorganisationen mögliche EU-weite Maßnahmen zur Emissionsminderung fluorierter Treibhausgase diskutiert [ECCP 2000]. Auf dieser Grundlage haben das Europäische Parlament und der Rat im Jahr 2006 die *Verordnung (EG) Nr. 842/2006 über bestimmte fluorierte Treibhausgase* [KOM 2006] und die *Richtlinie 2006/40/EG über Emissionen aus Klimaanlage in Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG des Rates* [KOM 2006a] erlassen.

Die nationale Umsetzung der beiden Rechtsvorschriften erfolgte in Deutschland durch die *Chemikalien-Klimaschutzverordnung* [ChemKlimaschutzV 2008] und durch Bekanntmachung im Verkehrsblatt 2006 [Verkehrsblatt 2006].

Einige Staaten Europas haben wegen des hohen Treibhauspotenzials von fluorierten Gasen, ihrer Emissionsreduktionsverpflichtungen im Rahmen der EU-Lastenteilung und der Annahme eines überproportionalen Emissionsanstiegs dieser Gase bereits vor der EU Maßnahmen zur Emissionsminderung, einschließlich Verwendungsverboten, in unterschiedlichem Umfang geplant oder beschlossen. Dies betrifft insbesondere Dänemark, Österreich und die Schweiz [Danish EPA 2001; HFKW-FKW-SF₆-VO 2002; StoV 2003].

Während die klassischen Treibhausgase meist als unerwünschte Nebenprodukte, z. B. bei der Verbrennung fossiler Rohstoffe, freigesetzt werden, werden fluorierte Treibhausgase zum überwiegenden Teil gezielt produziert und in Produkten als Kältemittel, Treibmittel, Feuerlöschmittel, Treibgas, etc. eingesetzt. Zur Emissionsminderung dieser Stoffe sind

¹ HFKW: Teilfluorierte Kohlenwasserstoffe, FKW: Perfluorierte Kohlenwasserstoffe, SF₆: Schwefelhexafluorid

daher neben technischen Maßnahmen vor allem eine gezielte Stoffsubstitution oder der Einsatz alternativer Technologien zielführend.

Ziel und Aufbau des Berichts

Zu dem Thema „fluorierte Treibhausgase“ besteht bei kommerziellen Anwendern fluorgashaltiger Produkte und Anlagen, bei der Bevölkerung - als private Anwender von möglicherweise fluorgashaltigen Produkten - und seitens Nicht-Regierungsorganisationen, Forschungseinrichtungen etc. ein erheblicher Informationsbedarf. Dies betrifft die fluorierten Treibhausgase als Stoffgruppe selbst sowie mögliche stoffliche und technische Alternativen zu ihrem Einsatz. Ziel dieses Berichts ist es, diesem Informationsbedarf nachzukommen. Darüber hinaus soll er als aktualisierter Sachstandsbericht für Entscheidungsträger dienen. Neben Entscheidungsträgern auf EU-, Bundes-, Landes- und kommunaler Ebene sind auch Entscheidungsträger in Forschung und Industrie mögliche Informationsempfänger.

Im Teil A des Berichts wird die Stoffgruppe der fluorierten Gase in kurzer Form vorgestellt. Nach einer Darstellung ihrer Eigenschaften und ihrer ökologischen Auswirkungen wird die Emissionsentwicklung beschrieben. Im Teil B sind die Anwendungsbereiche im Einzelnen und der jeweilige technische Stand hierzu dargestellt. Es gibt weitere Anwendungen, die aber wegen der sehr geringen Bedeutung in Bezug auf die Emissionen fluorierte Gase in diesem Bericht nicht berücksichtigt wurden. In den sich jedem Unterkapitel anschließenden Schlussfolgerungen wird - soweit möglich - beurteilt, ob der Einsatz halogenfreier Stoffe oder -verfahren technisch und ökonomisch möglich und ökologisch vorteilhaft ist.

Die Basis des im Jahr 2004 veröffentlichten Berichts waren die vielfältigen Gespräche, die seitens des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und des Umweltbundesamtes (UBA) mit Interessenvertretern zum Eckpunktepapier zu fluorierten Treibhausgasen geführt wurden. Den Schwerpunkt bildeten dabei die in Bonn vom 28.-30. Januar und vom 12.-14. Februar 2003 geführten Gespräche. Die dort zur Verfügung gestellten Informationen konnten seitdem durch weitere Gespräche oder Literaturlauswertungen ergänzt werden. Im Jahr 2010 wurde der Bericht auf Basis dieser neuen Informationen aktualisiert.

Dieser Bericht beschreibt den technischen Stand des Einsatzes fluorierte Gase in den einzelnen Anwendungen und stellt diesem technische Maßnahmen zur Minderung der Emissionen dieser Stoffe gegenüber. Hierzu gehört die Darstellung von Ersatzstoffen und

Ziel und Aufbau

-verfahren, die ohne den Einsatz fluorierter Treibhausgase auskommen oder auf dem Einsatz fluorierter Treibhausgase mit einem geringeren GWP basieren sowie die Darstellung weiterer technischer Maßnahmen. Bereits im Ordnungsrecht oder in freiwilligen Vereinbarungen ergriffene Maßnahmen zur Emissionsminderung sind in den einzelnen Kapiteln dargestellt.

Teil A Allgemeiner Teil

1 Eigenschaften und ökologische Auswirkungen fluorierter Gase

1.1 Struktur, Nomenklatur und chemisch-physikalische Eigenschaften

Unter dem Begriff „fluorierte Treibhausgase“ werden in Anlehnung an das Kyoto-Protokoll die Stoffgruppe der teilfluorierten Kohlenwasserstoffe (HFKW), die Stoffgruppe der voll- oder perfluorierten Kohlenwasserstoffe (FKW) und Schwefelhexafluorid (SF_6) zusammengefasst. Chemisch gesehen gibt es z. B. mit den fluorierten Ethern und Stickstofftrifluorid (NF_3) weitere Stoffgruppen, die den fluorierten Gasen zuzuordnen sind. Diese Stoffe sind derzeit noch nicht in das Kyoto-Protokoll aufgenommen, eine Aufnahme wird aber diskutiert. Auch innerhalb der Stoffgruppe der HFKW und FKW gibt es Einzelstoffe, die bisher nicht unter das Kyoto-Protokoll fallen, da ihnen in den relevanten Berichten des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) kein Treibhauspotenzial zugeordnet ist und sie auch nicht den im Kyoto-Protokoll festgelegten Berichtspflichten unterliegen.

Der Begriff voll- oder perfluorierte Kohlenwasserstoffe oder auch Fluorkohlenwasserstoffe ist eine Sammelbezeichnung für eine Vielzahl von niedermolekularen, aliphatischen (offenkettigen) oder alicyclischen (ringförmigen, nicht-aromatischen) Kohlenwasserstoffen, deren Wasserstoffatome vollständig durch Fluoratome ersetzt sind. Sind hingegen noch Wasserstoffatome im Molekül erhalten, werden diese Stoffe unter dem Sammelbegriff teilfluorierte Kohlenwasserstoffe oder auch wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe zusammengefasst. Allen Stoffen dieser beiden Stoffgruppen gemeinsam ist, dass keine weiteren Elemente als Kohlenstoff, Fluor und ggf. Wasserstoff enthalten sind. Die wichtigsten HFKW und FKW leiten sich vom Methan (CH_4), Ethan (C_2H_6) und Propan (C_3H_8) ab.

Im Allgemeinen werden die verschiedenen Stoffe unter Angabe ihres Kurzzeichens genannt. Häufig ist dem Kurzzeichen ein „R“ für Refrigerant (Kältemittel) vorgesetzt. Die Kurzzeichen sind aus drei Ziffern bestehende Nummern. Sie werden nach folgendem Schema vergeben:

- 1. Ziffer: Anzahl der Kohlenstoffatome im Molekül minus eins (eine „0“ wird nicht angegeben),

Teil A – Allgemeiner Teil

- 2. Ziffer: Anzahl der Wasserstoffatome plus eins,
- 3. Ziffer: Anzahl der Fluoratome. Kleine Buchstaben hinter der Zahl kennzeichnen den Ort der Substitution.

Beispiel: 134a = $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$ oder $\text{CF}_3\text{-CH}_2\text{F}$.

- Zubereitungen (Blends, Gemische) von HFKW und FKW erhalten ebenfalls Kurzzeichen, die sich jedoch nicht aus der Anzahl der Atome ableiten. Hier wird zwischen der 400er und der 500er Reihe unterschieden. Die Zuordnung der Gemische orientiert sich an für die Kältetechnik relevanten Eigenschaften: 400er Reihe = zeotrope Gemische und 500er Reihe = azeotrope Gemische.

Eine genaue Darstellung findet sich in der DIN 8960 [DIN 1998].

Teil- und perfluorierte Kohlenwasserstoffe sind verglichen mit den zugehörigen halogenfreien Kohlenwasserstoffen thermisch und chemisch wesentlich stabiler. Perfluorierte Kohlenwasserstoffe zählen zu den stabilsten organischen Verbindungen überhaupt. Sie zersetzen sich erst oberhalb von 800°C . Sowohl FKW als auch die meisten HFKW zeichnen sich durch Schwer- oder Unbrennbarkeit aus. Ausnahmen stellen z. B. der HFKW-152a, der HFKW-365mfc und HFKW-1234yf (HFO-1234yf) dar [Harnisch u. a. 2003, Sicherheitsdatenblatt 2008]. Im Fall eines Brandes können zum Teil toxische Zersetzungsprodukte wie z. B. Fluorwasserstoff oder Carbonylfluorid entstehen. In Wasser sind HFKW praktisch unlöslich. FKW sind auch mit anderen Lösemitteln nur wenig mischbar.

Schwefelhexafluorid ist im Gegensatz zu den HFKW und FKW keine Sammelbezeichnung, sondern ein Einzelstoff. Es handelt sich um ein farbloses, praktisch inertes Gas mit hoher dielektrischer Durchschlagsfestigkeit und thermischer Stabilität. Lediglich bei sehr hohen Temperaturen oder unter dem Einfluss elektrischer Lichtbögen kommt es zu einer Zersetzung von SF_6 . Dabei entstehen niederfluorierte, zum Teil toxische Zersetzungsprodukte.

Stickstofftrifluorid (NF_3) ist ebenfalls ein Einzelstoff. Seine Aufnahme in das Kyoto-Protokoll wird aufgrund seiner zunehmenden Klimarelevanz (zunehmender Einsatz, hohes GWP) seitens der Vertragsstaaten verhandelt. NF_3 ist ein reaktionsträges, farbloses Gas mit modrigem Geruch. Es reagiert bei Raumtemperatur nicht mit Wasser und besitzt im Gegensatz zu Ammoniak nahezu keine basischen Eigenschaften.

Die wichtigsten chemisch-physikalischen Eigenschaften und MAK-Werte der mengenmäßig bedeutendsten fluorierten Gase können Tabelle 1.1 entnommen werden.

Tabelle 1.1: Chemisch-physikalische Eigenschaften und MAK-Werte ausgewählter fluorierter Gase [DFG 2009; Air Liquide 2009; NICNAS 1999; DesMarteau, Beyerlein 1996; DuPont 2002]

Verbindung/ Kurzzeichen	Formel	Molekulargewicht in g/mol	Schmelzpunkt in °C	Siedepunkt in °C	Dampfdruck bei 20°C in bar	MAK-Wert [DFG 2009]	
						in ml/m ³	in mg/m ³
HFKW-23	CHF ₃	70	-155	-82,2	41,6	1.000*	
HFKW-32	CH ₂ F ₂	52	-136	-52	13,8		
HFKW-43-10mee	C ₅ H ₂ F ₁₀	252	-83,7	55	0,25		
HFKW-125	C ₂ HF ₅	120	-103	-48,5	12,1	1.000*	
HFKW-134a	CH ₂ FCF ₃	102	-101	-26	5,7	1.000	4.200
HFKW-152a	C ₂ H ₄ F ₂	67	-117	-25	5,1	1.000*	1.910*
HFKW-143a	C ₂ H ₃ F ₃	84	-111	-47,6	11,1		
HFKW-227ea	C ₃ HF ₇	170	-131	-16,4	4		
HFKW-236fa	C ₃ H ₂ F ₆	151	-94,2	-1,1	2,5 (25°C)	1.000*	
HFKW-245ca	C ₃ H ₃ F ₅	134	-73,4	25			
Schwefelhexafluorid	SF ₆	146	-50,8	-63,8	21	1.000	6.100
Stickstofftrifluorid	NF ₃	71	-206,8	-129			
FKW-14	CF ₄	88	-184	-128			
FKW-116	C ₂ F ₆	138	-101	-78			
FKW-218	C ₃ F ₈	188	-183	-36,7	7,7		

*: Interner Arbeitsplatzkonzentrationsrichtwert von DuPont® [DuPont 2002]

1.2 Globale Produktion, Anwendung und Emissionsprognose

Produktion

Im Jahr 2007 haben neun international tätige Unternehmen ihre Produktionsmenge an fluorierten Kohlenwasserstoffen (HFCKW, HFKW) an AFEAS (Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study) gemeldet. Die gemeldete Produktionsmenge betrug 209.059 t. Gegenüber dem Jahr 2006 entspricht dies einer Steigerung von 6 %. Hinzu kommen die in China und Indien produzierten HFKW-Mengen, die nicht an AFEAS gemeldet werden. Den Anteil der an AFEAS gemeldeten Produktionsmenge an der weltweiten Gesamtproduktion schätzt AFEAS auf etwa 60 % [AFEAS 2008].

Die Produktionskapazität in der Europäischen Union für den HFKW-134a hat IPCC [2005] für das Jahr 2003 auf 40.000 t geschätzt (weltweit 185.000 t). Weitere in der EU produzierte Stoffe waren 2003 die HFKW-143a, HFKW-125 und HFKW-32 sowie HFKW-365mfc. Die Anzahl der Unternehmen betrug drei. Darüber hinaus fand die Produktion von SF₆ statt.

Fluorierte Kohlenwasserstoffe können über verschiedene Herstellungswege gewonnen werden. Nicht zielführend ist wegen der extrem exothermen Reaktion die direkte Fluorierung von Kohlenwasserstoffen mit elementarem Fluor. Die bedeutendsten Herstellungsrouten für fluorierte Kohlenwasserstoffe sind die elektrochemische Fluorierung von Kohlenwasserstoffen, die Addition von Fluorwasserstoff an Mehrfachbindungen (z. B. an Olefine) oder der katalytische Cl/F-Austausch an Chlorkohlenwasserstoffen durch Fluorwasserstoff oder Metallfluoride. FKW werden auch über eine indirekte Fluorierung mit Fluorträgern (z. B. CoF₃) hergestellt [Kirk-Othmar 1994; Ullmann`s 1988].

Schwefelhexafluorid wurde erstmalig durch Verbrennung von Schwefel in Fluoratmosphäre hergestellt. Auch später erfolgte die technische Herstellung noch nach einer ähnlichen Methode: Flüssiger Schwefel wird bei 300°C in einem gekühlten Reaktor mit elementarem Fluor umgesetzt und die Reaktionsgase anschließend gereinigt [Ullmann`s 1976]. Wird an Stelle von Schwefel zuvor hergestelltes SF<sub>6</sub>Cl pyrolysiert, wird kein elementares Fluor benötigt. Des Weiteren sind elektrochemische Verfahren patentiert [Ullmann`s 1988].

Entwicklung von den FCKW zu den HFKW

HFKW und teilweise FKW werden in vielen Anwendungen eingesetzt, in denen vorher voll- oder teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW oder HFCKW) sowie Halone verwendet wurden. Sowohl FCKW als auch Halone zählen zu den die Ozonschicht schädigenden Stoffen (Ozone Depleting Substances, ODS) und sind inzwischen international mit dem Montrealer Protokoll zum Schutz der Ozonschicht aus dem Jahr 1987 [Montrealer Protokoll 2000] und seinen Folgeabkommen einem Ausstiegsszenario unterworfen. Deutschland hat 1991 mit der *FCKW-Halon-Verbots-Verordnung* [FCKW-Verordnung 1991] den vollständigen Ausstieg aus den FCKW und Halonen begonnen und Ende der neunziger Jahre - von Ausnahmen abgesehen - abgeschlossen. Erst 2006 hat die

Chemikalien-Ozonschichtverordnung [ChemOzonschichtV 2006] die *FCKW-Halon-Verbots-Verordnung* abgelöst.

Als europäische Regelung gilt seit dem 01. Januar 2010 die *Verordnung (EG) Nr. 1005/2009 vom 16. September 2009 über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen* [EG-Verordnung 2009]. Sie hat frühere Verordnungen, wie die *Verordnung (EG) Nr. 3093/94 vom 15. Dezember 1994* [EG-Verordnung 1994] sowie die *EG-Verordnung Nr. 2037/2000 vom 29. Juni 2000* [EG-Verordnung 2000], ersetzt.

ODS wurden wegen ihrer Unbrennbarkeit und ihrer technischen Eigenschaften in vielen Anwendungsbereichen in großem Umfang eingesetzt. Die ebenfalls im Montrealer Protokoll aufgenommenen Halone wurden von Ausnahmen abgesehen nur als Feuerlöschmittel verwendet.

Nachdem das ozonschichtschädigende Potenzial (ODP) dieser Stoffe entdeckt wurde, begann die Suche nach möglichen Ersatzstoffen. Die Forschung konzentrierte sich dabei zunächst auf chemisch sehr ähnliche Stoffe. Über HFCKW gelangte man zu den chlorfreien Alternativen, den fluorierten und teilfluorierten Kohlenwasserstoffen.

Durch die Entwicklung der HFKW und FKW als Ersatzstoffe für ODS sind auch die Anwendungsbereiche weitgehend identisch. Vor allem die HFKW haben in einigen Bereichen einen Beitrag zum schnellen Ausstieg aus ozonschichtschädigenden Stoffen geleistet. In vielen Anwendungen konnten sich jedoch bereits von Anfang an halogenfreie Stoffe als Ersatzstoffe für ODS durchsetzen, beispielsweise als Löse- und Reinigungsmittel, als Kältemittel, als Feuerlöschmittel und in vielen Bereichen der Schaumstoffherstellung. Teilweise haben auf dem Einsatz halogenfreier Stoffe basierende Verfahren und Produkte erst in den letzten Jahren einen technischen Stand erreicht, der ihren breiten Einsatz ermöglicht. Dies trifft z. B. auf den Einsatz von CO₂ als Kältemittel zu. Heute können diese Technologien die zwischenzeitlich erforderlichen Verfahren und Produkte mit fluorierten Gasen ersetzen, in einigen Anwendungsbereichen ist dieser Prozess sogar schon nahezu abgeschlossen.

Nachdem in Folge des FCKW- und HFCKW-Verbotes die Emissionen fluorierter Treibhausgase anstiegen, erließ die Europäische Gemeinschaft die *Verordnung (EG) Nr. 842/2006 vom 17. Mai 2006 über bestimmte fluorierte Treibhausgase* (F-Gase-Verordnung [KOM 2006]). Die F-Gase-Verordnung verbietet u. a. die Verwendung von FKW, HFKW und SF₆ in einigen Produkten, z. B. in Schallschutzfenstern, Schuhen, Reifen und Feuerlöschern. Für den Betrieb von stationären Kälteanlagen, Klimaanlage und Wärmepumpen, die fluorierte Treibhausgase enthalten, sind unter anderem regelmäßige Dichtheitsprüfungen sowie die Zertifizierung von Personal und Betrieben, die einen professionellen Umgang mit Anlagen haben, verbindlich. Ergänzend zur F-Gase-Verordnung wurde in Deutschland die *Verordnung zum Schutz des Klimas vor Veränderungen durch den Eintrag bestimmter fluorierter Treibhausgase* (Chemikalien-

Klimaschutzverordnung [ChemKlimschutzV 2008]) verabschiedet. Diese geht vor allem durch die Festlegung von Grenzwerten für die spezifischen Kältemittelverluste aus „ortsfesten Anwendungen“ (Kälte- und Klimaanlageanlagen) deutlich über die EU-Verordnung hinaus.

Parallel zur F-Gase-Verordnung trat die *Richtlinie 2006/40/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Emissionen aus Klimaanlageanlagen in Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG des Rates* in Kraft. Sie gilt zunächst für Klimaanlageanlagen von Pkw und kleineren Nutzfahrzeugen, die darauf ausgelegt sind, fluoriierte Treibhausgase mit einem GWP-Wert über 150 zu enthalten. Sie schreibt Dichtheitsprüfungen dieser Klimaanlageanlagen vor und verbietet sie ab 2011 in neuen Autotypen, ab 2017 in allen neu gebauten Autos (s. Kap. 3.3.7).

Anwendungsbereiche und Verwendung

Die Anwendungsbereiche für fluoriierte Treibhausgase sind vielfältig und gehen über die der ozonschichtschädigenden Stoffe noch hinaus. Grundsätzlich kann zwischen dem Einsatz in überwiegend geschlossenen Kreisläufen (z. B. als Kältemittel), in offenen Anwendungen (z. B. als Treibgas) und als Prozessgas (z. B. Halbleiterherstellung) unterschieden werden. Die Art der Anwendung ist für die Höhe und den Zeitpunkt der Emissionen entscheidend. Deshalb ist bei den fluoriierten Treibhausgasen zwischen den eingesetzten / verwendeten Mengen und den tatsächlichen Emissionen in einem Jahr zu unterscheiden. Unter der Einsatz- / Verwendungsmenge wird die Gesamtmenge verstanden, die zur Herstellung oder Wartung eines Produktes verwendet / eingesetzt wurde und die weiterhin in diesem Produkt als Kälte- oder Treibmittel enthalten sein kann oder die direkt, z. B. als Ätz- oder Tracergas, verbraucht wurde.

HFKW

Die Anwendungsbereiche für HFKW sind im Wesentlichen

- stationäre und mobile Kälte- und Klimaanlageanlagen (als Kältemittel),
- Dämmstoffe/Schaumstoffe (als Treibmittel) und
- Aerosole (als Treibgas).

Weitere Anwendungen/Emissionsquellen gibt es

- in der Herstellung von HFCKW (Bildung von HFKW-23 als Nebenprodukt),
- in der Halbleiterherstellung (als Ätzgas),
- als Feuerlöschmittel und
- als Lösemittel.

Heute sind die Produktion von HFCKW, wo HFKW als unerwünschte Nebenprodukte entstehen, und die Verwendung von HFKW als Kältemittel die Hauptemissionsquellen. Während im Jahr 2005 auf die HFCKW-Herstellung weltweit etwa 44 % (246 Megatonnen CO_{2eq}) der Emissionen entfielen, waren etwa 43 % (240 Megatonnen CO_{2eq}) der HFKW-Emissionen auf ihre Verwendung als Kältemittel in der stationären und mobilen Kühlung (Kälte- und Klima) zurückzuführen. Etwa 67 % (160 Megatonnen CO_{2eq}) dieser Kältemittel-emissionen entfielen dabei auf gewerbliche Kälteanlagen [Schwarz, Gschrey 2009].

FKW

Im Jahr 2005 emittierten weltweit 68 Megatonnen CO_{2eq} FKW in die Atmosphäre. Dies entspricht einem Anteil von 9 % an den gesamten F-Gas-Emissionen. Die größten Emissionsquellen für FKW sind die Aluminium- und die Halbleiter-Industrie. Im Unterschied zu den anderen FKW-Emissionsquellen werden FKW in der Aluminium-Industrie nicht gezielt eingesetzt, sondern entstehen im Verarbeitungsprozess [Schwarz, Gschrey 2009].

Gezielt eingesetzt werden FKW

- in der Halbleiterherstellung (als Ätzgas),
- in der Leiterplattenfertigung (als Ätzgas),
- in der Kältetechnik (als Kältemittel).

SF₆

SF₆ zählt nicht zu den Ersatzstoffen für ODS und wird bereits seit Ende der sechziger Jahre eingesetzt. Das Gas mit dem höchsten GWP-Wert hat mit Emissionen in Höhe von 140 Megatonnen CO_{2eq} im Jahr 2005 einen Anteil von 18 % an den globalen F-Gas-Emissionen. Die größten Emissionsquellen für SF₆ sind heute elektrische Betriebsmittel, die Magnesium- und die Halbleiterindustrie [Schwarz, Gschrey 2009].

Die vielfältigen Anwendungsbereiche für SF₆ sind

- in elektrischen Betriebsmitteln (als Isolier- und Löschgas),
- in Aluminiumgießereien (als Reinigungsgas),
- in Magnesiumgießereien (als Schutzgas),
- in der Halbleiterproduktion (als Ätzgas),
- in elektronischen Geräten der Hochspannung (Elektronenmikroskope, Röntengeräte etc.),
- in Autoreifen (als Isoliergas),
- in Schallschutzscheiben (als Isoliergas),

- in der Herstellung photovoltaischer Zellen (als Ätzgas),
- in der Produktion optischer Glasfasern (zur Fluordotierung),
- als Tracergas und
- als Lecksuchgas.

Global beträgt der Anteil fluorierter Treibhausgase an den Gesamtemissionen klimaschädlicher Gase heute etwa 1-2 %. Dies entspricht in etwa dem Anteil des Flugverkehrs. Allerdings zeigen im Auftrag des UBA erstellte Prognosen, dass dieser Anteil im Jahr 2050 in einem „business-as-usual-Szenario“ auf 5,9 % (4019 Megatonnen CO₂ Äquivalente) steigen wird [Schwarz, Gschrey 2009]. In Zusammenarbeit mit Herstellern fluorierter Treibhausgase erarbeitete Prognosen gehen zum Teil von noch größeren Anteilen aus [Velders et al. 2009].

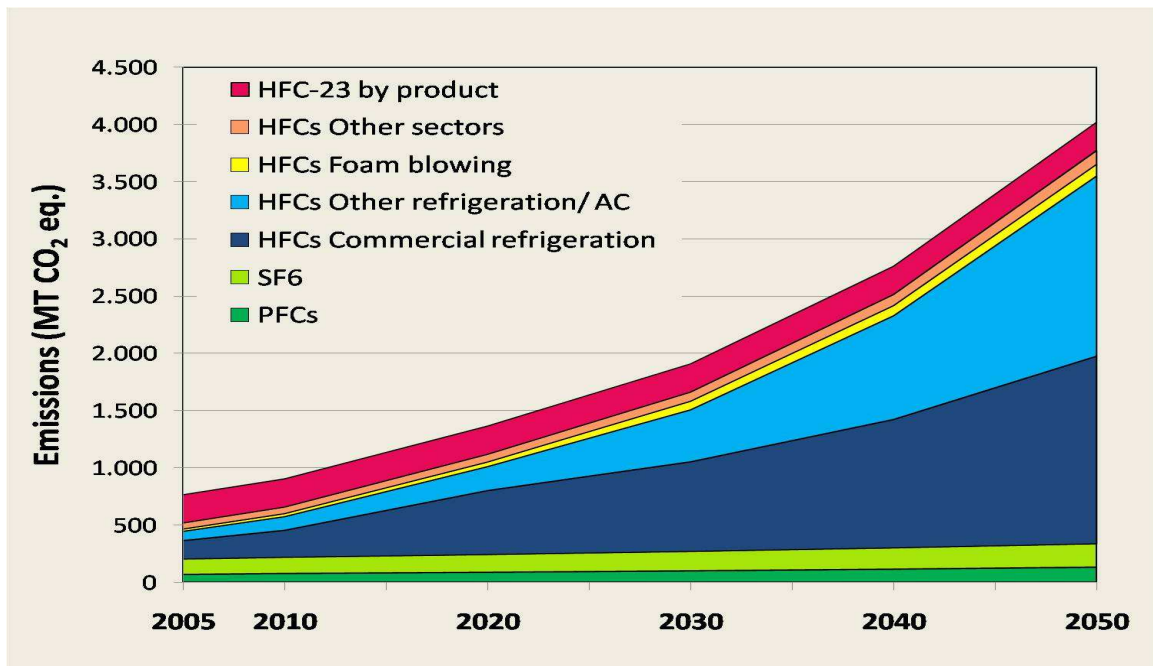


Abbildung 1.1: Global prognostizierte Emissionen fluorierter Treibhausgase in den wichtigsten Anwendungsbereichen in Megatonnen CO₂-Äquivalente („Business-as-usual-Szenario“) [Schwarz, Gschrey 2009].

80 % (3211 Megatonnen CO₂ Äquivalente) der F-Gas-Emissionen des Jahres 2050 resultieren aus HFKW-Emissionen der stationären und mobilen Kälte- und Klimaanlageanwendungen. Der Anteil der FKW-Emissionen im Jahr 2050 liegt bei 3 % (133 Megatonnen CO₂ Äquivalente), und etwa 5 % (206 Megatonnen CO₂ Äquivalente) der F-Gas-Emissionen gehen auf die Verwendung von SF₆ zurück. Abbildung 1.1 gibt einen Überblick über die global prognostizierte Entwicklung der Emissionen von HFKW, FKW und SF₆ bis zum Jahr 2050 („Business-as-usual-Szenario“). Die Emissionen von HFKW

sind für die wichtigsten Anwendungsbereiche - Gewerbekälte, andere Kälte- und Klimaanwendungen, Schaumherstellung und Emissionen von HFKW-23 aus der Produktion von HFCKW - separat dargestellt [Schwarz, Gschrey 2009].

1.3 Ökologische Auswirkungen (Schwerpunkt Klima)

HFKW, SF_6 und NF_3 werden überwiegend gezielt hergestellt und in Anlagen und Produkten eingesetzt. Emissionen treten vor allem bei der Verwendung der Stoffe und Entsorgung von Anlagen und Produkten auf. Lediglich bei den HFKW und bei den FKW kommt es zu einer ungewollten Entstehung bei der HFCKW-22 Produktion und bei der Herstellung von Primäraluminium (s. Kap. 1.2). Die in der Atmosphäre festgestellten Konzentrationen der einzelnen HFKW, FKW und SF_6 liegen im Part-per-Trillion (ppt)-Bereich. Sie zeigen wegen der relativ langen - bei FKW und SF_6 extrem langen - atmosphärischen Lebensdauer aber generell einen zunehmenden Trend. Die Konzentration einiger Stoffe nahm in den letzten Jahren stark zu (s. Abb. 1.2). Die biologische Wirksamkeit der fluorierten Verbindungen ist gering, Schadwirkungen treten erst bei sehr hohen Konzentrationen auf. In Anbetracht der sehr niedrigen Konzentrationen der fluorierten Gase in der Atmosphäre (in der diese Stoffe verbleiben), fallen weder human- noch ökotoxikologische Gesichtspunkte ins Gewicht.

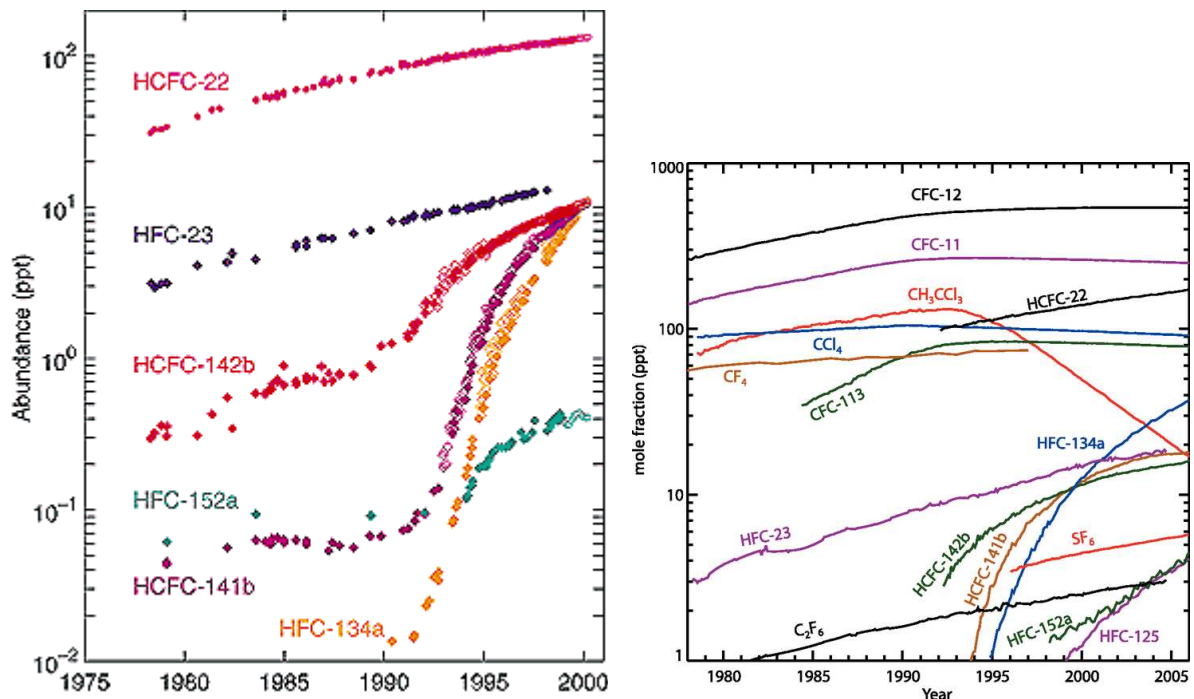


Abbildung 1.2: Konzentrationen langlebiger Treibhausgase in der Atmosphäre [IPCC 2001, IPCC 2007].

Die von fluorierten Treibhausgasen ausgehenden ökologischen Auswirkungen waren Untersuchungsgegenstand des UBA-Forschungsprojektes „Risiken und Nutzen von fluorierten Treibhausgasen in Techniken und Produkten unter besonderer Berücksichtigung der stoffintrinsic Eigenschaften“ [Harnisch u. a. 2003]. Die dort gewonnenen Erkenntnisse sind in die folgenden Ausführungen eingeflossen.

1.3.1 Abbau in der Atmosphäre/Senken und Persistenz

Die HFKW sind dadurch gekennzeichnet, dass sie im Unterschied zu den FKW noch Wasserstoffatome im Molekül enthalten, die durch Reaktion mit Hydroxyl-Radikalen (OH-Radikalen, „Waschmittel der Atmosphäre“) abstrahiert werden können (H-Abstraktion). Dieser Primärschritt ist entscheidend für die Geschwindigkeit des Abbaus. Damit bestimmt er auch die Lebensdauer des Stoffes. Der weitere Abbau erfolgt - radikalisch über verschiedene Zwischenprodukte oder Reaktionskanäle - relativ rasch zu Fluorwasserstoff (HF) und Trifluoressigsäure (CF_3COOH , TFA) als wesentliche Abbauprodukte. Sonstige Senken wie Photolyse, Adsorption und Auswaschen fallen nicht ins Gewicht.

Bei den FKW und SF_6 fehlt die Möglichkeit der H-Abstraktion. Diese Moleküle sind deshalb außerordentlich beständig und werden weder in der Troposphäre noch in der Stratosphäre, sondern erst in der Mesosphäre photolytisch abgebaut. Dieser Prozess erfolgt nach transportbedingter langer zeitlicher Verzögerung und darüber hinaus auch noch sehr langsam. Hierin liegt die hohe Persistenz dieser Verbindungen begründet.

Sowohl Fluorwasserstoff wie auch Trifluoressigsäure sind gut wasserlöslich und werden daher durch den Niederschlag aus der Atmosphäre eliminiert. Der Fluorid-Gehalt von Niederschlag und Gewässern ist allerdings nur in sehr geringem Umfang auf den Abbau von HFKW zurückzuführen. Die global im Regen enthaltene Menge von Fluorwasserstoff oder Fluorid, die aus HFKW stammen, führen zu Konzentrationen, die um fünf Größenordnungen unter den entsprechenden Schadschwellen von Landpflanzen liegen [Harnisch u. a. 2003]. Eine Reihe verschiedener industrieller Prozesse (Verbrennung bestimmter Kohlen, Aluminiumherstellung u. a.) hatten in der Vergangenheit auch in Deutschland und in der EU zu Schadereignissen an Pflanzen und Weidetieren geführt. Durch die hohen Anforderungen zur Luftreinhaltung ist dies inzwischen hierzulande nicht mehr der Fall. In anderen Teilen der Erde sind Fluoridemissionen aus der Verbrennung minderwertiger Kohle jedoch von gravierender öko- und humantoxischer Relevanz.

TFA ist eine ätzende Substanz, die auch bei Verdünnung noch stark ätzende Gemische mit Wasser bildet. TFA trägt in gewissem Umfang zur Versauerung von Gewässern bei und wirkt phytotoxisch, allerdings erst in höheren Konzentrationen als derzeit beobachtet [Harnisch u. a. 2003]. TFA ist sehr stabil und kann sich in der Umwelt akkumulieren. Eine Abschätzung der TFA-Konzentrationen für Japan beim Einsatz von HFKW-1234yf kommt zu dem Ergebnis, dass in geschlossenen aquatischen Systemen der Abstand zwischen

errechneter Konzentration im Oberflächenwasser und der Wirkschwelle (NOAEL) für aquatische Ökotoxizität nicht ausreichend groß ist [Kajihara 2010].

„Während die Geochemie des Fluorids schon seit geraumer Zeit recht gut verstanden ist, bestehen im Zusammenhang mit dem Vorkommen und den Quellen und Senken von Trifluoressigsäure nach wie vor große Unsicherheiten“ [Tromp u. a. 1995: aus Harnisch u. a. 2003; Frank u. a. 1996: aus Harnisch u. a. 2003]. Die in Gewässern festgestellten Konzentrationen von Trifluoressigsäure lassen sich nur zu einem geringen Teil auf den Abbau der HFKW zurückführen. Der Ursprung der Hauptmenge ist noch unbekannt und Gegenstand der Forschung.

1.3.2 Abbau von stratosphärischem Ozon

Die hier betrachteten fluorierten Gase enthalten alle weder Chlor noch Brom oder Jod im Molekül. Sie sind daher nicht in der Lage, katalytisch Ozon abzubauen. Ihr Ozonzerstörungspotenzial ist deshalb sehr gering (s. [Harnisch u. a. 2003]).

Vereinzelt wird in der Wissenschaft diskutiert, dass auch die CF_3 -Gruppe in geringem Umfang zum Abbau von Ozon befähigt wäre. Konkrete Ergebnisse liegen heute nicht vor. Im Vergleich zum Ozonzerstörungspotenzial der bereits in der Stratosphäre vorhandenen ODS hätte dies ohnehin nur eine sehr geringe Bedeutung.

1.3.3 Beitrag zur photochemischen Oxidantienbildung

Die Abbaubarkeit der HFKW bringt es mit sich, dass über die Bildung von Peroxiden und die Oxidation vom NO zu NO_2 in der Troposphäre Ozon gebildet wird. Entsprechend der im Vergleich zu NMVOC (flüchtige organische Verbindungen ohne Methan) sehr langen atmosphärischen Verweilzeit verläuft dieser Prozess sehr langsam. Er trägt daher nicht zu den Spitzenwerten bei sommerlichen Hitzeperioden (Sommer-Smog), sondern nur zum globalen Hintergrund bei. Dieser Beitrag ist jedoch äußerst gering. Er entspricht hauptsächlich den Mengenverhältnissen von anthropogenen und biogenen NMVOC gegenüber den freigesetzten HFKW von einigen hunderttausend Tonnen gegenüber einigen hundert Mio. Tonnen pro Jahr.

FKW und SF_6 werden in der Troposphäre nicht abgebaut und tragen auch nicht zur Ozonbildung bei.

1.3.4 Beitrag zum globalen Klimawandel

Die fluorierten Verbindungen absorbieren überwiegend relativ stark in einem Infrarot (IR)-Spektralbereich, in dem andere Bestandteile der Atmosphäre keine IR-Absorption zeigen („Atmosphärisches Fenster“ [WMO 1995]). Die Erhöhung der Konzentration dieser Stoffe in der Atmosphäre führt daher ungebremst zur Erhöhung der Absorption. In Verbindung mit der moderat langen (z. B. 1,4 Jahre für HFKW-152a) bis zur extrem langen atmosphärischen Lebensdauer (z. B. 50.000 Jahre für CF_4) ergibt sich für die meisten der

fluorierten Verbindungen eine hohe Treibhauswirksamkeit. SF_6 nimmt dabei die Spitzenstellung innerhalb aller Treibhausgase ein.

Die Treibhauswirksamkeit wird zumeist durch das Treibhauspotenzial („Global Warming Potential = GWP“) charakterisiert, das die Wirksamkeit der entsprechenden Gase im Vergleich mit CO_2 als Referenzsubstanz ($\text{GWP} = 1$) über einen Zeitraum von üblicherweise 20, 100 oder 500 Jahren betrachtet. Zum Zwecke der Vergleichbarkeit hat sich die internationale Staatengemeinschaft im Kontext der Klimarahmenkonvention und dem Kyoto-Protokoll 1997 auf einen Standard von 100 Jahren geeinigt (GWP_{100}). Das Treibhauspotenzial der wichtigsten fluorierten Gase variiert zwischen 140 und 7.000 bei den HFKW und zwischen 6.000 und 9.000 bei den FKW. SF_6 hat ein GWP_{100} von 23.900. Damit sind nahezu alle fluorierten Treibhausgase als Stoffe mit einem hohen GWP (s. Abschnitt 1.4) zu klassifizieren.

Ein weiteres, nicht über einen Zeithorizont blickendes Maß für die Klimawirksamkeit ist der Strahlungsantrieb (Radiative Forcing). Dieser gibt an, wie stark die Strahlungsbilanz bei einer Konzentrationserhöhung des Stoffes in der Atmosphäre um ein Part-per-Billion (ppb) gestört wird. Die Werte für die Treibhauspotenziale und den Strahlungsantrieb aller vom Kyoto-Protokoll erfassten Treibhausgase und häufig verwendeter Stoffgemische sind zusammen mit den atmosphärischen Lebensdauern in Tabelle 1.2 wiedergegeben. Tabelle 1.3 zeigt diese Werte für weitere fluorhaltige Verbindungen, die potenzielle Kandidaten für die Regelung in einem Nachfolgeabkommen darstellen.

Fluorierte Treibhausgase tragen nicht nur direkt, sondern auch indirekt durch den mit ihrem Einsatz verbundenen Energieverbrauch zum globalen Klimawandel bei. Beispielsweise ist der spezifische Energieverbrauch für die Herstellung von fluorierten Treibhausgasen erheblich größer als für alternative Kältemittel [Harnisch u. a. 2003].

Tabelle 1.2: Zusammenstellung des Treibhauspotenzials, des Strahlungsantriebs und der atmosphärischen Lebensdauer der vom Kyoto-Protokoll erfassten Treibhausgase und ausgewählter Stoffgemische [IPCC 2007a]

Verbindung/ Kurzzeichen	Formel	Atmosphärische Lebensdauer in Jahren	Strahlungsantrieb (Radiative Forcing) in W/m ²	Treibhauspotenzial (Global Warming Potential) (GWP)			
				20 Jahre	100 Jahre	500 Jahre	100 Jahre ²
Kohlendioxid	CO ₂	variabel	0,000014	1	1	1	1
Methan	CH ₄	12	0,00037	72	25	7,6	21
Distickstoffoxid	N ₂ O	114	0,00303	289	298	153	310
HFKW-23	CHF ₃	270	0,19	12.000	14.800	12.200	11.700
HFKW-32	CH ₂ F ₂	4,9	0,11	2.330	675	205	650
HFKW-41	CH ₃ F	2,4	0,02	323	92	28	150
HFKW-43-10mee	C ₅ H ₂ F ₁₀	15,9	0,40	4.140	1.640	500	1.300
HFKW-125	C ₂ HF ₅	29	0,23	6.350	3.500	1.100	2.800
HFKW-134	C ₂ H ₂ F ₄	9,6	0,18	3.400	1.100	335	1.000
HFKW-134a	CH ₂ FCF ₃	14	0,16	3.830	1.430	435	1.300
HFKW-143	C ₂ H ₃ F ₃	3,5	0,13	1.240	353	107	300
HFKW-143a	C ₂ H ₃ F ₃	52	0,13	5.890	4.470	1.590	3.800
HFKW-152a	C ₂ H ₄ F ₂	1,4	0,09	437	124	38	140
HFKW-227ea	C ₃ HF ₇	34,2	0,26	5.310	3.220	1.040	2.900
HFKW-236fa	C ₃ H ₂ F ₆	240	0,28	8.100	9.810	7.660	6.300
HFKW-245ca	C ₃ H ₃ F ₅	6,2	0,23	2.340	693	211	560
Schwefelhexafluorid	SF ₆	3.200	0,52	16.300	22.800	32.600	23.900
FKW-14	CF ₄	50.000	0,10	5.210	7.390	11.200	6.500
FKW-116	C ₂ F ₆	10.000	0,26	8.630	12.200	18.200	9.200
FKW-218	C ₃ F ₈	2.600	0,26	6.310	8.830	12.500	7.000
FKW-318	c-C ₄ F ₈	3.200	0,32	7.310	10.300	14.700	8.700
FKW-3-1-10	C ₄ F ₁₀	2.600	0,33	6.330	8.860	12.500	7.000
FKW-4-1-12	C ₅ F ₁₂	4.100	0,41	6.510	9.160	13.300	7.500
FKW-5-1-14	C ₆ F ₁₄	3.200	0,49	6.600	9.300	13.300	7.400

² Bis zum Jahr 2012 gültige, von den Vertragsstaaten anerkannte GWP-Werte für die erste Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls [IPCC 1995].

Verbindung/ Kurzzeichen	Formel	Atmosphärische Lebensdauer in Jahren	Strahlungsantrieb (Radiative Forcing) in W/m ²	Treibhauspotenzial (Global Warming Potential) (GWP)			
				20 Jahre	100 Jahre	500 Jahre	100 Jahre ²
HFKW-404A	Gemisch				3.922		3.260
HFKW-407C	Gemisch				1.774		1.526
HFKW-410A	Gemisch				2.088		1.725
HFKW-417A	Gemisch				2.346		1.955
HFKW-437A	Gemisch				1.805		1.567
HFKW-507	Gemisch				3.985		3.300

Tabelle 1.3: Zusammenstellung des Treibhauspotenzials, des Strahlungsantriebs und der atmosphärischen Lebensdauer ausgewählter neuerer Stoffe [IPCC 2007a]

Verbindung/ Kurzzeichen	Formel	Atmosphärische Lebensdauer in Jahren	Strahlungsantrieb (Radiative Forcing) in W/m ²	Treibhauspotenzial (Global Warming Potential) (GWP)		
				20 Jahre	100 Jahre	500 Jahre
HFKW-152	C ₂ H ₄ F ₂	0,6	0,09	187	53	16
HFKW-161	C ₂ H ₅ F	0,3	0,03	43	12	3,7
HFKW-236cb	C ₃ H ₂ F ₆	13,6	0,23	3.630	1.340	407
HFKW-236ea	C ₃ H ₂ F ₆	10,7	0,30	4.090	1.370	418
HFKW-245fa	C ₃ H ₃ F ₅	7,6	0,28	3.380	1.030	314
HFKW-365mfc	C ₄ H ₅ F ₅	8,6	0,21	2.520	794	241
Stickstofftrifluorid	NF ₃	740	0,21	12.300	17.200	20.700
Trifluormethylschwefelpentafluorid	SF ₅ CF ₃	800	0,57	13.200	17.700	21.200
FKW-216	c-C ₃ F ₆	>1.000	0,42	12.700	>17.340	21.800
FKW-9-1-18	C ₁₀ F ₁₈	>1.000	0,56	>5.500	>7.500	>9.500
HFE-143a	CH ₃ OCF ₃	4,3	0,27	2.630	756	230
HFE-227ea	C ₂ HF ₄ OCF ₃	11	0,40	4.540	1.540	468
HFE-236fa	C ₂ H ₂ F ₃ OCF ₃	3,7	0,34	1.710	487	148

Die in Tabelle 1.2, in der rechten Spalte angegebenen GWP-Werte sind von den Vertragsstaaten der Klimarahmenkonvention anerkannt. Für die in Tabelle 1.3 aufgeführten neueren Stoffe, ist bisher keine Festlegung eines GWP-Wertes erfolgt. In anderen

Veröffentlichungen sind wegen der dort verwendeten Modelle ggf. andere GWP-Werte genannt. Neuere Daten resultieren aus verbesserten spektroskopischen Daten und geänderten Werten für die atmosphärische Lebensdauer.

Schlussfolgerungen

Von allen Eigenschaften der fluorierten Verbindungen fällt der Beitrag zu den Änderungen des globalen Klimas unter Umweltgesichtspunkten mit Abstand am stärksten ins Gewicht. Wenn auch der Anteil am bisherigen zusätzlichen Treibhauseffekt gering ist, kommt dem Problem im Hinblick auf das hohe Zuwachspotenzial im Rahmen der FCKW/HFCKW-Substitution und des wachsenden Bedarfs für Kühlung und Klimatisierung, insbesondere in Entwicklungs- und Schwellenländern, eine hohe Bedeutung zu. Auch ist zu berücksichtigen, dass sich mittels Maßnahmen bei den fluorierten Gasen - z. B. durch Substitution - häufig eine Emissionsreduktion um 100 % erzielen lässt. Dies ist bei den klassischen Treibhausgasen meist nicht möglich. Die durch Einzelmaßnahmen z. B. beim Treibhausgas CO₂ erzielbaren Emissionsminderungen liegen in einer mit den möglichen Emissionsminderungen bei den fluorierten Gasen vergleichbaren Größenordnung.

Da sowohl direkte als auch indirekte Effekte eine Rolle spielen, sollten Maßnahmen zur Emissionsminderung jeweils den Gesamtbeitrag zum Treibhauseffekt berücksichtigen, der durch den **Total Equivalent Warming Impact (TEWI)**-Wert charakterisiert wird (s. Kap. 3.3). Des Weiteren sind bei solchen Abwägungen insbesondere auch die Risiken durch die Persistenz der fluorierten Gase zu berücksichtigen und im Zweifelsfall sowie unter der Voraussetzung, dass keine anderen ökologischen oder sicherheitstechnischen Nachteile vorliegen, halogenfreie Stoffe oder Verfahren zu bevorzugen.

1.4 Überblick über mögliche Ersatzstoffe

Fluorierte Treibhausgase konkurrieren in nahezu allen Anwendungsbereichen mit anderen Stoffen. Es ist nicht möglich, an dieser Stelle einen vollständigen Überblick über alle technisch einsetzbaren Stoffe und/oder Stoffgruppen zu geben. Exemplarisch sollen hier die bedeutendsten dargestellt werden: Kohlendioxid, Kohlenwasserstoffe, Ammoniak, Dimethylether und Stickstoff. Alle genannten Stoffe sind relevant für die Kälte- und Klimatechnik, einige für die Schaumstoff- und Aerosolindustrie sowie als Löse- und Feuerlöschmittel. Abgesehen von in Spezialgebieten relevanten, anderen Stoffen (z. B. fluorierte Ether, Stickstoff) stellen außerdem Luft und „Vakuum“ bedeutende „Ersatzstoffe“ dar. Seit wenigen Jahren kündigen Hersteller von fluorierten Treibhausgasen zudem eine neue Generation dieser Stoffe, sogenannte HFO, an. Prominentester Kandidat ist der

HFKW-1234yf (HFO 1234yf), welcher als Kältemittel für mobile Klimaanlage diskutiert wird (s. Abschnitt 3.3.7). Allen zuvor genannten Ersatzstoffen ist ihr geringes GWP_{100} gemeinsam. D.h., sie haben ein $\text{GWP}_{100} < 20$. Diese Einstufung basiert auf einem vom UBA vorgeschlagenen Klassifizierungssystem, welches auf bereits existierenden Grenzen beruht:

Niedriges GWP_{100} : $\text{GWP}_{100} < 20$

Mittleres GWP_{100} : $20 \leq \text{GWP}_{100} \leq 150$

Hohes GWP_{100} : $\text{GWP}_{100} > 150$

Der Einsatz von Ersatzstoffen erfordert meist Verfahrensänderungen. Teilweise werden für den Einsatz von Ersatzstoffen auch neue Anlagen und Verfahren entwickelt. Mit diesen Neuentwicklungen ist häufig ein technischer Fortschritt verbunden, der u. a. Energieeinsparungen oder zusätzliche Leistungen des Gerätes ermöglicht. Ein Beispiel ist die CO_2 -Klimaanlage für mobile Anwendungen: Sie kühlt effizienter und kann im Winter als Wärmepumpe genutzt werden, die bereits bei kaltem Motor Wärme produziert und somit Energie spart und zur Verbesserung der Sicherheit beiträgt.

Das Umweltbundesamt hat sich bereits im Jahr 1989 im Zusammenhang mit der Diskussion um den Ausstieg aus der Verwendung von ozonschichtschädigenden Stoffen intensiv mit der Ersatzstofffrage beschäftigt. Zum damaligen Zeitpunkt waren zwar teilweise Stoffe in der Diskussion, denen heute keine Bedeutung mehr zukommt. Der überwiegende Teil der Stoffe ist aber immer noch relevant, heute auch als mögliche Ersatzstoffe für fluoridierte Treibhausgase.

Der in diesem Kapitel gegebene Überblick basiert im Wesentlichen auf den Ausführungen des UBA aus dem Jahr 1989 [UBA 1989]. An der grundsätzlichen Einschätzung des UBA zu diesen Stoffen hat sich keine Änderung ergeben. Die Ausführungen sind durch neue Informationen ergänzt. Eine detailliertere Betrachtung der ökologischen und technischen Eigenschaften möglicher Ersatzstoffe und HFKW ist in der Studie "Risiken und Nutzen von fluoridierten Treibhausgasen in Techniken und Produkten unter besonderer Berücksichtigung der stoffintrinsic Eigenschaften" enthalten, die im Auftrag des Umweltbundesamtes erarbeitet wurde [Harnisch u. a. 2003].

Alle für die verschiedenen Anwendungsbereiche in Betracht kommenden Ersatzstoffe haben kein oder zumindest nur ein niedriges GWP_{100} . Sie weisen meist andere Eigenschaften auf, die bei der Anwendung berücksichtigt werden müssen. Zu diesen zählen im Wesentlichen ihre Brennbarkeit, ihre Toxizität oder – bei CO_2 als Kältemittel – die in der Anwendung auftretenden hohen Drücke. Wegen der Bedeutung der Eigenschaften Brennbarkeit und Toxizität sind in Tabelle 1.3 die Explosionsgrenzen und MAK-Werte von halogenfreien, möglichen Ersatzstoffen zusammengestellt. Zum Vergleich sind einige HFKW ebenfalls in die Tabelle aufgenommen.

Tabelle 1.3: Explosionsgrenzen und MAK-Werte ausgewählter halogenfreier Stoffe und einiger HFKW [DFG 2009; Harnisch u. a. 2003; UBA 1989]

Verbindung/ Kurzzeichen	Formel	Untere Explosionsgrenze in Luft in %	Obere Explosionsgrenze in Luft in %	MAK-Wert [DFG 2009]	
				in ml/m ³	in mg/m ³
Kohlendioxid	CO ₂	-	-	5.000	9.100
Propan	C ₃ H ₈	2,1	9,5	1.000	1.800
Butan	C ₄ H ₁₀	1,5	27	1.000	2.400
c-Pentan	C ₅ H ₁₀	1,4	9,4	1.000	3.000
n-Pentan	C ₅ H ₁₂	1,3	8,0	1.000	3.000
Ammoniak	NH ₃	16	28	20	14
Stickstoff	N ₂	-	-		
Dimethylether	(CH ₃) ₂ O	2,7	32	1.000	1.900
HFKW-152a	C ₂ H ₄ F ₂	3,8	21,5	1.000*	1.910*
HFKW-134a	CH ₂ FCF ₃	-	-	1.000	4.200

*: Interner Arbeitsplatzkonzentrationsrichtwert von DuPont® [DuPont 2002]

1.4.1 Kohlendioxid (CO₂)

Kohlendioxid entsteht vor allem bei der vollständigen Verbrennung von fossilen Brennstoffen. Es wird als komprimiertes Druckgas in Spraydosen, bei der Schaumstoffherstellung, als Feuerlöschmittel und als Kältemittel verwendet. Als Kältemittel hat es die Kurzbezeichnung R 744. Wegen seines Vorkommens in der Natur zählt es zu den natürlichen Kältemitteln.

Die Konzentration in der Luft beträgt ca. 0,037 %. Dieses CO₂ stammt aus den unterschiedlichsten Vorkommen und Prozessen. Zu nennen sind Vulkane, die Verbrennung fossiler Brennstoffe, Waldbrände, Abgase aus chemischer Produktion und Erdgas- und Erdölverarbeitung etc. [eurammon 2002].

Kohlendioxid ist ein wichtiges Treibhausgas; ein großer Teil des durch den Menschen verursachten Treibhauseffektes ist auf steigende CO₂-Emissionen bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe zurückzuführen.

Als Kälte- oder Treibmittel verwendetes CO₂ muss nicht extra hergestellt werden. Es wird aus natürlichen Quellen oder aus Prozessabgasen gewonnenes, technisches CO₂ genutzt. Dieses kann verwendet werden ohne dabei klimawirksam zu sein, da es ohnehin in die Atmosphäre gelangt wäre. Eventuelle Emissionen belasten das Klima daher nicht zusätzlich.

CO₂ ist ein nicht brennbares, nicht giftiges, geruchloses, nicht ätzendes und nicht wassergefährdendes, chemisch stabiles (quasi inertes) Gas. Das unter Druck verflüssigte Gas ist schwerer als Luft. Hautkontakt mit flüssigem oder festem CO₂ oder kalten Leitungen kann zu sogenannten Kaltverbrennungen führen [Carbo 2002]. Durch Kohlendioxid kann Luft verdrängt werden, so dass in hohen Konzentrationen Erstickungsgefahr entsteht. Lebensgefahr besteht ab einem Gehalt von 10 bis 20 % in der Atemluft [Hommel 1987: aus UBA 1989]. Kohlendioxid hat einen MAK-Wert von 5.000 ppm (oder 0,5 %) [DFG 2009].

1.4.2 Kohlenwasserstoffe

Propan / Butan

Ein Gemisch aus Propan, iso-Butan und Butan ist eines der bedeutendsten Ersatztreibgase in Spraydosen. Als Einzelstoffe werden sie auch als Kältemittel in z. B. Haushaltskältegeräten, Kühlmöbeln und Kleinkälteanlagen zur gewerblichen Nutzung eingesetzt. Sie haben dann die Kurzbezeichnung R 600a (iso-Butan) und R 290 (Propan). Auch Kohlenwasserstoffe gehören wegen ihres Vorkommens in der Natur zu den natürlichen Kältemitteln. Das GWP₁₀₀ beider Stoffe ist kleiner als fünf. Durch besondere Reinigung sind diese Kohlenwasserstoffe fast geruchlos. Sowohl die Einzelstoffe als auch ihre Gemische sind hochentzündlich (s. Tab. 1.3). Als Gase sind die Gemische nicht giftig, wirken aber in großen Mengen narkotisierend [UBA 1989]. Für Propan und Butan ist ein MAK-Wert von 1.000 ppm festgelegt [DFG 2009].

Pentan

Pentan steht als alternatives Treibmittel zur Verschäumung von Kunststoffen zur Verfügung. Das GWP₁₀₀ von Pentan ist kleiner als fünf. Es ist wie Propan/Butan ein hochentzündlicher Kohlenwasserstoff. Seine Dämpfe sind hochentzündlich; in Verbindung mit Luft entstehen explosionsfähige Gemische (s. Tab. 1.3). Diese Eigenschaft erfordert erhöhte Sicherheitsmaßnahmen bei der Verwendung dieses Gases. Eine Gesundheitsgefährdung besteht beim Einatmen der Dämpfe in hohen Konzentrationen. Es wirkt betäubend und kann Herzrhythmusstörungen auslösen. Kontakt mit der Flüssigkeit führt zur Reizung der Augen und der Haut [Hommel 1987: aus UBA 1989]. Pentan ist mit einem MAK Wert von 1.000 ppm belegt [DFG 2009].

1.4.3 Ammoniak (NH₃)

Ammoniak ist am natürlichen Stickstoffkreislauf beteiligt. In der Natur entsteht es überwiegend beim Abbau organischer, stickstoffhaltiger Materialien. Zum Beispiel beim Abbau von Eiweißen. So entstehen beim Stoffwechsel eines Menschen täglich etwa 17 mg Ammoniak, die vom Körper abgeführt werden.

Ammoniak wird seit über 100 Jahren für zahlreiche gewerbliche und industrielle Kälteanwendungen eingesetzt. Die sehr guten thermodynamischen Eigenschaften und der niedrige Preis zeichnen diesen Stoff aus [Hoechst 1988: aus UBA 1989]. Als Kältemittel hat

es die Kurzbezeichnung R 717. Ammoniak hat kein Treibhauspotenzial und gehört als Naturstoff ebenfalls zu den natürlichen Kältemitteln.

Das farblose Gas besitzt einen stechenden Geruch mit starker Reizwirkung; seine Geruchsschwelle liegt bereits bei 5 ppm. Freiwerdende Flüssigkeit bildet durch Teilverdampfung kalten Nebel (s. Tab. 1.3). Ammoniak ist entzündlich, giftig beim Einatmen und verursacht Verätzungen. Obwohl bei Ammoniak das Risiko einer Entflammung vorhanden ist, besteht diese Gefahr nur bei besonderen Randbedingungen in begrenzten Bereichen. Ammoniak selbst ist schwer brennbar; ohne Wärmezufuhr erlischt die Flamme sofort [Hommel 1987; aus UBA 1989]. In seiner Anwendung als Kältemittel gelangt Ammoniak lediglich bei nicht bestimmungsgemäßigem Betrieb in die Umgebung, wobei in der Regel nur ein (meist geringer) Teil der Füllmenge freigesetzt wird. Ammoniak ist leicht wasserlöslich sowie sehr giftig für Wasserorganismen und daher als wassergefährdend eingestuft. Wegen der Gefahr der Grundwasserverseuchung ist ein Eindringen in das Erdreich zu vermeiden.

Die Reizwirkung von Ammoniak kann bis zu schweren Verätzungen (Konzentrationen oberhalb 700 ppm) von Augen, Atemwegen und Lunge sowie der Haut führen. Ein Einatmen von hochkonzentriertem Gas (ab $3,5 \text{ g/m}^3$) kann plötzlichen Tod zur Folge haben. Kontakt mit der Flüssigkeit ruft schwere Erfrierungen hervor. Im landwirtschaftlichen Bereich führen erhöhte Ammoniak-Konzentrationen zu Pflanzenschädigungen [UBA 1989]. Ammoniak ist ein MAK-Wert von 20 ppm zugeordnet [DFG 2009].

1.4.4 Dimethylether (DME)

Nach Propan/Butan ist DME das bedeutendste alternative Treibgas in Spraydosen. In Einzelfällen wird es in Kälteanlagen als Kältemittel eingesetzt. Nach einer besonderen Reinigung ist es nahezu geruchlos. Als flüssiges Treibgas hat es ein besonderes Lösevermögen. Wegen seines Sauerstoffgehaltes hat es einen geringeren Energieinhalt als Propan oder Butan. Ferner ist DME im Gegensatz zu Propan und Butan in Wasser löslich [DuPont 1989c; aus UBA 1989] und schwach wassergefährdend. Nach den vorliegenden Informationen [Lucht 1985; aus UBA 1989] erweist sich DME bei akuter inhalativer Aufnahme in Konzentrationen, wie sie bei Spraydosen Anwendung auftreten können, als nahezu untoxisch; in hohen Konzentrationen wirkt DME narkotisch. DME ist ein hochentzündliches Gas. In der MAK-Werte-Liste von 2003 ist Dimethylether mit einem Wert von 1.000 ppm belegt [DFG 2009].

1.4.5 Stickstoff (N₂)

Stickstoff ist ein natürlicher Bestandteil der Atmosphäre (Anteil in unteren Atmosphärenschichten etwa 80 %) und wird durch Verflüssigung der Luft mit anschließender Destillation oder Druckwechseladsorption gewonnen. Stickstoff kommt sowohl als komprimiertes Druckgas in Spraydosen, als Feuerlöschmittel und als Füllgas in

Autoreifen zur Anwendung. Umweltschäden treten durch die Verwendung nicht auf. Stickstoff ist ein nicht brennbares Gas. Beim schnellen Übergang in den Gaszustand kann die Luft (insbesondere in Räumen) verdrängt werden, so dass in besonderen Fällen Erstickungsgefahr möglich ist [UBA 1989].

1.4.6 Hydrofluoralkene

Hydrofluoralkene gehören chemisch zu den teilhalogenierten Fluorkohlenwasserstoffen (HFKW). Wegen ihres niedrigen Treibhauspotentials werden sie von den Herstellern oft „Low-GWP-Kältemittel“ oder auch „Kältemittel der 4. Generation“ genannt. Zur Abgrenzung von den im Kyoto-Protokoll erfassten HFKW verwenden die Hersteller auch die Bezeichnung HFO. Ein brennbarer Stoff dieser Gruppe, der HFKW-1234yf wird derzeit vor allem für den Einsatz in Pkw Klimaanlage untersucht (s. Kap. 3.3.7), die Markteinführung steht noch aus.

Der Einsatz dieser neuen Stoffe muss sorgfältig abgewogen werden. Mit dem niedrigen Treibhauseffekt ist bei den Hydrofluoralkenen auch eine größere Instabilität und Reaktivität der Stoffe verbunden. Für den Betreiber von Kälte- und Klimaanlage sind insbesondere eine sehr gute Kälteleistung, die Sicherheit der Anlage und die Stabilität der Kältemittel, die Haltbarkeit der Anlage und nicht zuletzt die Kosten des Kältemittels von Belang. Hier besteht noch erheblicher Untersuchungs- und Entwicklungsbedarf.

Die Freisetzung von Hydrofluoralkenen durch Leckagen führt zum zusätzlichen Eintrag von persistenten Abbauprodukten in die Umwelt (s. Kap. 1.3.1). Die Herstellung der Hydrofluoralkene ist aufwendig, zudem sind große Transportwege bei der Herstellung außerhalb Europas zu berücksichtigen. Die großtechnische Herstellung von HFKW-1234yf erfolgt bisher nicht.

Für die vorgesehenen Einsatzbereiche der Hydrofluoralken gibt es heute bereits Lösungen mit natürlichen Kältemitteln.

1.4.7 Zusammenfassung

Die halogenfreien organischen Verbindungen, wie Propan, Butan, Pentan, Dimethylether etc. wurden bereits in UBA [1989] als toxikologisch günstiger bewertet als Chlorkohlenwasserstoffe. Des Weiteren wurde ausgeführt:

„Propan, Butan, Pentan und DME sind mit dem sehr hohen MAK-Wert von 1.000 ppm belegt. In industriellen Anlagen unter Beachtung des Arbeitsschutzes sind gesundheitliche Gefahren für den Arbeitnehmer nicht zu erwarten. Da diese Stoffe alle brennbar sind, werden sie in der Regel nur in geschlossenen oder gekapselten, explosionsgeschützten Anlagen gehandhabt. [...]

Zweifellos sind Kohlendioxid und Stickstoff [...] als natürliche Bestandteile der Luft aus toxikologischer Sicht in ihren möglichen Anwendungsbereichen vorrangig in Frage

kommende Ersatzstoffe. Auch Ammoniak ist bei fachgerechtem Umgang ein für die Umwelt akzeptabler Ersatzstoff in der Kältetechnik.

Eine Bewertung eines Ersatzstoffes im Hinblick auf den Einsatz in einem bestimmten Verfahren muss folgende Kriterien umfassen, wobei die Reihenfolge keine Wertung beinhaltet:

- Ozonabbaupotenzial
- Treibhauspotenzial des Stoffes
- Treibhauspotenzial des Verfahrens (Energieaufwand)
- Toxizität
- ökologische Eignung
- Arbeitssicherheit“

Vom Umweltbundesamt wurde auch eine Gewichtung vorgenommen. Fluorierte Gase blieben dabei wegen ihrer zum damaligen Zeitpunkt geringen Relevanz unberücksichtigt. Andere, damals in die Gewichtung einbezogene Stoffe haben im Zusammenhang mit diesem Bericht heute keine Bedeutung mehr. Die für diesen Bericht relevanten Stoffe wurden wie folgt gewichtet:

1. Kohlendioxid, Stickstoff,
2. Propan, Butan, Dimethylether, Pentan.

An den Bewertungskriterien und an den grundsätzlichen Aussagen hat sich bis heute keine Änderung ergeben. Eine pauschale Bewertung der Ersatzstoffe im Vergleich mit fluorierten Gasen ist nicht möglich. Wegen vielfältiger Einflussfaktoren (indirekte Treibhausgasemissionen, Arbeitssicherheit etc.) muss die Bewertung anwendungsbezogen erfolgen. Damit gilt, dass auf den Einsatz fluorierter Gase wegen ihres hohen Treibhauspotenzials und ihrer Persistenz dort verzichtet werden sollte, wo der Einsatz halogenfreier Stoffe und/oder Verfahren technisch und unter Sicherheitsaspekten möglich ist und nicht zu ökologisch nachteiligen Situationen führt.

In Einleitung, Ziel und Aufbau und Kapitel 1 verwendete Literatur

AFEAS - Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study (2007): Production and Sales of Fluorocarbons. (<http://www.afeas.org/overview.php>; 28.4.2010).

Air Liquide (2002): Sicherheitsdatenblätter. (www.airliquide.com/safety/msds/de/, www.airliquide.de/loesungen/produkte/gase/sicherheit/sicherheitsdatenblaetter.html; 28.4.2010).

Anhörung (2003): Gespräche zu fluorierten Treibhausgasen auf der Basis des Eckpunktepapiers und der hierzu im BMU eingegangenen Stellungnahmen zu den Anwendungsbereichen „stationäre Kälte- und Klimatechnik“ (28./29. Januar 2003), „mobile Kälte- und Klimatechnik (einschl. Transportisolierung)“ (30. Januar 2003),

„Verschäumung (einschließlich Montageschaum)“ (12. Februar 2003), „SF₆ in Schaltanlagen“ (13. Februar 2003), „Halbleiterindustrie“ (13. Februar 2003) und „Sprayanwendungen, Feuerlöschmittel, sonstige Anwendungen“ (14. Februar 2003). Bonn: BMU.

BReg 2010 - Bundesregierung (2010): *Berichterstattung der Bundesrepublik Deutschland gemäß Artikel 5, 7 und 8 des Kyoto-Protokolls der UN-Klimarahmenkonvention zu fluorierten Treibhausgasen an das Sekretariat der Klimarahmenkonvention im Jahr 2010 (Berichtsjahr 2008)*. (<http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm>).

Carbo - Carbo Kohlensäurewerke GmbH & Co. KG (2002): *Sicherheitsdatenblatt Kohlendioxid CO₂*. Bad Hönningen: Carbo Kohlensäurewerke GmbH & Co. KG.

ChemKlimschutzV (2008): *Verordnung zum Schutz des Klimas vor Veränderungen durch den Eintrag bestimmter fluorierte Treibhausgase (Chemikalien-Klimaschutzverordnung – ChemKlimaschutzV)*. Vom 2. Juli 2008, BGBl. I Nr. 27 S. 1139-1144.

ChemOzonschichtV (2006): *Verordnung über Stoffe, die die Ozonschicht schädigen (Chemikalien-Ozonschichtverordnung – ChemOzonSchichtV)*. Vom 13. November 2006, BGBl. I Nr. 53 S. 2638-2641.

Danish EPA - Ministry of Environment, Danish Environmental Protection Agency (2001): *Draft Statutory Order, Regulating Certain Industrial Greenhouse Gases*. April 2001, unauthorized translation.

DesMarteau, Darryl D.; Beyerlein Adolph L. (1996): *New Chemical Alternatives for the Protection of Stratospheric Ozone*. Cincinnati: United States Environmental Protection Agency).

DFG - Deutsche Forschungsgemeinschaft (2009): *List of MAK- and BAT-Values 2009*. Report No. 45, Weinheim: Wiley-VCH.

DIN (1998): *Kältemittel - Anforderungen und Kurzzeichen*. DIN 8960, Ausgabe: November 1998, Berlin: Beuth.

DuPont - DuPont de Nemours (Nederland) B.V. (2002) : Sicherheitsdatenblätter.

DuPont - DuPont de Nemours (Luxembourg) s.à r.l. (1989c): Schreiben an das Umweltbundesamt vom 16. Juni 1989. Luxemburg: DuPont.

ECCP - European Climate Change Programme (2000): *Mitteilung der Kommission an den Rat und an das Europäische Parlament: Politische Konzepte und Maßnahmen der EU zur Verringerung der Treibhausgasemissionen: Zu einem Europäischen Programm zur Klimaänderung (ECCP)*. Vom 8.3.2000, KOM (2000)88, Brüssel: KOM.

- EckpPapier - Eckpunktepapier (2002): *Umsetzung des Nationalen Klimaschutzprogramms im Bereich der Fluorierten Treibhausgase (H-FKW FKW SF₆) - F-GASE*. Vom 30. September 2002.
(www.bmu.de/de/1024/js/download/b_eckpunktepapier_f_gase/; 23.09.2003).
- EG-Verordnung (1994): *Verordnung (EG) Nr. 3093/94 des Rates vom 15. Dezember 1994 über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen*. Amtsblatt der EG, L333 S. 1.
- EG-Verordnung (2000): *Verordnung (EG) Nr. 2037/2000 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. Juni 2000 über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen*. Amtsblatt der EG, L244 S. 1-24, zuletzt geändert durch *Verordnung (EG) Nr. 1804/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. September 2003*, Amtsblatt der EG, L265 S. 1-4.
- eurammon - Initiative für natürliche Kältemittel (2002): *Kohlendioxid – CO₂ – R 744 – (Kohlensäure) Geschichte eines interessanten Stoffes*. eurammon-Information Nr. 15, Frankfurt/Main: eurammon. (www.eurammon.com; 23.6.2003).
- FCKW-Verordnung (1991): *FCKW-Halon-Verbots-Verordnung - Verordnung zum Verbot von bestimmten die Ozonschicht abbauenden Halogenkohlenwasserstoffen*. Vom 6. Mai 1991, BGBl. I S. 1090-1092, zuletzt geändert am 29. Oktober 2001, BGBl. I S. 2785.
- Frank, Hartmut; Klein, Armin; Renschen, Dirk (1996): *Environmental Trifluoroacetate*. In: *Nature*, 382, S. 34.
- Harnisch, Jochen u. a. (2003): *Risiken und Nutzen von fluorierten Treibhausgasen in Techniken und Produkten unter besonderer Berücksichtigung der stoffintrinsic Eigenschaften*. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 201 64 315, Climate Change 02/2004. Berlin, UBA.
(http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=2755).
- HFKW-FKW-SF₆-VO (2002): *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Verbote und Beschränkungen teilfluorierter und vollfluorierter Kohlenwasserstoffe sowie von Schwefelhexafluorid*. Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich, 10. Dezember 2002, Teil II, Nr. 447 S. 3883-3889.
- Hoechst - Hoechst AG (1988): Schreiben an das Umweltbundesamt vom 26.01.1988.
- Hommel, Günter (1987): *Handbuch der gefährlichen Güter*. Berlin-Heidelberg: Springer.
- IPPC - Intergovernmental Panel on Climate Change (1995): *Climate Change 1995 – The Science of Climate Change*. Contribution of Working Group I to the Second

Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

- IPCC/TEAP - Intergovernmental Panel on Climate Change & Technology and Economic Assessment Panel (2005): *Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Issues Related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons*. Cambridge University Press, UK. pp 478.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2001): IPCC, 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, figure 4.3, page 254.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, figure 2.6, page 145.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2007a): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kajihara (2010) - Hideo Kajihara; Kazuya Inoue; Kikuo Yoshida; Ryuichi Nagaosa: Estimation of environmental concentrations and deposition fluxes of R-1234-YF and its decomposition products emitted from air conditioning equipment to atmosphere 2010 International Symposium on Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Technology, 17 – 19 February 2010, Tokyo, Japan.
- Kirk-Othmar (1994): *Encyclopedia of Chemical Technology*. 4. Auflage, Volume 11, S. 500ff., New York: John Wiley & Sons.
- Klimaschutzprogramm (2000): *Nationales Klimaschutzprogramm der Bundesregierung*. Beschluss der Bundesregierung vom 18. Oktober 2000 (Fünfter Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe „CO₂-Reduktion“ (IMA CO₂)). (www.bmu.de/de/1024/js/download/b_klimaschutzprogramm2000/; 23.9.2003).

- KOM - Europäische Kommission (2006): *Verordnung (EG) Nr. 842/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über bestimmte fluorierte Treibhausgase*. ABl. EG Nr. L161/1 vom 14.6.2006.
- KOM - Europäische Kommission (2006a): *Richtlinie 2006/40/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Emissionen aus Klimaanlage in Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG des Rates*. ABl. EG Nr. L161/12 vom 14.6.2006.
- KRK - Klimarahmenkonvention (1992): *Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen*. Rio de Janeiro. (unfccc.int/resource/convkp.html#kp; 17.12.2003).
- Kyoto - Protokoll (1997): *Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen*. Vom 11. Dezember 1997, Kyoto. (www.bmu.de/de/1024/js/download/b_kioto/; 17.12.2003).
- Montrealer Protokoll (2000): *The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer as either adjusted and/or amended in London 1990, Copenhagen 1992, Vienna 1995, Montreal 1997, Beijing 1999*. Nairobi: UNEP. (www.unep.org/ozone/pdf/Montreal-Protocol2000.pdf; 23.9.2003).
- NICNAS - National Industrial Chemicals Notification and Assessment Scheme (1999): *Full Public Report on HFC 10-43mee*. Australian Department of the Environment and Department of Health and Aged Care. (www.nicnas.gov.au/publications/CAR/new/NA/NAFULLR/NA0600FR/NA626FR.pdf; 28.4.2010).
- Schwarz, Winfried, Gschrey, Barbara (2009): *Projections of global emissions of fluorinated greenhouse gases in 2050*. Report-no. (UBA-FB) 001318, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, Climate Change 17/2009. (<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3866.pdf>).
- Sicherheitsdatenblatt (2008): Material Safety Data Sheet. Honeywell, 11.10.2008.
- StoV (2003): *Verordnung über umweltgefährdende Stoffe (Stoffverordnung 2003)*. Vom 9. Juni 1986, SR 814.013, geändert mit Wirkung vom 1. Juli 2003.
- Tromp, T. K. u. a. (1995): *Potential Accumulation of a CFC-Replacement Degradation Product in Seasonal Wetlands*. In: *Nature*, 376, S. 327-330.
- UBA - Umweltbundesamt (1989): *Verzicht aus Verantwortung: Maßnahmen zur Rettung der Ozonschicht*. UBA-Berichte 7/89, Berlin: Erich-Schmidt.
- Ullmann`s (1988): *Ullmann`s Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Volume A11, S. 338ff., Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH.

- Ullmanns (1976): *Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie*. Volume 11, S. 619, Weinheim: Verlag Chemie.
- Velders, Guus J. M. et al. (2009): *The large contribution of projected HFC emissions to future climate forcing*. PNAS Early Edition, June 2009.
- Verkehrsblatt (2006): Verkehrsblatt. Amtsblatt des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung der Bundesrepublik Deutschland, Heft 17.
- WMO - World Meteorological Organization (1995): *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994*. Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 37, Geneva: WMO.

2 Emissionsentwicklung in Deutschland

Die Gesamtemissionen der fluorierten Treibhausgase haben sich in Deutschland seit 1995 mehr als verdoppelt. Die Entwicklung der Emissionen von HFKW, FKW und SF₆ verlief jedoch sehr unterschiedlich: HFKW-Emissionen sind in Deutschland seit 1995¹ stark gestiegen. Der Emissionsanstieg von FKW konnte hingegen gestoppt werden. Seit Mitte der neunziger Jahre zeigen die jährlichen FKW-Emissionen sogar eine stetige Abwärtstendenz. Die SF₆-Emissionen durchliefen im Jahr 2002 mit 4,2 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten ein Minimum, seitdem steigen sie aber wieder an.

Die hohe Klimawirksamkeit insbesondere von FKW und SF₆ hat verschiedene Hersteller und Anwender veranlasst, Maßnahmen zur Emissionsminderung zu ergreifen. Auch die kritische Diskussion in der EU und in einigen Mitgliedstaaten hat das Bewusstsein für die Klimaschädlichkeit dieser Gase gefördert.

Obwohl sich die absoluten Emissionen (in Tonnen (t)) aller fluorierten Treibhausgase zwischen 1995 und 2007 insgesamt mehr als verdoppelt haben (1995: 3250 t; 2007: 7300 t), sind die Emissionen, berechnet auf CO₂-Äquivalente, wegen des sehr viel höheren GWP von FKW und SF₆ im Vergleich zu den HFKW nur um 1,8 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente gestiegen (1995: 15,4 Mio. t CO₂-Äq.; 2007: 17,2 Mio. t CO₂-Äq.).

Wie bereits im Abschnitt *Anwendungsbereiche und Verwendung* des Kapitels 1.2 dargestellt, ist die Art der Anwendung von fluorierten Treibhausgasen für die Höhe und den Zeitpunkt der Emissionen entscheidend. Während Emission und Einsatzmenge bei offenen Anwendungen gleichzusetzen sind, kommt es in geschlossenen Anwendungen zu großen Speichermengen (Bestand). Aus diesem, jährlich steigenden Bestand emittieren die Stoffe ganz oder teilweise über die gesamte Nutzungsphase und bei der Entsorgung. Für die Berichterstattung zu fluorierten Treibhausgasen wird daher zwischen aktuellen und potenziellen Emissionen unterschieden. Soweit nicht explizit angegeben, sind Angaben zu Emissionen immer aktuelle Emissionen. Diese setzen sich aus Herstellungs-, Bestands- / Verwendungs-, Prozess- und/oder Entsorgungsemissionen zusammen. Demgegenüber entsprechen die potenziellen, also die maximal in einem Jahr möglichen Emissionen bei

¹ Im Jahr 1990 gab es noch keine gezielte Herstellung/keinen gezielten Einsatz von HFKW. Dem Jahr 1990 zuzuordnende Emissionen resultierten einzig aus dem HFCKW-22-Herstellungsprozess, bei dem der HFKW-23 als Nebenprodukt entsteht.

geschlossenen Anwendungen etwa dem durchschnittlichen Bestand eines Jahres. Bei offenen Anwendungen können aktuelle und potenzielle Emissionen eines Jahres zur Vereinfachung meist gleichgesetzt werden. Einen Sonderfall stellen u. a. Emissionen aus Schaumstoffen dar: Wegen des hier erst seit wenigen Jahren erfolgenden Einsatzes von fluorierten Treibhausgasen hat sich erst ein geringer Bestand aufgebaut. Wegen der gleichzeitig zum Teil hohen, dem Herstellungsprozess zugeordneten Emissionen (diese sind ein Teil der aktuellen Emissionen), können die aktuellen Emissionen höher sein als die potenziellen (Bestand). Weitere Sonderfälle stellen z. B. die Halbleiterindustrie (s. Kap. 8) und die Aluminiumindustrie (Emissionen entstehen hier im Verarbeitungsprozess) dar.

Für Anwendungen, in denen sich ein Bestand aufbaut und/oder aufgebaut hat, sind in den folgenden Tabellen 2.1 bis 2.6 für das Jahr 2007 ergänzend zu den aktuellen Emissionen in der jeweils letzten Spalte auch die potenziellen Emissionen (durchschnittlicher Jahresbestand) angegeben.

HFKW

Insbesondere bei den HFKW geht das Umweltbundesamt ohne die Ergreifung weiterer Maßnahmen von einem weiteren Emissionsanstieg aus. Dies hat folgende Ursache: HFKW werden vor allem als Ersatzstoffe für die international seit Anfang der neunziger Jahre einem Ausstiegsszenario unterworfenen ozonschichtschädigenden FCKW und HFCKW eingesetzt. Trotz umfangreicher Erfolge wird sich der endgültige Ausstieg aus den ozonschichtschädigenden Stoffen in Deutschland und der EU erst in den nächsten Jahren vollziehen. So ist z.B. das Inverkehrbringen von Neuware des HFCKW-Kältemittels R 22 ab dem 1. Januar 2010 verboten, in bestehenden Anlagen ist nur noch das Nachfüllen von wiederaufbereitetem R 22 erlaubt. Da viele Anlagen auf HFKW-Kältemittel umgerüstet und nur zum Teil durch HFKW-freie Anlagen ersetzt werden, ist davon auszugehen, dass die Emissionen von HFKW aus Kälteanlagen in den nächsten Jahren stark zunehmen werden, da sich der zu ersetzende Bestand an R 22 in Kälteanlagen auf ca. 130 000 Tonnen in der EU beläuft [Stahl 2009]. Obwohl FCKW und HFCKW in nahezu allen Anwendungsbereichen auch durch halogenfreie Alternativen substituiert wurden, sind die aus ihrer Verwendung resultierenden HFKW-Emissionen zwischen 1995 und 2007 etwa um den Faktor 3 gestiegen (s. Tab. 2.1); dies entspricht mehr als einer Verfünffachung in CO₂-Äquivalenten (s. Tab. 2.2).

Gerade bei den HFKW zeigt sich darüber hinaus, dass die zunehmende Verwendung dieser Stoffe zu einem schrittweisen Aufbau eines großen Bestandes führt, insbesondere in Kälte- und Klimaanlageanlagen, aber langfristig auch in Dämmstoffen. Am Beispiel der Pkw-Klimaanlagen wird dies besonders deutlich: So stieg der jährliche Neueinsatz von HFKW-134a allein zur Erstbefüllung von Pkw-Klimaanlagen für den deutschen Markt wegen der gestiegenen Klimaanlageanlagen-Ausrüstungsrate bei Pkw zwischen 1995 und 2007 von 1.450 auf 3.900 t. Im Jahr 2007 betrug der sich akkumulierende Bestand an HFKW in Pkw-

Klimaanlagen in Deutschland bereits etwa 22.400 t. Diese Menge entspricht 29 Mio. t CO₂-Äquivalenten (s. Tab. 2.1 und 2.2).

Tabelle 2.1: Entwicklung der HFKW-Emissionen in Deutschland von 1995 bis 2007 in Tonnen [BReg 2009, Schwarz 2009]

Emissionsquelle	HFKW-Emissionen in t (gerundet)						
	1995	2000	2002	2004	2006	2007	2007*
Stationäre Kälte/Klima	70	850	1.100	1.600	2.000	2.100	21.500
Davon nur Gewerbekälte	55	600	800	1.100	1.350	1.300	10.400
Mobile Kälte/Klima	170	1.200	1.600	2.100	2.700	2.900	25.300
Davon nur Pkw	130	1.000	1.400	1.800	2.300	2.500	22.400
PUR-Montageschaum	1.800	1.500	800	600	400	500	-
PUR-Schäume	0	90	100	250	170	190	2.800
XPS-Schäume	0	0	2.000	1.500	1.000	900	1.800
Dosieraerosole	0	80	200	190	205	210	-
Sonstiges	660	380	300	360	225	200	-
Insgesamt	2.700	4.100	6.100	6.600	6.700	7.000	51.400

*: potenzielle Emissionen (durchschnittlicher Jahresbestand)

Tabelle 2.2: Entwicklung der HFKW-Emissionen in Deutschland von 1995 bis 2007 in Mio. t CO₂-Äquivalenten [BReg 2009, Schwarz 2009]

Emissionsquelle	HFKW-Emissionen in Mio. t CO ₂ -Äquivalenten (gerundet)						
	1995	2000	2002	2004	2006	2007	2007*
Stationäre Kälte/Klima	0,2	2,0	2,7	3,8	4,9	5,1	51
Davon nur Gewerbekälte	0,1	1,5	2,0	2,7	3,4	3,5	28
Mobile Kälte/Klima	0,2	1,6	2,2	2,9	3,6	3,9	34
Davon nur Pkw	0,2	1,3	1,8	2,4	3,0	3,2	29
PUR-Montageschaum	1,5	1,1	0,5	0,6	0,4	0,6	-
PUR-Schäume	0	0,1	0,1	0,25	0,2	0,2	3,1
XPS-Schäume	0	0	0,9	0,7	0,6	0,6	
Dosieraerosole	0	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	-
Sonstiges	4,6	1,5	2,1	0,9	0,6	0,5	-
Insgesamt	6,5	6,5	8,8	9,4	10,6	11,2	

*: potenzielle Emissionen (durchschnittlicher Jahresbestand)

FKW

FKW-Emissionen resultieren nur teilweise aus ihrer gezielten Verwendung. Die größte Quelle für FKW-Emissionen ist seit 1990, trotz erheblicher Reduktionen, weiterhin die Produktion von Primäraluminium mit knapp 40 %. Wie aus Tabelle 2.3 und Tabelle 2.4 ersichtlich ist, sanken die FKW-Emissionen seit 1990 insgesamt um etwa 80 %, sowohl in Tonnen als auch in CO₂-Äquivalenten. Dies ist auf umfangreiche Modernisierungsmaßnahmen vor allem bei der Aluminiumproduktion zurückzuführen, die dazu führten, dass die spezifischen FKW-Emissionen pro produzierter Tonne Aluminium drastisch gesenkt werden konnten [BReg 2009].

Tabelle 2.3: Entwicklung der FKW Emissionen in Deutschland von 1990 bis 2007 in Tonnen [BReg 2009, Schwarz 2009]

Emissionsquelle	FKW-Emissionen in t (gerundet)							
	1990	1995	2000	2002	2004	2006	2007	2007*
Aluminiumproduktion	350	230	53	64	66	28	29	-
Halbleiterherstellung	15	23	43	33	33	31	24	-
Leiterplattenfertigung	3	2	2	2	2	2	2	-
Kältetechnik	0	1	11	13	15	18	17	73
Insgesamt	368	256	109	112	116	79	74	73

*: potenzielle Emissionen (durchschnittlicher Jahresbestand)

Tabelle 2.4: Entwicklung der FKW Emissionen in Deutschland von 1990 bis 2007 in Mio. t CO₂-Äquivalenten [BReg 2009, Schwarz 2009]

Emissionsquelle	FKW-Emissionen in Mio. t CO ₂ -Äquivalenten (gerundet)							
	1990	1995	2000	2002	2004	2006	2007	2007*
Aluminiumproduktion	2,3	1,6	0,36	0,43	0,45	0,19	0,19	-
Halbleiterherstellung	0,12	0,18	0,33	0,3	0,25	0,24	0,18	-
Leiterplattenfertigung	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-
Kältetechnik	0	0,01	0,08	0,10	0,11	0,13	0,125	0,6
Insgesamt	2,5	1,8	0,8	0,85	0,8	0,6	0,5	0,6

*: potenzielle Emissionen (durchschnittlicher Jahresbestand)

SF_6

SF_6 wird in einer Vielzahl von Anwendungen, zum Teil in sehr geringem Umfang eingesetzt. Die Entwicklung der SF_6 -Emissionen ist in Tabelle 2.5 und Tabelle 2.6 dargestellt. Gegenwärtig stellen Emissionen aus Aluminiumgießereien und der Entsorgung von Schallschutzfenstern die größten Emissionsquellen von SF_6 in Deutschland dar. Durch einen drastischen Rückgang des Einsatzes von SF_6 in Schallschutzfenstern und Autoreifen konnte der starke Emissionsanstieg seit 1990 zunächst gestoppt und zwischenzeitlich umgekehrt werden. Insgesamt sanken die SF_6 -Emissionen zwischen 1995 und 2002 um 40 %. Seit dem Jahr 2002 steigen die SF_6 -Emissionen jedoch wieder und werden vor allem wegen der offenen Entsorgung alter Fensterscheiben, etwa 25 Jahre nach deren Befüllung, voraussichtlich noch bis zum Jahr 2020 weiter ansteigen. Zudem wird SF_6 seit 2007 in größerem Maßstab im Produktionsprozeß von Silizium-Dünnschicht-Solarzellen zur Reinigung der Reaktionskammern eingesetzt. Demzufolge stiegen die SF_6 -Emissionen im Bereich Solartechnik im Jahr 2007 sprunghaft an [BReg 2009].

Tabelle 2.5: Entwicklung der SF_6 -Emissionen in Deutschland von 1990 bis 2007 in Tonnen [BReg 2009, Schwarz 2009]

Emissionsquelle	SF ₆ -Emissionen in t (gerundet)							
	1990	1995	2000	2002	2004	2006	2007	2007*
Alu-Guss/Spurengas	1	1	14,5	35,5	46	85,5	84	-
Schallschutzscheiben	69	108	52	46	54	61	67	1.950
Solartechnik/Opt. Fasern	0	0	0	0,4	1,5	4,7	20,3	-
Elektr. Schaltanlagen	23	27,3	16,9	15,7	16,3	14,4	15,8	1770
Magnesiumgießereien	7,4	7,7	13,4	16,1	24,9	24,1	15,2	-
T&D-Bauteile	k.A.	16,7	26,6	23,3	16,0	12,4	9,9	k.A.
Teilchenbeschleuniger	5,2	4,5	5,0	4,9	4,9	4,9	4,9	74
Autoreifen	65	110	50	9	4	2,5	2	6
Halbleiterproduktion	3,7	2	2,4	2,4	3,4	1,3	1,2	-
Sonstiges	11	26	32	24	21	20	13	k.A.
Insgesamt	200	300	210	180	190	230	230	-

*: potenzielle Emissionen (durchschnittlicher Jahresbestand)

Tabelle 2.6: Entwicklung der SF₆-Emissionen in Deutschland von 1990 bis 2007 in Mio. t CO₂-Äquivalenten [BReg 2009, Schwarz 2009]

Emissionsquelle	SF ₆ -Emissionen in Mio. t CO ₂ -Äquivalenten (gerundet)							
	1990	1995	2000	2002	2004	2006	2007	2007*
Alu-Guss/Spurengas	0,02	0,02	0,35	0,85	1,10	2,04	2,00	-
Schallschuttscheiben	1,65	2,58	1,24	1,10	1,29	1,46	1,60	47
Solartechnik/Opt. Fasern	0	0	0	0,01	0,04	0,11	0,49	-
Elektr. Schaltanlagen	0,55	0,65	0,40	0,38	0,39	0,34	0,38	42
Magnesiumgießereien	0,18	0,18	0,32	0,38	0,60	0,58	0,36	-
T&D-Bauteile	k.A.	0,4	0,64	0,56	0,38	0,30	0,24	k.A.
Teilchenbeschleuniger	0,12	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	1,8
Autoreifen	1,55	2,63	1,20	0,22	0,96	0,06	0,05	0,14
Halbleiterproduktion	0,09	0,05	0,06	0,06	0,08	0,03	0,03	-
Sonstiges	0,26	0,62	0,76	0,57	0,50	0,48	0,31	k.A.
Insgesamt	4,8	7,2	5,0	4,3	4,5	5,5	5,5	-

*: potenzielle Emissionen (durchschnittlicher Jahresbestand)

Im Auftrag des UBA erstellte Projektionen zu den Emissionen von **HFKW, FKW und SF₆** für Deutschland bis zum Jahr 2050 zeigen, dass bereits beschlossene und in Kraft getretene Maßnahmen zur Verringerung der F-Gas-Emissionen einen erheblichen Einfluß auf die künftige Emissionsentwicklung nehmen werden. Bei einer vollständigen Umsetzung der *Verordnung (EG) Nr 842/2006*, der *Richtlinie 2006/40/EG* und der nationalen *Chemikalien-Klimaschutzverordnung* mit der Einhaltung der darin vorgeschriebenen maximalen Leckageraten („Mit Maßnahmen Szenario“, Variante a) ist bis 2030 ein Absinken der Emissionen fluorierter Treibhausgase auf 7,9 Mio. Tonnen CO₂ Äquivalente prognostiziert. Ab 2030 ist trotz der beschlossenen Maßnahmen wieder mit steigenden Emissionen auf 9 Mio. Tonnen CO₂ Äquivalente im Jahr 2050 zu rechnen [Schwarz, Gschrey 2010].

Die **HFKW**-Emissionen sinken nach den Annahmen eines „Mit-Maßnahmen-Szenario, Variante a²“ zwischen 2007 und 2030 um etwa 45 % auf 6,2 Mio. t CO₂-Äquivalente. Nach

² Das „Mit-Maßnahmen-Szenario“, Variante a, des Umweltbundesamtes berücksichtigt die Umsetzung aller bis zum Jahr 2009 beschlossenen gesetzlichen Regelungen (*Verordnung (EG) Nr 842/2006*, *Richtlinie 2006/40/EG* und nationale *Chemikalien-Klimaschutzverordnung*).

2030 steigen die HFKW-Emissionen in diesem Szenario jedoch wieder auf 7,4 Mio. t CO₂-Äquivalente im Jahr 2050 an. Zum Vergleich: Ohne die seit 1998 ergriffenen Maßnahmen würden im Jahr 2050 nach aktuellen Schätzungen knapp 17 Mio. t CO₂-Äquivalente verbrauchsbedingte HFKW-Emissionen emittieren. Andererseits könnten durch die Ergreifung weiterer Maßnahmen nochmals Emissionen vermieden werden. In einem „Mit-weiteren-Maßnahmen-Szenario“ werden jene Maßnahmen berücksichtigt, die noch nicht politisch umgesetzt, aber schon heute technisch möglich sind. Dazu gehören u.a. die Substitution von HFKW durch Kältemittel mit einem GWP < 150 in allen Fahrzeugtypen, der ausschließliche Einsatz natürlicher Kältemittel in der stationären Kälte- und Klimatechnik und der Verzicht auf die Verwendung von HFKW bei der Herstellung von PUR- und XPS-Schäumen. Im Vergleich zum „Mit-Maßnahmen-Szenario“ könnten mit diesen weiteren Maßnahmen im Jahr 2030 bereits etwa 5,7 Mio. t CO₂-Äquivalente, im Jahr 2050 etwa 7,2 Mio. t CO₂-Äquivalente eingespart werden [Schwarz, Gschrey 2010].

Im für SF₆ erstellten „Mit-Maßnahmen-Szenario, Variante a“ sinken die SF₆-Emissionen bis 2030 auf 4,2 Mio. t CO₂-Äquivalente, bis 2050 sogar auf 0,8 Mio. t CO₂-Äquivalente. Dieser starke Emissionsrückgang hat u.a. folgende Gründe: seit 2008 ist der Einsatz von SF₆ in großen Magnesium-Druckguss-Produktionsstätten (jährlich verwendete Menge an SF₆ > 850 kg) verboten. Außerdem entfallen etwa ab 2035 Emissionen aus Schallschutzscheiben, da ab Juli 2008 keine mit F-Gasen befüllte Fenster in der EU in den Verkehr gebracht werden dürfen. Der prognostizierte Rückgang der SF₆-Emissionen im Bereich Solartechnik ist darauf zurückzuführen, dass in ab 2008 errichteten Produktionsstätten in Deutschland NF₃, ein bisher noch nicht berichtspflichtiges Gas mit einem hohen GWP, zur Kammerreinigung eingesetzt wird [Schwarz, Gschrey 2010].

Ohne die oben beschriebenen gesetzlichen Regelungen wäre auch in Deutschland in den nächsten Jahrzehnten mit einem weiteren Anstieg der F-Gas-Emissionen auf insgesamt knapp 20 Mio. Tonnen CO₂ Äquivalente im Jahr 2050 zu rechnen (Business-as-usual-Szenario). Der Anteil der fluorierten Treibhausgase an den Gesamtemissionen würde, ähnlich wie in den globalen Prognosen (s. Kapitel 1) beschrieben, auch in Deutschland stark ansteigen.

In Kapitel 2 verwendete Literatur

Stahl, Manfred (2009): *So wird die R22-Bombe entschärft*. In: CCI, 43 (3) 29-30, Karlsruhe: Promotor GmbH.

BReg - Bundesregierung (2009): *Berichterstattung der Bundesrepublik Deutschland gemäß Artikel 5, 7 und 8 des Kyoto-Protokolls der UN-Klimarahmenkonvention zu fluorierten Treibhausgasen an das Sekretariat der Klimarahmenkonvention im Jahr 2009*. (<http://unfccc.int/program/mis/ghg/submis2003.html>; April 2009).

- Schwarz, Winfried (2003): *Emissionen und Emissionsprognose von H-FKW, FKW und SF₆ in Deutschland. Aktueller Stand und Entwicklung eines Systems zur jährlichen Ermittlung. Emissionsdaten bis zum Jahr 2001 und Emissionsprognosen für die Jahre 2005, 2010 und 2020*. 1. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben, erstellt im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 202 41 356, Berlin: UBA. (www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/treibhausgase.htm; 30.12.03).
- Schwarz, Winfried (2009): *Emissionen fluorierte Treibhausgase in Deutschland 2006 und 2007 – Inventarermittlung 2006/2007 (F-Gase). Daten von HFKW, FKW und SF₆ für die nationale Berichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für die Berichtsjahre 2006 und 2007 sowie Prüfung der Datenermittlung über externe Datenbanken*. Förderkennzeichen 3707 42 300, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt Texte Nr. 22/2009. (http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3833).
- Schwarz, Winfried, Gschrey, Barbara (2009): *Projections of global emissions of fluorinated greenhouse gases in 2050*. Report-no. (UBA-FB) 001318, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, Climate Change 17/2009. (<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3866.pdf>).
- Schwarz, Winfried, Gschrey, Barbara (2010): *Erstellung von Projektionen zu den Emissionen von HFKW, FKW und SF₆ für Deutschland bis zum Jahr 2050*. Förderkennzeichen 3708 42 311, Dessau-Roßlau: UBA. (<http://www.umweltbundesamt.de/produkte/fckw/emissionen.htm>).

Teil B Anwendungsbereiche und –verfahren: Verwendung, Emissionen und Alternativen

3 HFKW- und FKW als Kältemittel in Kälte- und Klimaanlagen

3.1 *Überblick über mögliche Arten der Kälteerzeugung*

An dieser Stelle kann nur ein sehr allgemeiner Überblick gegeben werden. Für nähere Informationen wird auf entsprechende Fachliteratur verwiesen. Ein detaillierter Überblick ist z. B. in Cube u. a. 1997 oder Jungnickel u. a. 1990 zu finden.

Grundsätzlich kann zwischen Kälteerzeugungssystemen mit mechanischem und mit thermischem Antrieb unterschieden werden.

3.1.1 Kälteerzeugungssysteme mit mechanischem Antrieb

Kälteerzeugungssysteme mit mechanischem Antrieb sind Kompressions-Kaltdampf-Kältemaschinen (Verdichter-Kältemaschinen). Diese Anlagen werden nahezu im gesamten Anwendungsspektrum der Kälte- und Klimatechnik eingesetzt. Die genaue Ausführung, vor allem die Verdichterbauart, hängt insbesondere von der geforderten Leistung ab. Die Anlagen sind mit einem Kältemittel gefüllt, welches die verschiedenen Komponenten des Systems (Verdichter, Verflüssiger, Expansionsventil, Verdampfer) durchläuft und dabei seinen Aggregatzustand ändert: Zunächst wird das Kältemittel durch den Verdichter (Kompressor) unter Zuführung von Arbeit (W) vom Verdampfungsdruck auf Verflüssigerdruck verdichtet. Anschließend wird das Kältemittel unter Abgabe des Wärmestromes $\dot{Q}$ im Verflüssiger (Kondensor) verflüssigt. Es folgt die Entspannung des Kältemittels vom Verflüssigungsdruck auf den Verdampfungsdruck und die Verdampfung des Kältemittels unter Aufnahme des Wärmestromes. Der Kältemittelkreislauf ist in Abbildung 3.1 schematisch dargestellt.

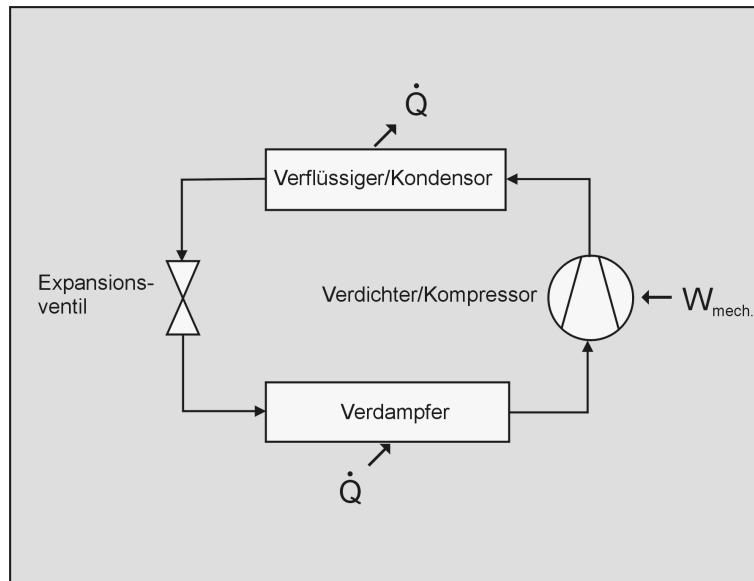


Abbildung 3.1: Schema des Kältemittelkreislaufs einer Kompressions-Kaltdampf-Kältemaschine. Nach: [Grage, Pareidt 2000].

Das Bewertungsmaß für den ablaufenden Kreisprozess ist vereinfacht das Verhältnis von Aufwand (Arbeit/Antriebsleistung) und Nutzen (Kälteleistung): die Leistungszahl (Coefficient of performance (COP)).

Je nach Verdichter wird zwischen Hubkolben-, Schrauben-, Scroll- und Turboverdichter-Kältemaschinen unterschieden. Sie können als offene, halbhermetische (halboffene) oder als hermetische Verdichter ausgeführt werden [Grage, Pareidt 2000]. Während das Gehäuse eines hermetischen Verdichters verschweißt ist, haben halbhermetische Verdichter abnehmbare Montageklappen. Durch letztere sind Reparaturen am Verdichter möglich. Beide Bauarten haben weder Welle noch Wellenabdichtung nach außen. Beim offenen Verdichter wird die Antriebswelle hingegen durch das Gehäuse geführt (DIN EN 378 [DIN 2008]). Nur hermetische Verdichter werden wegen ihres verschweißten Gehäuses als „dauerhaft geschlossen“ bezeichnet. Sie zeichnen sich im Gegensatz zu den halbhermetischen und offenen Verdichtern durch sehr geringe Kältemittelverluste während ihrer Nutzung aus. Für die Kältemittelverluste einer gesamten Anlage - vor allem bei größeren Direktverdampfungsanlagen - sind aber meist andere Komponenten/Verbindungsstellen (Kältemittelleitung, Kälteabnahmestellen etc.) von größerer Bedeutung (siehe Harnisch u. a. 2008).

Beim Hubkolbenverdichter erfolgt die Verdichtung und Förderung durch hin- und hergehende Kolben, die in abgeschlossenen Zylindern arbeiten. Diese werden durch Ventile abwechselnd mit der Saug- und Druckleitung des Verdichters verbunden. Es kann wiederum zwischen hermetischen (vollverschweißtes Gehäuse, für kleine Kälteleistungen) und

halbhermetischen (für mittlere Kälteleistungen) Motorverdichtern sowie offenen Verdichtern (große Kälteleistungen) unterschieden werden. Hubkolbenverdichter werden für ein breites Anwendungsspektrum eingesetzt. Sie eignen sich auch für den Teillastbetrieb.

Schraubenverdichter arbeiten mit rein rotierenden Bewegungen. Sie zeichnen sich durch ein Minimum an bewegten Teilen, Robustheit, Kompaktheit, hohe Zuverlässigkeit (geringe Wartungsintervalle) und eine lange Lebensdauer aus. Der Schraubenverdichter saugt das zu komprimierende Gas in den Arbeitsraum, welcher zur Verdichtung des Gases anschließend geschlossen und verkleinert wird (Verdrängerprinzip).

Scrollverdichter sind in der Konstruktion sehr einfach. Die Art der Verdichtung (ebenfalls Verdrängerprinzip) bewirkt, dass die vom Verdichter induzierte Geräuschentwicklung sehr gering ist. Die Anwendungsgebiete liegen vor allem in der Klimatisierung. Es können hohe Kälteleistungszahlen erreicht werden [Grage, Pareidt 2000].

Beim Turboverdichter (Kreiselverdichter) handelt es sich nicht um eine Verdränger-, sondern um eine Strömungsmaschine. Turbokältesätze (Flüssigkeitskühlsätze, Kaltwassersätze mit Turboverdichtern) werden für einen großen Leistungsbereich als kompakte Aggregate gefertigt und vorwiegend in der Klimatechnik (Gebäudeklimatisierung) und für Prozessanlagen mit Kaltwasser- oder Soleumlauf eingesetzt [FKW 1998a]. Oft werden sie dort eingesetzt, wo große Kälteleistungen bei häufigem Teillastbetrieb erforderlich sind, da sie im Vergleich zu Schraubenverdichtern bei Teillast energetisch günstiger betrieben werden können [Axima 2003b]. Weitere Vorteile von Turboverdichtern gegenüber Kolbenverdichtern (in hohen Leistungsbereichen) sind geringere Abmessungen und der vereinfachte Aufbau. Diese Aspekte führen zu einem verringerten Platzbedarf und einer geringeren Störanfälligkeit (erleichterte Wartung). Bei großen Fördermengen ist der Wirkungsgrad gegenüber Kolbenverdichter-Maschinen nicht schlechter [FKW 1998a].

Turboverdichter arbeiten wie Kreiselradpumpen nach dem dynamischen Prinzip. D. h., sie erzeugen den statischen Druck durch Umwandlung von kinetischer Energie in statische Druckenergie. Als energieübertragendes Element besitzen sie Laufräder, die mit hoher Drehzahl rotieren. Je nach Laufradform unterscheidet man Radialverdichter und Axialverdichter. Turboverdichter mit Radiallaufrad sind für mittlere Gasförderströme geeignet. Sie liefern einen gleichmäßigen, ölfreien Druckgasstrom. Werden mehrere Laufräder auf einer Antriebswelle hintereinander angeordnet, können auch mittlere und sehr hohe Drücke erzeugt werden. Turboverdichter mit Axiallaufrädern liefern größte Volumenströme von bis zu $1.000.000 \text{ m}^3/\text{h}$. Sie werden z. B. in der Chemieindustrie in Erdgasverflüssigungsanlagen eingesetzt [Grage, Pareidt 2000].

3.1.2 Kältemaschinen mit thermischem Antrieb

Kältemaschinen mit thermischem Antrieb werden mit einem „Heizwärmestrom“ als Antriebsenergie versorgt. Vorteilhaft ist, dass dieser Heizwärmestrom aus wirtschaftlich sonst wenig nutzbarer thermischer Energie (Abwärme, Abdampf, Heißwasser, Sonnenenergie) entnommen werden kann. Die energetische Bewertung von Kältemaschinen mit thermischem Antrieb wird mit Hilfe des Wärmeverhältnisses (als „Wirkungsgrad“ von Kältemaschinen mit thermischem Antrieb) vorgenommen. Der apparative Aufwand ist, vor allem bei Absorptionskältemaschinen, im Vergleich zu Kältemaschinen mit mechanischem Antrieb größer. Dafür haben Absorptionskältemaschinen praktisch keine beweglichen Komponenten. Der Verschleiß ist daher gering und die Lebensdauer bei geringem Wartungsaufwand hoch.

Man unterscheidet zwischen Absorptions-, Adsorptions- und Dampfstrahlkältemaschinen.

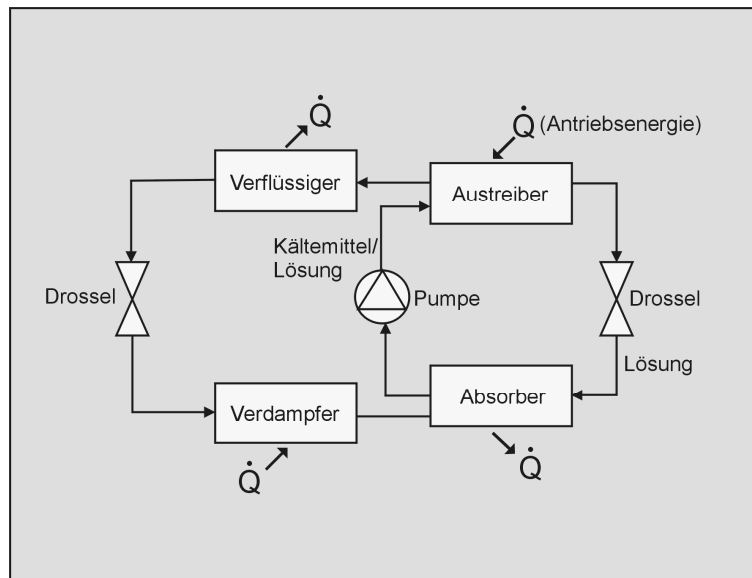


Abbildung 3.2: Schema des Kältemittelkreislaufs einer Absorptionskältemaschine.
Nach: [Grage, Pareidt 2000].

Die Nutzung einer Absorptionskältemaschine ist die bekannte und am meisten verbreitete Art der thermischen Kälteerzeugung. Flüssigkeiten / Gase werden hier bei niedriger Temperatur und bei geringem Druck aufgenommen und bei hoher Temperatur und hohem Druck wieder abgegeben. Absorptionskältemaschinen haben keinen mechanischen, sondern einen thermisch wirkenden Verdichter. Der in Abbildung 3.2 skizzierte Kältemittelkreislauf ist bis auf den Verdichter - hier bestehend aus einem Absorber, einer Pumpe (für die Flüssigkeit (Lösung)), dem Austreiber und dem Drosselventil - identisch mit dem der mechanischen Kälteerzeugung.

Der thermische Verdichter arbeitet so, dass das verdampfte Kältemittel zunächst in den Absorber gelangt und hier durch die Flüssigkeit (Lösung) aufgenommen wird. Die dabei entstehende Lösungswärme muss aus dem Absorber abgeführt werden. Die mit Kältemittel angereicherte Flüssigkeit (Lösung) wird durch eine Lösungspumpe auf ein höheres Druckniveau gepumpt. Im Austreiber wird das Kältemittel anschließend unter Zuführung von Wärme aus der Flüssigkeit (Lösung) ausgetrieben (ausgekocht). Der ausgetriebene Kältemitteldampf kommt zum Verflüssiger; es folgt der Kältemittelkreislauf bis zum Verdampfer. Die vom Kältemittel befreite Lösung gelangt über das Drosselventil zurück in den Absorber.

Als Arbeitsstoffe werden Wasser / Lithiumbromid (Klimatechnik, Kaltwassererzeugung) oder Ammoniak / Wasser eingesetzt [Grage, Pareidt 2000].

Des Weiteren werden zur Kälteerzeugung Adsorptionskältemaschinen mit festen Sorptionsmaterialien eingesetzt. Abbildung 3.3 zeigt das Schema dieser thermisch angetriebenen Kältemaschine.

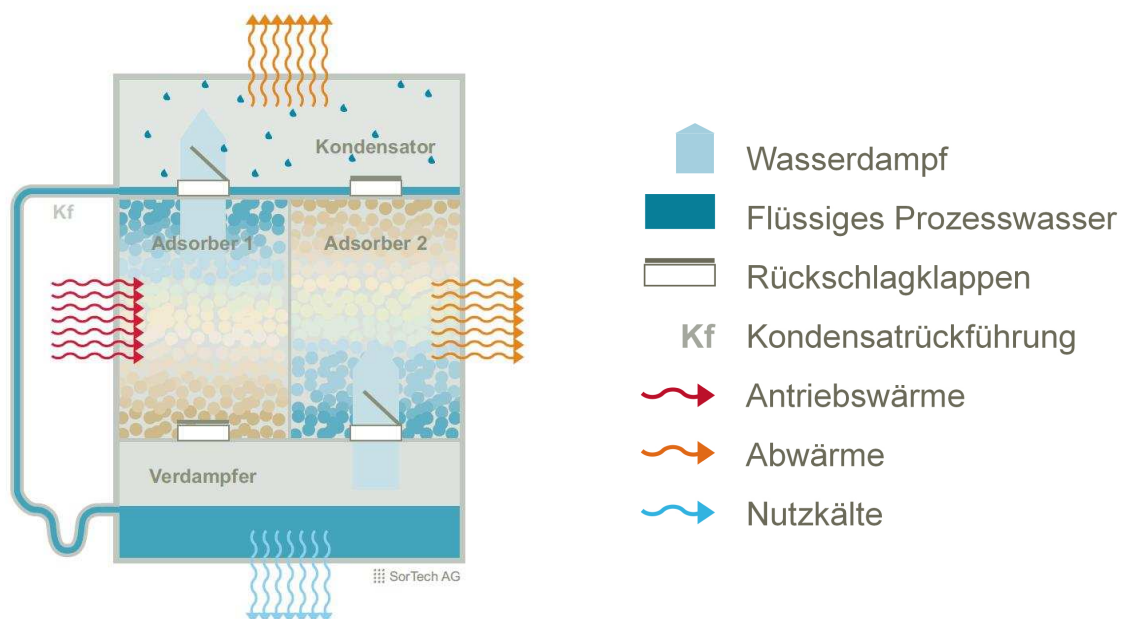


Abbildung 3.3: Schema des Kältemittelkreislaufs einer Adsorptionskältemaschinen.
Nach: [SorTech AG 2009].

Als Sorptionsmittel wird z. B. Silicagel und als Kältemittel Wasser eingesetzt. Der Prozess ist diskontinuierlich und läuft in zwei Perioden ab. Das Kältemittel (Dampf) wird am Sorptionsmittel unter Freisetzung von Bindungswärme an der Oberfläche adsorbiert. Die Bindungswärme sinkt bei steigender Anlagerung gegen Null. Durch das Verdampfen des Kältemittels wird der Umgebung Verdampfungswärme entzogen. Die Desorption (2. Periode) und die Druckerzeugung für die Kondensation erfolgt bereits bei niedrigen

Antriebstemperaturen, so dass diese Technologie besonders für den Einsatz von Solarenergie geeignet ist [Jacob 2002]. Durch den Betrieb mehrerer, zeitlich versetzt laufender Einheiten ist eine quasi-kontinuierliche Kälteerzeugung möglich [Hesse u. a. 1992]. Ein kontinuierlicher Betrieb lässt sich auch durch die Verwendung von Flüssigsorptionssystemen ermöglichen. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens ist die Pufferwirkung des Adsorbens. Steht gerade keine Solarwärme (Wolken, Schwüle) bei gleichzeitigem kontinuierlichem Kältebedarf zur Verfügung, kann die „verbrauchte“ Lösung zur späteren Regeneration zwischengespeichert werden.

Weitere Verfahren zur Erzeugung von Kälte sind die Dampfstrahlkältemaschine und das DEC-Verfahren (Desiccative and Evaporative Cooling). Der Aufbau der Dampfstrahlkältemaschine ist identisch mit dem Aufbau einer Verdichterkältemaschine. Nur der mechanische Verdichter ist durch einen Dampfstrahlapparat ersetzt. Beide Verfahren werden hier nicht näher beschrieben.

3.2 *Verwendung und Emissionen*

In Kälte- und Klimaanlageanlagen werden HFKW und zu einem geringen Teil FKW als Ersatz für die inzwischen verbotenen FCKW und HFCKW eingesetzt. In einigen Bereichen hat der Einsatz fluorierter Treibhausgase einen schnellen Ausstieg aus den ozonschichtschädigenden Stoffen ermöglicht.

Heute ist die Verwendung fluorierter Treibhausgase als Kältemittel in der stationären und mobilen Kühlung mit etwa 8,7 Mio. t CO₂-Äquivalenten (5.000 t) die Hauptquelle (78 %) der HFKW-Emissionen in Deutschland. Im Jahr 2007 entfielen 37 % dieser Kältemittlemissionen auf Klimaanlageanlagen von Pkw, aus denen etwa 3,2 Mio. t CO₂-Äquivalente (2.500 t) emittierten. 40 % der Kältemittlemissionen wurden durch gewerbliche Kälteanlagen verursacht, die im Jahr 2007 knapp 3,5 Mio. t CO₂-Äquivalente (1.325 t) HFKW emittierten.

Abbildung 3.4 zeigt die Aufteilung der HFKW-Emissionen im Jahr 2007 auf die verschiedenen Anwendungsbereiche in der Kälte- und Klimatechnik in Deutschland (rote Säulen). Insgesamt emittierten knapp 5.000 t HFKW und 17 t FKW aus Kälte- und Klimaanlageanlagen. Mit etwa 2.800 t hatten mobile Klimaanlageanlagen, und hier vor allem Pkw-Klimaanlagen, mengenmäßig den größten Anteil (55 %) an den HFKW-Emissionen. 27 % (etwa 1.300 t) der Emissionen stammten aus dem Bereich der Gewerbekälte, 10 % (knapp 500 t) aus der Industriekälte, 6 % (etwa 280 t) aus stationären Klimaanlageanlagen und 3 % (134 t) aus der Transportkälte. Neben den Emissionen zeigt Abbildung 3.4 die zur Herstellung von Kälte- und Klimaprodukten für den deutschen Markt verwendete HFKW-Menge im Jahr 2007 (blaue Säulen). Auch hier war der Anteil mobiler Klimaanlageanlagen mit rund 4.400 t am größten, gefolgt von der Gewerbekälte (1.000 t), der Industriekälte (500 t), der stationären Klimatisierung (300 t) und der Transportkälte (46 t). Die gesamte für die Herstellung

verwendete Menge (6.300 t) entspricht dem HFKW-Neuzugang im Jahr 2007. Der jährliche Bestandszuwachs berechnet sich aus diesem HFKW-Neuzugang abzüglich der HFKW-Menge aus den Außerbetriebnahmen von HFKW-Anlagen und –geräten, die anschließend entsorgt oder exportiert werden. Für den gesamten HFKW-Bestand in Kälte- und Klimaanlage in Deutschland ergibt sich damit für das Jahr 2007 ein Wert von etwa 47.000 t [BReg 2009].

In stationären Kälte- und Klimaanlage werden ebenso wie in der mobilen Kälte neben dem HFKW-134a als Einzelstoff vor allem HFKW-haltige Gemische wie R 404A eingesetzt.

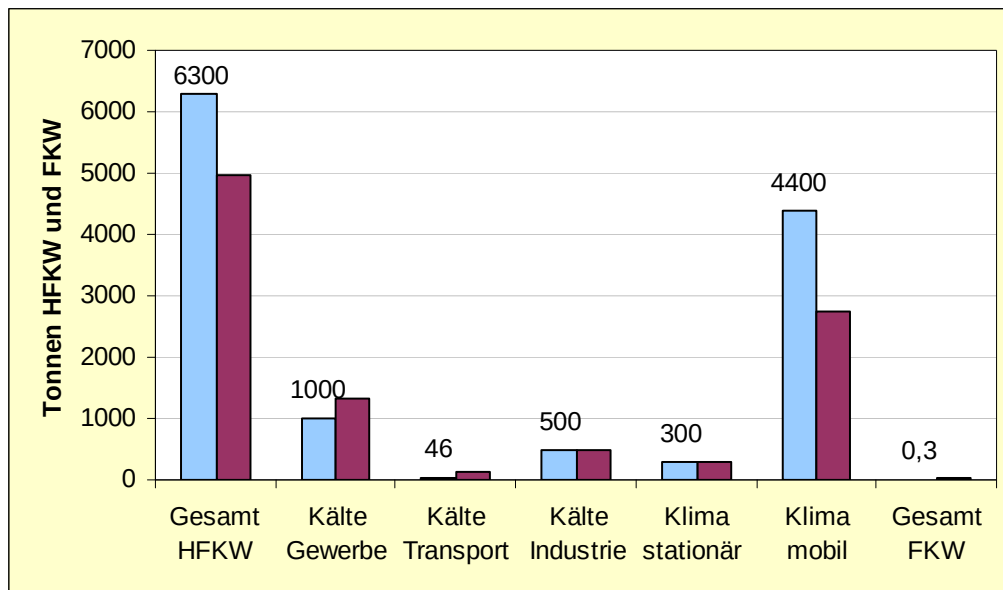


Abbildung 3.4: HFKW-Neuzugang (blaue Säulen) und HFKW-Emissionen (rote Säulen) in der Anwendung Kälte/Klima im Jahr 2007 in Deutschland in Tonnen (gerundet). Daten aus: [BReg 2009].

Wie in Kapitel 2 bereits allgemeingültig dargestellt, resultieren HFKW-Emissionen aus der Herstellung, der Gebrauchsphase (Nutzung) und der Entsorgung kältetechnischer Anlagen und Produkte. Herstellungsbedingte Emissionen sind von untergeordneter Bedeutung. Entsorgungsemissionen sind seit 2002 in den Emissionsdaten für Deutschland enthalten und haben seitdem einen zunehmend stärkeren Einfluss auf die Gesamtemissionen der Kälte- und Klimatechnik. Es werden jedoch nicht alle HFKW-haltigen Produkte in Deutschland entsorgt, viele Altgeräte werden nach Gebrauch ins Ausland exportiert. Zu den typischerweise exportierten Produkten zählen z. B. Kühlschränke, Lkw-Auflieger, Reiseomnibusse und Pkw. Die bei der Verschrottung in den Empfängerländern entstehenden Emissionen sind gemäß den internationalen Festlegungen zur Klimaberichterstattung nicht Bestandteil der bundesdeutschen Emissionsbilanz. Dies ist von Bedeutung, wenn man berücksichtigt, dass beispielsweise die Exportquote für Pkw die in Deutschland abgemeldet wurden, im Jahr 2006 bei über 80 % lag [Daten zur Umwelt 2008].

Aktuelle Emissionsprognosen zeigen, dass in Zukunft insbesondere im Bereich der stationären Klimaanlage mit einem starken Anstieg der HFKW-Emissionen zu rechnen ist. Bereits beschlossene Maßnahmen zur Verringerung von F-Gas-Emissionen gemäß der deutschen und europäischen Gesetzgebung führen u.a. dazu, dass die Emissionen aus Pkw-Klimaanlagen, die zunächst bis 2020 noch ansteigen, im Jahr 2050 nur noch wenig zu den HFKW-Gesamtemissionen beitragen. Der Beitrag der Klimaanlagen in anderen mobilen Anwendungen (Lkw, Busse, Schienenfahrzeuge, Schiffe) bleibt aber konstant hoch [Schwarz, Gschrey 2010]. Die für 2050 prognostizierten Emissionen aus der Gewerbekälte halbieren sich im Vergleich zu 2007, vor allem, da im „Mit Maßnahmen Szenario“ von der Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen spezifischen Kältemittelverlusten ausgegangen wird. Abbildung 3.5 zeigt eine Prognose („Mit Maßnahmen Szenario“, Variante a, s. Kap. 2) für das Jahr 2050 zur Höhe und Aufteilung der HFKW-Emissionen in der Anwendung Kälte/Klima.

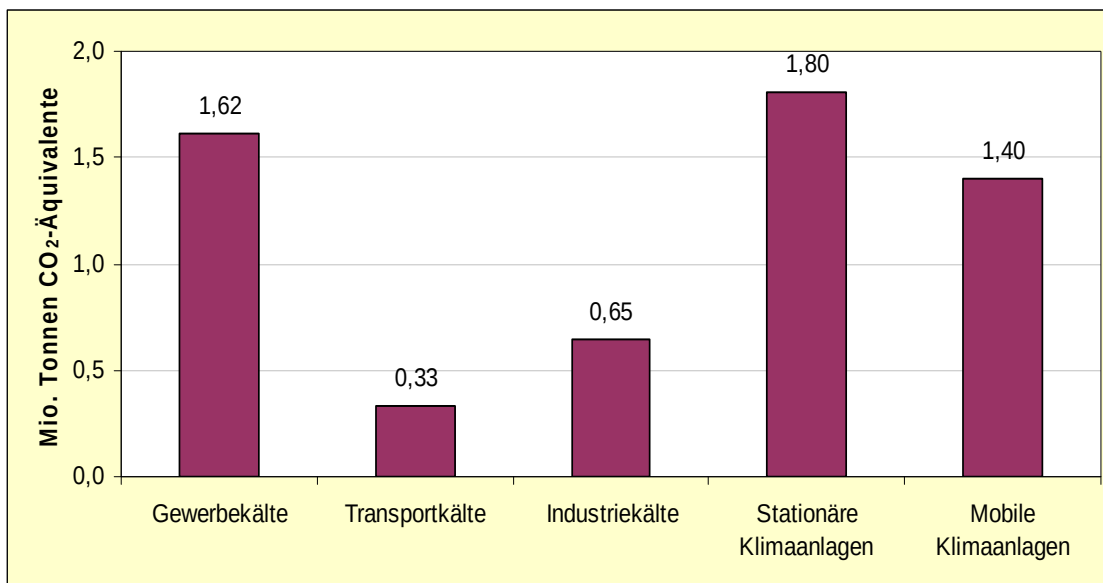


Abbildung 3.5: Prognostizierte HFKW-Emissionen in der Anwendung Kälte/Klima im Jahr 2050 in Deutschland in Mio. t CO₂-Äquivalente („Mit-Maßnahmen-Szenario“, Variante a). Daten aus: [Schwarz, Gschrey 2010].

FKW haben ein gegenüber den HFKW meist sehr viel höheres Treibhauspotenzial. Auch deshalb werden FKW in Kälte- und Klimaanlage nur in speziellen Anwendungen, vor allem zur Erzeugung von Tiefsttemperaturen, eingesetzt. Darüber hinaus sind sie Bestandteil von Kältemittel-Gemischen (Blends), die als drop-in Ersatz für FCKW und HFCKW entwickelt wurden.

3.3 *Anwendungsbereiche und Minderungsmöglichkeiten*

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Kälte- und Klimaanlageanwendungen im Einzelnen vorgestellt. Für jede Einzelanwendung ist kurz der technische Stand des Einsatzes fluorierter Gase beschrieben. Dabei wird auch ihre Rolle als FCKW-Ersatz aufgegriffen. Die Darstellung technischer Maßnahmen zur Minderung des Einsatzes dieser Stoffe erfolgt im Anschluss.

Grundsätzlich kann vorangestellt werden, dass HFKW heute noch in fast allen stationären und mobilen Kälte- und Klimaanlageanwendungen eingesetzt werden. In der Europäischen Union ist ihr Ersatz durch weniger klimaschädliche Stoffe jedoch in einigen Anwendungen bereits beschlossen und in entsprechenden Rechtsvorschriften verbindlich festgeschrieben (s. u.).

Maßnahmen zur Minderung von HFKW und - seltener - FKW-Emissionen können nach zwei grundsätzlich unterschiedlichen Ansätzen eingeteilt werden:

1. Maßnahmen, die eine möglichst geringe Emission dieser Stoffe bei der Herstellung, während des Betriebs und bei der Entsorgung von Geräten oder Anlagen zum Ziel haben.
2. Maßnahmen, die auf eine Substitution durch halogenfreie Stoffe oder Verfahren hinzielen.

Die erstgenannte Kategorie kann im Grundsatz auf alle stationären oder mobilen Kälte- und Klimaanlageanwendungen gleichermaßen angewendet werden. Zu den wichtigsten Einzelmaßnahmen dieser Kategorie zählen:

- eine möglichst emissionsarme Installation / Produktion,
- eine durch technische Maßnahmen über die gesamte Lebenszeit der Anlage verbesserte Anlagendichtheit,
- eine Gewährleistung der Anlagendichtheit durch regelmäßige Kontroll- und Instandhaltungsmaßnahmen und
- eine möglichst emissionsarme Entsorgung.

Maßnahmen, die zwischen die genannten Kategorien fallen, sind

- die Auswahl von fluorierten Gasen mit einem möglichst geringen Treibhauspotenzial und
- die Reduzierung der Kältemittelfüllmenge.

Da die genannten Einzelmaßnahmen nicht für eine oder mehrere Einzelanwendungen spezifisch sind, werden sie in den folgenden Kapiteln nicht jedes Mal erneut als mögliche Emissionsminderungsmaßnahmen aufgeführt. Nur in Einzelfällen ist der erneute Hinweis sinnvoll und in spezifizierter Form aufgenommen.

Einige der genannten Maßnahmen haben das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und die Europäische Kommission bereits in Form von Rechtsvorschriften verbindlich vorgeschrieben [KOM 2006; KOM 2006a; ChemKlimschutzV 2008], andere werden noch auf der politischen Ebene diskutiert oder auf freiwilliger Basis umgesetzt. Die für einzelne Anwendungen spezifischen Maßnahmen sind in den entsprechenden Unterkapiteln aufgenommen. Zu den in der Kälte- und Klimatechnik für ortsfeste Anlagen übergreifenden, rechtsverbindlich festgeschriebenen Maßnahmen gehören u. a. die seit dem 01. August 2008 geltenden Grenzwerte für den spezifischen Kältemittelverlust im Normalbetrieb (Emissionsrate = reguläre Emissionen). Im Jahr 2003 gingen Hersteller davon aus, dass eine Reduktion der Emissionsraten von 5-10 % (in Einzelfällen 20 %) innerhalb von fünf Jahren bei Neuanlagen auf eine Größenordnung von 2 % realisiert werden könnte [Bock 2003; Linde 2003]. Als Voraussetzungen wurden regelmäßige Dichtheitsprüfungen mit geeigneten Geräten und Anlagen, die keine verborgenen Verbindungsstellen (Leckagestellen) haben, genannt [Bock 2003]. Das VDMA Einheitsblatt 24243-1 [VDMA 2005] vom August 2005 hat ebenfalls niedrige zulässige spezifische Kältemittelverluste empfohlen. Mit Inkrafttreten der Chemikalien-Klimaschutzverordnung [ChemKlimschutzV 2008] am 01. August 2008 hat der Gesetzgeber entsprechend niedrige Emissionsraten für nach dem 30. Juni 2008 am Aufstellungsort errichtete Anlagen, die HFKW als Kältemittel enthalten, vorgeschrieben:

- Kältemittel-Füllmenge unter 10 Kilogramm 3 Prozent;
- Kältemittel-Füllmenge von 10 bis 100 Kilogramm 2 Prozent;
- Kältemittel-Füllmenge über 100 Kilogramm 1 Prozent.

Für Kältesätze mit einer Kältemittel-Füllmenge von mindestens drei Kilogramm gilt als Grenzwert ein spezifischer Kältemittelverlust im Normalbetrieb von 1 Prozent.

Für bis zum 30. Juni 2008 am Aufstellungsort errichtete Anlagen gelten ab 01. Juli 2011 ebenfalls Grenzwerte.

Die Praxis der nächsten Jahre wird zeigen, ob die Grenzwerte tatsächlich realisiert werden können.

In den folgenden Kapiteln werden vor allem Maßnahmen beschrieben, die eine Substitution durch alternative Stoffe oder Verfahren zum Ziel haben. Diese Maßnahmen können in der Regel nur für Neuanlagen umgesetzt werden.

In vielen Anwendungen werden bereits heute sogenannte „natürliche Kältemittel“ wie Kohlenwasserstoffe, Wasser, Ammoniak oder CO₂ eingesetzt. Für Kaltgasprozesse, bei denen das Kältemittel trotz sehr tiefer Temperaturen stets gasförmig bleibt, können noch die Arbeitsstoffe Luft und Helium in die Liste der „natürlichen Kältemittel“ aufgenommen werden.

Mit den genannten natürlichen Kältemitteln können im Grunde alle Kälte- und Klimaanlageanwendungen abgedeckt werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Einsatz dieser Kältemittel teilweise mit höheren Investitionskosten und, bei Verwendung von Kohlenwasserstoffen, CO₂ oder Ammoniak, mit höheren Sicherheitsanforderungen (Entzündlichkeit, hohe Drucklage, Toxizität) verbunden ist. Eine vielfach diskutierte Verschlechterung der Energieeffizienz hat sich in der Praxis nur in Ausnahmefällen bestätigt.

Es gibt Anwendungen, in denen sich Ammoniak (z. B. Industriekälteanlagen) oder Kohlenwasserstoffe (z. B. steckerfertige Gewerbekältegeräte, Haushaltskühlgeräte) bereits durchsetzen oder durchgesetzt haben. CO₂ hat als Kältemittel in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen und ist heute nicht mehr aus der Kälte- und Klimatechnik wegzudenken.

Für die Beurteilung, ob der Einsatz halogenfreier Kältemittel in den einzelnen Anwendungsbereichen ökologisch vorteilhaft ist, wird eine ökobilanzielle Betrachtung nicht als erforderlich angesehen. Für eine ökobilanzielle Beurteilung müssten neben den Auswirkungen der Kältemittel auf alle relevanten Umweltkompartimente auch die Effekte resultierend aus der Energiebereitstellung und des Materialverbrauchs (inkl. Herstellung) auf diese Umweltkompartimente einbezogen werden. Die von Kälteanlagen ausgehenden wesentlichen Umweltauswirkungen resultieren jedoch aus ihrem Energieverbrauch und den Emissionen des eingesetzten Kältemittels. Beides hat im Wesentlichen Auswirkungen auf das Klima, wenn der Einsatz von chlorierten, ozonschichtschädigenden Kältemitteln nicht betrachtet wird. Als Konzept zum Vergleich von negativen Auswirkungen auf das Klima durch Produkte und Verfahren hat sich der TEWI (Total Equivalent Warming Impact)-Wert durchgesetzt.

Der TEWI ist eine berechnete Größe für den Gesamtbeitrag einer „Anlage“ zum Treibhauseffekt. Gemäß DIN EN 378-1 beschreibt er die Summe der indirekten Emissionen einer Anlage aus ihrem Energieverbrauch und den direkten, durch Kältemittelverlust verursachten Emissionen.

Eigene Berechnungen hat das Umweltbundesamt für diesen Bericht nicht vorgenommen. Alle für die Berechnung herangezogenen TEWI-Werte¹ entstammen der Literatur oder sind im Auftrag des Umweltbundesamtes von Experten ermittelte Werte. Sofern für einzelne Anwendungen keine TEWI-Werte zur Verfügung stehen, wird für jeden Anwendungsbereich eine qualitative Aussage dazu getroffen, wie es sich mit den Energieeffizienzen der dargestellten Anlagen verhält. Geht der Einsatz von halogenfreien

¹ Sofern vorhanden sind im Einzelfall auch LCCP (Life Cycle Climate Performance)-Werte in die Bewertung eingeflossen.

Kältemitteln an Stelle von halogenhaltigen Kältemitteln nicht mit einer Verschlechterung der energetischen Effizienz einher, ist von einer Verringerung der negativen Gesamtauswirkungen auf die Wirkungskategorie Klima durch ihren Einsatz auszugehen. Sofern nähere Informationen vorliegen, wird auch ein konkreter Vergleich unter Einbezug des direkten und des indirekten Beitrags gezogen.

Neben der Beschreibung der technischen Möglichkeiten bei der Kältemittelwahl oder auch der Wahl der Kälteversorgung, sind, soweit möglich, auch die ökonomischen Rahmenbedingungen dargestellt. Zudem wird auf Sicherheitsfragen und/oder -probleme hingewiesen. In den sich jedem Unterkapitel anschließenden Schlussfolgerungen wird beurteilt, ob der Einsatz halogenfreier Kältemittel in den einzelnen Anwendungsgebieten technisch und ökonomisch möglich und ökologisch vorteilhaft ist.

3.3.1 Haushalts- und Laborgeräte (Kühl- und Gefriergeräte, Wäschetrockner)

Dieses Kapitel behandelt vorrangig kleine Kühl- und Gefriergeräte, wie sie millionenfach im Haushalt eingesetzt werden. Darüber hinaus sind speziell für Laboratorien entwickelte Kühl- und Gefriergeräte dargestellt, da deren Kältemittelentwicklung sich von der bei den Haushaltsgeräten unterscheidet. Nicht betrachtet werden weitere Laboranwendungen, die ebenfalls (fluorierte) Kältemittel enthalten. Neben Kühl- und Gefriergeräten gibt es im Haushalt heute ein weiteres, übliches Gerät, welches Kältemittel enthält: den Wäschetrockner mit integrierter Wärmepumpe. Auch diese Geräte sind kurz dargestellt.

Haushaltskühl- und Gefriergeräte stehen heute in Deutschland in fast jedem Haushalt, in vielen Büros und anderen Bereichen. Weltweit produzieren Hersteller jährlich mehr als 100 Mio. Geräte, geschätzte 1.500 bis 1.800 Mio. Geräte existieren [UNEP 2009]. Auf dem Markt sind Geräte unterschiedlicher Größe und Ausstattung erhältlich. Die Isolierung erfolgt in der Regel mittels Polyurethan (PUR)-Dämmstoff, zur Kälteerzeugung werden hermetische, dauerhaft geschlossene Systeme (Kompressions-Kaltdampf-Kältemaschinen) eingesetzt.

Neben den vorwiegend im Haushalt genutzten Geräten sind speziell für Labore entwickelte Kühl- und Gefriergeräte auf dem Markt. Diese müssen gegenüber Haushaltsgeräten besondere Anforderungen erfüllen. Hierzu zählen z. B. eine exakte Temperaturführung, das schnelle Erreichen der Zieltemperatur, Explosionsschutz etc.

Wärmepumpenwäschetrockner sind erst seit wenigen Jahren auf dem europäischen Markt erhältlich. Ihr Marktanteil wächst stetig an und lag in Deutschland im Jahr 2008 bei knapp 6 % [EEDAL 2009]. Im Vergleich zu herkömmlichen Trocknern sind die Investitionskosten für Geräte mit integrierter Wärmepumpe höher, sie bieten aber Energieeinsparpotenziale von bis zu 50 %, so dass die Gesamtkosten von Wärmepumpentrocknern über die gesamte Lebensdauer kleiner sind [EEDAL 2009a]. In Wärmepumpenwäschetrocknern befindet sich das Kältemittel, meist HFKW-407C, aber auch HFKW-134a, HFKW-410A und HFKW-

152a, in einem hermetisch geschlossenen System. Die Füllmengen liegen zwischen 300 g und 600 g.

Bis Anfang der neunziger Jahre wurde in nach dem Kompressionsprinzip arbeitenden Haushalts- und Laborkältegeräten als Kältemittel der FCKW-12 und als Treibmittel zur Herstellung der Dämmstoffe der FCKW-11 eingesetzt. Für kurze Zeit haben Hersteller an Stelle des FCKW-11 wegen seines geringeren ODP den HFCKW-141b als Treibmittel eingesetzt. Seit dem FCKW-Verbot werden HFKW und halogenfreie Kälte- und Treibmittel eingesetzt.

Etwa 63 % aller weltweit produzierten Haushaltskühl- und -gefriergeräte werden auch heute noch mit dem HFKW-134a hergestellt, 1-2 % mit HFKW-152a und HFCKW-22. Expertenschätzungen gehen allerdings davon aus, dass im Jahr 2020 in 75% der Haushaltsgeräte Kohlenwasserstoffe als Kältemittel eingesetzt werden. Jedes Haushaltsgerät enthält zwischen 50 g und 250 g Kältemittel [UNEP 2009]. Wie bereits die FCKW ist auch der HFKW-134a nicht brennbar. Maßnahmen zum Explosionsschutz bei der Herstellung und am Produkt sind daher nicht erforderlich. Laborgeräte enthalten meist die HFKW-134a und 404A.

In Deutschland haben Haushaltskühl- und Gefriergeräte als HFKW-Emissionsquelle keine Bedeutung. Nur sehr wenige Geräte mit HFKW sind überhaupt auf dem Markt (siehe weiter hinten). Wegen ihrer grundsätzlichen Bedeutung und wegen des HFKW-Einsatzes in anderen Ländern, sind sie dennoch in diesen Bericht aufgenommen. Im Bestand vorhandene Laborgeräte enthalten zwar überwiegend HFKW als Kältemittel. Wegen ihrer vergleichsweise geringen Zahl, der geringen Füllmengen und der guten Entsorgungsmöglichkeiten ist aber auch ihre Bedeutung als HFKW-Emissionsquelle eher gering.

Minderungsmöglichkeiten

Bei den Haushaltsgeräten erfolgte die umfassende Umstellung der gängigen Kompressionskältegeräte auf FCKW-freie Kältemittel in Deutschland in den Jahren 1993/94. Nach einem vorübergehenden Einsatz des Kältemittels HFKW-134a haben alle deutschen Hersteller auf den Kohlenwasserstoff R 600a (iso-Butan) umgestellt. Als Treibmittel in den Dämmstoffen wird seit Mitte der neunziger Jahre (1993/1994) Pentan oder Cyclopentan (c-Pentan) eingesetzt. In Deutschland werden keine Geräte produziert, die HFKW enthalten [BSH 2003].

Das technische Geräte-Design hat sich mit der Einführung der Kohlenwasserstoffe als neue Kältemittel zumindest im Detail geändert. So musste der Brennbarkeit von Kohlenwasserstoffen Rechnung getragen werden. Aber auch die gestiegenen Anforderungen an die Energieeffizienz von Kältegeräten haben zu Produktmodifikationen (Verbesserung der Kompressoren, verringerte Verluste bei der Wärmeübertragung, verbesserte Isolierung

etc.) geführt [UNEP 2003]. Moderne Geräte mit Kohlenwasserstoffen als Kälte- und Treibmittel erfüllen die Anforderungen an die Energieeffizienzklassen A+ und A++.

Kohlenwasserstoffhaltige Geräte haben über einen Zeitraum von inzwischen über 15 Jahren ihre Sicherheit und ihre ökonomische wie auch ökologische Einsetzbarkeit demonstriert. Systembedingte technische Probleme sind nicht bekannt [UNEP 2006]. Im europäischen Ausland werden Sicherheitsbedenken mitunter dennoch weiter diskutiert; in einigen außereuropäischen Ländern ist der Einsatz von brennbaren Kältemitteln wegen bestehender nationaler Vorschriften schwierig. Dies gilt auch für Mengen unterhalb von 150 g Kohlenwasserstoffe pro Gerät [BSH 2003]. Da die Environmental Protection Agency (US-EPA) im Mai 2010 im Rahmen des U.S. Significant New Alternatives Policy program (SNAP) vorgeschlagen hat, u. a. Isobutan und Propan als akzeptable Alternativen für FCKW in Haushalts- und gewerblichen Kühlgeräten (bis 150 g) zu listen, könnte sich dies zumindest in den USA zukünftig ändern. In anderen Ländern, vor allem in China und Indien, konnte die Kohlenwasserstofftechnologie bereits vor einigen Jahren erfolgreich eingeführt werden.

Über die mit der Umstellung auf Kohlenwasserstoffe in der Praxis entstandenen Kosten liegen keine Veröffentlichungen vor. Grundsätzlich entstehen Mehrkosten durch erforderliche Sicherheitsvorkehrungen beim Umgang (Transport, Lagerung) mit Kohlenwasserstoffen, durch notwendige Explosionsschutzmaßnahmen am Produktionsstandort (vor allem Investitionskosten) sowie durch erforderliche Änderungen am Produktdesign (Entwicklungsarbeit) und der eingesetzten Bauteile. Weitere wesentliche Kostenaspekte sind die Entsorgung, der Energieverbrauch und das Kältemittel. Bezüglich der Aspekte Entsorgung und Kältemittelkosten resultiert der Einsatz von Kohlenwasserstoffen in einer Kostenreduktion; in Bezug auf den Aspekt Energieverbrauch ergibt sich keine signifikante Änderung.

Neben Geräten mit Kompressionskälteanlage sind vereinzelt Geräte mit anderen Technologien, sogenannten „Not-In-Kind-Technologien“, auf dem Markt. Hierzu zählen laut UNEP [UNEP 2006] meist mit Ammoniak/Wasser betriebene Absorptionsgeräte (s. Kap. 3.1.2), nach dem Stirling-Prozess arbeitende Geräte, thermoakustische und –magnetische Geräte sowie Geräte mit transkritischem CO₂-Prozess. Diese Technologien haben teilweise ebenfalls den Stand der Technik erreicht. Bezüglich Kosten und spezifischem Energieverbrauch sind die genannten „Not-In-Kind-Technologien“ jedoch im Vergleich mit Kompressionskältegeräten für die Massenproduktion noch immer nicht wettbewerbsfähig [UNEP 2006]. Dennoch: Gerade Absorptionsgeräte finden wegen ihres leisen Betriebs vor allem im Hotel- und Camping-Bereich Anwendung. Ihre Stückzahl ist aber im Vergleich zu Geräten mit Kompressionskälteanlage sehr gering [UNEP 2003].

Einige, vor allem in der ehemaligen DDR produzierte Geräte, waren an Stelle von PUR-Dämmstoffen mittels expandiertem Polystyrol isoliert. Zur Herstellung von expandiertem

Polystyrol werden keine halogenierten Stoffe eingesetzt. Diese Geräte sind aber eine Ausnahme. Wegen der geringeren energetischen Effizienz der Geräte mit expandiertem Polystyrol haben die Hersteller diese Technik nicht weiter verfolgt.

Laborgeräte waren bis zum Jahr 2008 nur mit HFKW verfügbar. Seitdem haben verschiedene europäische Hersteller Geräte mit halogenfreien Kohlenwasserstoffen auf den Markt gebracht, sodass laut Vertreiberangaben heute die gesamte Produktpalette mit diesen Kältemitteln verfügbar ist. Diese Geräte zeichnen sich durch eine hohe Energieeffizienz und damit geringere Betriebskosten aus und verursachen auch in der Anschaffung keine Mehrkosten [Gram 2010; MSL 2010].

Bisher sind keine Wärmepumpenwäschetrockner mit natürlichen Kältemitteln auf dem Markt erhältlich, es wurden jedoch Tests mit Kohlenwasserstoffen, CO₂ und Wasser durchgeführt. Der Einsatz von Kohlenwasserstoffen, z.B. Propan, erscheint vielversprechend, da im Vergleich zu heutigen HFKW-haltigen Trocknern weitere Energieeinsparungen möglich sind. Ein Ziel der Entwicklungsarbeiten mit Kohlenwasserstoffen ist dabei auch die Reduktion der Kältemittelfüllmenge unter 150 g [EuP Lot 16; Siemens 2009].

Schlussfolgerungen

Die deutschen Hersteller haben bereits vor 1993/94 FCKW- und HFKW-freie Haushaltskühl- und Gefriergeräte in den Markt eingeführt. Diese Geräte werden heute in verschiedenen Ländern in Europa, aber auch weltweit hergestellt. Sie haben ihre Sicherheit, ihre ökonomische wie auch ökologische Einsetzbarkeit demonstriert. Andere europäische und außereuropäische Hersteller (z. B. Hersteller in den USA) setzen nach wie vor den HFKW-134a in den Dämmstoffen und als Kältemittel ein. Diese Geräte werden teilweise auch in Deutschland angeboten.

Seit wenigen Jahren sind auch die speziellen Anforderungen im Labor erfüllende Kühl- und Gefriergeräte ohne HFKW auf dem Markt verfügbar. Diese sind energetisch sehr effizient und verursachen auch in der Anschaffung keine Mehrkosten.

Bei Wäschetrocknern mit integrierter Wärmepumpe scheint ein Einsatz von natürlichen Kältemitteln, vor allem Kohlenwasserstoffen, möglich sowie unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten sinnvoll. Für die Entwicklung solcher Geräte sind noch weitere Forschungsaktivitäten nötig.

Der Einsatz von HFKW ist weder als Kältemittel noch als Treibmittel erforderlich. Beim Kauf eines Gerätes kann und sollte daher auf HFKW-freie Produkte mit hoher Energieeffizienz zurückgegriffen werden.

Altgeräte enthalten zum Großteil noch FCKW, in Einzelfällen HFKW. Diese Stoffe müssen im Zuge der Entsorgung möglichst emissionsarm zurückgewonnen und vernichtet werden.

3.3.2 Gewerbekälteanlagen

Kälteanlagen der gewerblichen Kühlung dienen der Frischhaltung und Tiefkühlung von Verkaufswaren, vor allem Lebensmitteln. Sie sind im Lebensmitteleinzelhandel (in Supermärkten, Discountmärkten, Metzgereien, Bäckereien etc.), in Gaststätten, Gärtnereien, Großküchen (Hotel, Kantine etc.) und anderen Bereichen installiert. Je nach Anwendungsbereich und -zweck kann zwischen vielen Ausführungen unterschieden werden.

Eine grundsätzliche Unterscheidung kann in zentrale und dezentrale Systeme erfolgen.

Bei zentralen Anlagen werden mehrere Kühlstellen (Verbraucher) durch eine Kälteanlage versorgt. Meist handelt es sich um Verbundkälteanlagen (s. Kap. 3.3.2.3), bei denen mehrere parallel geschaltete Verdichter zu einem Verbundkältesatz zusammengeschaltet sind. Während sich die Kühlstellen im Verkaufsraum befinden, ist die eigentliche Kälteanlage (Verdichter) meist in einem separaten Raum (Maschinenraum) installiert. Eine Ausnahme stellen „distributed systems“ dar. Hier sind ein oder mehrere Verdichter im Verbund zusammen mit einem meist wassergekühlten Verflüssiger als schallsolierte Einheiten gebündelt und in unmittelbarer Nähe zu den Kühlstellen, meist im Verkaufsraum, aufgestellt. Typische Anwendungsbereiche für Verbundanlagen sind u. a. Super- und Verbrauchermärkte. Zu den zentralen Anlagen können auch Verflüssigungssätze gehören, die als fabrikgefertigte Einheiten in kleineren Lebensmittelmärkten an zentraler Stelle aufgestellt werden.

Dezentrale Anlagen (Geräte) können als

- industriell vorgefertigte, kompakte Einheiten mit integriertem Verdichter und Kondensator (z. B. steckerfertige Kühlmöbel, Getränkeautomaten, s. Kap. 3.3.2.1) oder
- Einzelanlagen mit externem Verflüssigungssatz (s. Kap. 3.3.2.2) ausgeführt werden.

Im Gegensatz zu den erstgenannten kompakten Einheiten mit hermetisch geschlossenem Verdichter sind bei dezentralen Einzelanlagen der Verdichter und der Verflüssiger separat von den Kühlstellen installiert. Bei diesen Anlagen ist eine Montage vor Ort erforderlich. Die Kälteleistung geht bis etwa 20 kW. Typische Anwendungsbereiche sind z. B. Fleischereien (Fleischtheken) [UNEP 2003]. In der Praxis sind in Lebensmitteleinzelhandelsgeschäften häufig mehrere der genannten Technologien installiert [Harnisch u. a. 2003; UNEP 2006].

Die verschiedenen Ausführungen von zentralen und dezentralen Anlagen unterscheiden sich in ihrer Flexibilität, Größe, Kältemittelfüllmengen und Kälteleistung, aber auch in ihren spezifischen (auf eine „Einheit Kühlgut“ bezogenen) Energieverbräuchen. So sind die spezifischen Energieverbräuche der Verflüssigungssätze von Einzelanlagen meist größer als bei Verbundanlagen [UNEP 2006]. Kompaktgeräte (steckerfertige Geräte) verbrauchen gegenüber Einzelanlagen nochmals mehr spezifische Energie [Harnisch u. a. 2008]. Dafür sind steckerfertige Geräte besonders flexibel und eignen sich vor allem für kleine Läden (z. B. Kiosk), in denen die Installation einer Verbundanlage nicht sinnvoll ist. Vor allem durch die Minimierung von Saugleitungsverlusten lässt sich der Energieverbrauch von „distributed systems“ gemäß Messungen an amerikanischen Supermarktanlagen um 5-8% im Vergleich zu HFKW-Direktverdampfungsanlagen reduzieren [Kauffeld 2007]. Wegen der vielen Einflussfaktoren wird in anderen Quellen keine dezidierte Aussage zur Energieeffizienz getroffen [UNEP 2006].

Als Kältemittel wurden bis in die 90er Jahre des letzten Jahrhunderts üblicherweise FCKW, vor allem der FCKW-12, und der HFCKW-22 sowie das FCKW-haltige Gemisch R 502 eingesetzt, die heute durch den HFKW-134a (für R 12) und durch HFKW-Gemische (R 404A, R 407C, R 507A) ersetzt werden [UNEP 2003].

Im Jahr 2007 wurden in Deutschland etwa 1.000 t HFKW als Kältemittel in der gewerblichen Kühlung zur Herstellung von Neuanlagen eingesetzt. Die Emissionen betrugen im selben Jahr etwa 1.300 t (3,5 Mio. t CO₂-Äquivalente) [BReg 2009]. Damit sind Gewerbekälteanlagen bei Betrachtung der CO₂-Äquivalente heute die größte HFKW-Emissionsquelle aus Kälte- und Klimaanwendungen. Auf Abbildung 3.4, Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2 wird verwiesen.

3.3.2.1 Steckerfertige Geräte

Der Begriff „steckerfertige Geräte“ umfasst in diesem Bericht Geräte, die als fertiges, industriell (in Serie) hergestelltes Produkt an den Endverbraucher geliefert werden und dort nur noch an eine Stromversorgung (Steckdose) gekoppelt werden müssen. Alle Komponenten des Kälteaggregats (Verdichter, Verdampfer, Expansionsorgan und Kondensator) sowie die Kühlstelle sind in dem Gerät integriert.

Damit sind auch Haushaltsgeräte und mobile Raumklimageräte von dieser Definition erfasst, die jedoch gesondert im Kapitel 3.3.1 und im Kapitel 3.3.5.1 behandelt sind.

Das Besondere an „steckerfertigen Geräten“ ist demnach, dass keine Montage vor Ort stattfindet und dass sich das Kältemittel in der Regel in einem hermetisch geschlossenen System (Kompressions-Kaltdampf-Kältemaschine) befindet. Die Kältemittelfüllmengen, wie auch die Anwendungen, können aber erheblich zwischen den unterschiedlichen Geräten variieren.

Typische Beispiele für „steckerfertige Geräte“ sind Kühl- und Tiefkühltruhen und -vitrinen im Lebensmittelbereich, daneben Gewerbekühlschränke und Getränkeautomaten (Flaschenkühlschränke). Mögliche Aufstellungsorte variieren vom Supermarkt bis zu Kiosk, Bahnsteig und Tankstelle. Insgesamt nimmt die Anzahl dieser Geräte zu [UNEP 2003; UNEP 2006].

Die in steckerfertigen Geräten eingesetzte Kältemittelmenge liegt zwischen weniger als 150 g und etwa 500 g [Danfoss 2003a]. Mengen bis 1,5 kg sind möglich [FKW 1998b]. Als Kältemittel kommen heute HFKW (HFKW-134a, für niedrigere Temperaturen auch R 404A oder R 507A) zum Einsatz, die Mitte der neunziger Jahre die FCKW abgelöst haben [UNEP 2003]. Für die Isolierung gilt das für Haushaltsgeräte Gesagte.

Die Emissionen aus den einzelnen Geräten sind wegen der hermetischen Bauweise gering. Die jährlichen Leckageraten liegen bei etwa 1,5 %. Damit haben die regulären Emissionen aus steckerfertigen Geräten einen Anteil von etwa 1% an den Bestandsemissionen der gesamten Gewerbekälte [Schwarz 2005]. Von größerer Bedeutung sind – bezogen auf das Einzelgerät – die Entsorgungsemissionen, da eine vollständige Rückgewinnung des Kältemittels nicht möglich ist. Die Relevanz der hier dargestellten Anwendung kann aber insbesondere aus der steigenden Stückzahl abgeleitet werden. Im Jahr 2008 waren in Deutschland laut Schätzungen des Forschungsrats Kältetechnik [Forschungsrat 2009] allein in Supermärkten etwa 385.000 steckerfertige Kühlmöbel installiert.

Minderungsmöglichkeiten

Als halogenfreie Kältemittel setzen Hersteller in wachsendem Umfang Kohlenwasserstoffe (R 600a, R 290 und Gemische) oder CO₂ ein [UNEP 2006].

Der Einsatz von Kohlenwasserstoffen gilt heute als Stand der Technik. Tiefkühltruhen oder Getränkeautomaten (Flaschenkühler) mit Kohlenwasserstoffen sind weltweit zu Tausenden installiert [UNEP 2006; Harnisch u. a. 2008]. Dies ist u. a. auf Bestrebungen einiger Komponenten- und Gerätehersteller, aber auch auf die Nutzer dieser Geräte [z. B. Coca-Cola 2000; Coca-Cola 2008; McDonald's 2003; Unilever 2010] zurückzuführen, gänzlich auf den Einsatz von HFKW zu verzichten. Gefördert werden diese Bemühungen auch durch den in einigen Ländern der EU beschlossenen Ausstieg aus den HFKW. Der Einsatz von Kohlenwasserstoffen in steckerfertigen Geräten ist dennoch nicht unumstritten, da diese meist größere Füllmengen als z. B. Haushaltskühlgeräte enthalten. Einige europäische Hersteller haben Geräte mit Füllmengen bis zu 1 kg im Programm [UNEP 2010]. In Deutschland ist der Einsatz von Mengen bis 150 g als Kältemittel eine zwischenzeitlich akzeptierte Grenze und Füllmengen bis 500 g werden als auch unter Sicherheitsaspekten möglich beurteilt [TÜV Süd 2003a]. Andere europäische und außereuropäische Länder sehen dies bereits als kritisch an. So wird der Einsatz auch kleiner Mengen brennbarer Kältemittel in den USA bisher wegen der dortigen Produkthaftungsgesetze und den extrem hohen Schadensersatzforderungen im Falle eines (noch so unwahrscheinlichen)

Schadensereignisses grundsätzlich abgelehnt. Allerdings hat die Environmental Protection Agency (US-EPA) im Mai 2010 im Rahmen des U.S. Significant New Alternatives Policy Program (SNAP) vorgeschlagen, u. a. Isobutan und Propan als akzeptable Alternativen für FCKW in Haushaltsgeräten und steckerfertigen Geräten für die gewerbliche Kühlung (bis 150 g) zu listen.

Die Entwicklungen zum Einsatz von Kohlenwasserstoffen in steckerfertigen Geräten gehen heute in verschiedene Richtungen: Zum einen wird versucht, die erforderliche Kältemittelfüllmenge durch Systemoptimierungen zu reduzieren. Des Weiteren gibt es immer wieder Bestrebungen, die in Normen festgelegten/empfohlenen Mengen an brennbaren Kältemitteln zu erhöhen, soweit dies sicherheitstechnisch möglich erscheint. Bisher bleiben solche Bemühungen erfolglos.

TK-Truhen mit Kohlenwasserstoffen (R 600a und R 290) haben 10-15% niedrigere Energieverbräuche als vergleichbare mit HFKW [Harnisch u. a. 2008; aus Jürgensen 2004]. Flaschenkühler mit Kohlenwasserstoffen sogar bis zu 30 % niedrigere. Die Investitionskosten sind etwa gleich (Flaschenkühler) oder bis 15 % höher (TK-Truhen), wobei die Betriebskosten etwa 10-30 % geringer sind [Harnisch u. a. 2008].

Ein Hersteller hat laut UNEP [UNEP 2006] im Jahr 2006 mit der kommerziellen Vermarktung von CO₂-basierten Tiefkühltruhen (für Eiscreme) begonnen. Ihr Marktanteil ist weiterhin gering [UNEP 2010]. Wenige Unternehmen haben sich auch bei Getränkeautomaten für das Kältemittel CO₂ entschieden und einige Tausend Geräte aufgestellt. Energetisch sind diese Geräte gemäß Tests des DTI bei Außentemperaturen unter 32°C besser oder gleichwertig wie HFKW-Geräte [UNEP 2006; UNEP 2010]. Andere Quellen sprechen sowohl von niedrigeren als auch höheren Verbräuchen [Harnisch u. a. 2008]. Flaschenkühler und Truhen mit CO₂ sind zurzeit noch deutlich teurer als vergleichbare Geräte mit HFKW oder Kohlenwasserstoffen. Danfoss [Danfoss 2003b] ging jedoch im Jahr 2003 davon aus, dass CO₂-Kompressoren aus einer Serienfertigung keine Kostennachteile gegenüber HFKW-Kompressoren mehr haben werden.

Neben der Verwendung von halogenfreien Kältemitteln erproben einige Hersteller den Einsatz sogenannter „Not-In-Kind-Technologien“ für steckerfertige Geräte. Hierzu zählt beispielsweise die Stirling-Technologie, welche Hersteller in Transportkühlboxen und Getränkeautomaten (z. B. für Dosen) in den Markt eingeführt haben. Die Energieeffizienz dieser Geräte liegt im Bereich der von HFKW-Geräten [UNEP 2006].

Schlussfolgerungen

In steckerfertigen Geräten mit Füllmengen von weniger als 150 g ist der Einsatz von Kohlenwasserstoffen schon heute Stand der Technik. In diesen Geräten können sie HFKW ersetzen.

Zukünftig, wenn die zulässige Menge brennbarer Kältemittel ohne zusätzliche Sicherheitsrisiken erhöht werden kann und sie in weiteren Ländern akzeptable Alternativen darstellen, können Kohlenwasserstoffe einen noch höheren Beitrag zur Verringerung des Einsatzes und der Emission treibhausrelevanter Stoffe leisten.

Mit der Entwicklung von CO₂-Kompressoren speziell für steckerfertige Geräte (Geräte mit kleinen Kälteleistungen) ist ein großer Fortschritt gelungen. Der Ersatz von HFKW ist somit in Neuanlagen entweder durch Kohlenwasserstoffe oder CO₂ möglich.

Wegen der guten energetischen Effizienz von Geräten ohne HFKW können diese einen Beitrag zur Verringerung der Gesamttreibhausgasemissionen leisten.

3.3.2.2 Einzelanlagen

Dezentrale Einzelanlagen sind z. B. in Fleischereien (Fleischtheken), in Gaststätten (Schankanlagen), aber auch in Supermärkten installiert. Der Verflüssigungssatz befindet sich bei diesen Anlagen außerhalb des Verkaufsraums. Die Kälteleistung reicht von einigen 100 W bis etwa 20 kW [UNEP 2006; FKW 1998b].

Das Kältemittel wird nach der Installation der Anlage vor Ort eingefüllt. Im Gegensatz zu den zuvor dargestellten „Geräten“ befindet sich das Kältemittel nicht in einem dauerhaft hermetisch geschlossenen Kreislauf; jede Anlage beinhaltet zum Teil lösbare Verbindungen. Es werden je nach Kälteleistung hermetische und halbhermetische Verdichter eingesetzt (s. Kap. 3.1.1).

In dezentralen Einzelanlagen werden heute überwiegend HFKW eingesetzt. Lediglich in Altanlagen findet noch der HFCKW-22 Anwendung.

Die auf die Füllmenge bezogenen jährlichen Leckageraten dieser Anlagen sind wegen ihrer Bauweise mit 5-10 %/a [Schwarz 2005] größer als die steckerfertiger Geräte, aber niedriger als bei Verbundanlagen. Auf Basis vorliegender Angaben schätzt Schwarz [Schwarz 2003b] den Emissionsanteil trotz der großen Anlagenanzahl bezogen auf den Bereich Gewerbekälte auf unter 20 %.

Minderungsmöglichkeiten

Wegen der für diesen Anwendungsbereich (Bäckerei, Fleischerei etc.) benötigten, kleineren Kälteleistungen von etwa 2 kW ist der Einsatz von Ammoniak nicht möglich. Die für diesen Leistungsbereich benötigten Verdichter sind nicht auf dem Markt und werden nach Aussage von Herstellern auch zukünftig nicht herstellbar sein [z. B. Danfoss 2003b]. Jedoch hat ein Unternehmen ein neues Anlagendesign für die hier diskutierten Anwendungen vorgeschlagen, welches die erforderlichen Kälteleistungen abdeckt. Hierbei handelt es sich um ein kleines zweistufiges Kaskadensystem mit Ammoniak und CO₂ [UNEP 2010].

Der Einsatz von Kohlenwasserstoffen ist zwar technisch möglich, wird derzeit aber in Einzelanlagen aus Sicherheitsgründen meist nicht realisiert. Im Vergleich zu steckerfertigen Geräten, die meist mit geringen Kältemittelmengen auskommen, werden hier, z. B. im Verflüssigungssatz einer Fleischerei, weit über 500 g Kältemittel eingesetzt [Danfoss 2003a; TÜV Süd 2003a]. In Ländern mit strengen Vorschriften zu fluorierten Treibhausgasen werden Verflüssigungssätze mit Kohlenwasserstoffen laut UNEP [UNEP 2010] aber durchaus realisiert.

Bis heute hat kein Hersteller Kompressoren und/oder Anlagen mit CO₂ als Kältemittel entwickelt [UNEP 2010]. Wegen der Entwicklung von CO₂-Kompressoren kleiner Leistung für steckerfertige Geräte, wird der CO₂-Einsatz aber zukünftig für diese Anwendung nicht ausgeschlossen.

Schlussfolgerungen

Halogenfreie Lösungen sind auch für Einzelanlagen teilweise verfügbar, müssen ihre Praxistauglichkeit aber zum Teil noch unter Beweis stellen.

In Anlagen kleinerer Füllmengen ist der Einsatz von Kohlenwasserstoffen möglich. Ob Kohlenwasserstoffe zukünftig in mehr Ländern auch in dieser Anwendung eingesetzt werden, hängt sicher auch mit den Entscheidungen für andere Bereiche zusammen. So könnte die Erhöhung der zugelassenen Menge an brennbaren Kältemitteln in Geräten einen Anstoß geben.

CO₂ findet heute in Einzelanlagen noch keinen Einsatz. Aber auch hier ist mit einer dynamischen Entwicklung zu rechnen, die stark von den Entwicklungen in anderen Anwendungsbereichen abhängt.

Aktuelle Zielstellung sollte neben der Weiterentwicklung von Systemen mit natürlichen Kältemitteln weiterhin die technische Optimierung (Emissionsreduktion, Füllmengenreduktion, Verringerung des Energieverbrauchs) sein.

3.3.2.3 Verbundanlagen (Supermarktkälte)

Verbundanlagen (s. auch Kap. 3.3.2) unterscheiden sich in der Wahl des Kältemittels, der Art der Kälteverteilung und der Art der Kühlung des Verflüssigers. Sie werden als direkte oder als indirekte Systeme (Zweikreisanlage, Sekundärkreislaufanlage) ausgeführt. Bei den weiter verbreiteten direkten Systemen (Direktverdampfung) wird das Kältemittel direkt an die Kühlstellen (= Verbraucher, z. B. Kühlmöbel) geleitet. Kälteanlage und Kühlstellen sind hierzu über verzweigte Rohrleitungssysteme verbunden, in welchen das Kältemittel zirkuliert. Bei indirekten Systemen wird die Kälte über einen flüssigen (z. B. Propylenglykol), schmelzenden (Eisbrei) oder verdampfenden (meist CO₂) Kälteträger an die Kühlstellen abgegeben, während das eigentliche Kältemittel auf das Kälteaggregat

beschränkt bleibt. Eine Variante sind sogenannte „distributed systems“, bei denen ein oder mehrere Verdichter im Verbund zusammen mit einem meist wassergekühlten Verflüssiger als schallisolierte Einheiten gebündelt und in unmittelbarer Nähe zu den Kühlstellen, meist im Verkaufsraum, aufgestellt sind. Diese Systeme sind vor allem in den USA verbreitet [Kauffeld 2007; UNEP 2006]. Ein Überblick über 16 verschiedene Typen von Verbundanlagen findet sich bei Harnisch u. a. [Harnisch u.a.2008].

Die meisten Verbundanlagen verfügen über getrennte Systeme für den Bereich der Tiefkühlung (TK: Produkttemperatur ca. -18°C, Verdampfungstemperaturen von -35 bis -40°C) und den Bereich der Normalkühlung (NK: Produkttemperatur ca. 0 bis +8°C, Verdampfungstemperaturen von -15 bis +1°C). Teilweise werden verschiedene Kältemittel für die beiden Temperaturbereiche eingesetzt. Die Kälteleistungen von Verbundanlagen können zwischen 20 kW und > 1 MW variieren [UNEP 2003; UNEP 2006].

Verbundanlagen werden in Teilen mittels lösbarer Verbindungen installiert, wobei in indirekten Anlagen die eigentliche Kälteanlage sehr kompakt konstruiert sein kann und die Verwendung von fabrikgefertigten Einheiten möglich ist. Das Kältemittel wird erst nach der Installation der Anlage eingefüllt. Die Füllmengen variieren stark in Abhängigkeit von der Kälteleistung und der Art der Anlage. Für eine übliche Direktverdampfer-Verbundanlage im Supermarkt gibt das FKW [FKW 1998b] eine Füllmenge von 300 kg an, wobei auf eine große Schwankungsbreite hingewiesen wird. Hierzu ist außerdem anzumerken, dass Supermärkte in Deutschland im Vergleich zu anderen Ländern eher klein sind [Harnisch u. a. 2003]². Indirekte Anlagen enthalten wesentlich geringere Kältemittelfüllmengen (s. Abschnitt Minderungsmöglichkeiten).

In deutschen Supermärkten mit Verkaufsflächen von mehr als 400 m² waren im Jahr 2008 knapp 36.000 zentrale Kälteanlagen installiert [Forschungsrat 2009]. Diese Anlagen sowie die meisten neu installierten Anlagen sind in der Regel als Direktverdampfer-Verbundanlagen mit ausschließlich HFKW (meist R 404A und/oder R 134a) ausgeführt. Indirekte Systeme mit HFKW sind selten [Harnisch u. a. 2003].

Die auf die Füllmenge bezogenen jährlichen Emissionsraten dieser Anlagen sind mit bis zu 15 % bei Altanlagen [Schwarz 2005] hoch. Neuanlagen haben geringere Emissionsraten (siehe weiter hinten). Im Anwendungsfeld Gewerbekälteanlagen haben Verbundanlagen die größte Relevanz in Bezug auf die HFKW-Emissionen.

² UNEP [2006] gibt für große Supermarktanlagen Füllmengen von 800-2000 kg an.

Minderungsmöglichkeiten

Mit unterschiedlichen Konzepten werden Kohlenwasserstoffe, CO₂ und Ammoniak als Kältemittel eingesetzt. Entsprechende Anlagen sind in mehreren Ländern Europas realisiert und haben den Stand der Technik erreicht. Verschiedene Hersteller hatten bis zum Jahr 2009 europaweit insgesamt mehrere Hundert CO₂-Kaskadenanlagen (CO₂ in der TK-Stufe, meist HFKW in der NK-Stufe), etwa 300 CO₂-Direktverdampfungsanlagen (NK und TK), ca. 80 Ammoniak-, 20 Propen- und 4 Propan-Kälteanlagen in Supermärkten installiert [Harnisch u. a. 2008]. Aufgrund der Entscheidung zweier Discounter und einiger Supermarkt-Betreiber, vermehrt oder sogar ausschließlich auf natürliche Kältemittel zu setzen, hat sich die Anlagenzahl in Deutschland seitdem noch erhöht.

Kohlenwasserstoffe und Ammoniak

Kohlenwasserstoffe und Ammoniak sind thermodynamisch ideale Kältemittel. Wegen ihrer Brennbarkeit und/oder der Toxizität ist ihr Einsatz jedoch in Bereichen mit Publikumsverkehr limitiert: Für diese Anwendungen muss ein Sekundärkreislauf (indirektes System) eingeführt werden. Das Kältemittel bleibt dann auf den Primärkreislauf beschränkt, der sich meist in einem separaten Raum (Maschinenraum) oder außerhalb des Gebäudes befindet. Durch die räumliche Trennung von Kältemittel und (Laden)Räumen mit Publikumsverkehr wird auch im Fall einer Leckage (Havarie) die Sicherheit gewährleistet [TÜV Süd 2003a].

Indirekte Anlagen haben eine Reihe von Vorteilen gegenüber Direktverdampfungssystemen, weshalb sie in einigen Ländern (z. B. Schweiz, Luxemburg und Nordamerika) in größerer Stückzahl eingesetzt werden. Zu den von Kauffeld [Kauffeld 2007] genannten Vorteilen zählen:

- Verwendung fabrikgebauter primärer Kälteanlagen mit hohem Qualitätsstandard und niedrigerem Leckagepotenzial,
- geringere Ölmengen in den Kälteanlagen mit deutlich kleinerem kältemittelseitigen Volumen,
- besonders einfache Wärmerückgewinnung, sofern die Verflüssigerwärme über einen separaten Wasser-Glykol-Kreislauf an die Umgebungsluft abgegeben wird,
- konstantere Lufttemperaturen und Luftfeuchte in den Verkaufsmöbeln (geringerer Gewichtsverlust bei unverpackten Waren bei höherer Luftfeuchte),
- weniger Abtauzyklen und damit geringerer Energieverbrauch für die Abtauung,
- längere Verdichterlaufzeiten bzw. geringeres Takten der Verdichter, da der Kälte Träger eine gewisse Speicherfunktion übernimmt und
- Einsatzmöglichkeit für meist preiswertere Kunststoffrohre und –fittings.

In Deutschland gab es bis zum Jahr 2010 nur sehr wenige indirekte Kälteanlagen und daher auch wenig Erfahrungen in diesem Bereich. Aufgrund der Entscheidung des Unternehmens

Lidl, ab dem Jahr 2010 alle neuen Lidl-Filialen mit einem neuen Kälteanlagenkonzept auszustatten, könnte sich dies zukünftig ändern. Lidl setzt in neuen Filialen auf Kohlenwasserstoff-Integralanlagen, die den gesamten Wärme- und Kältebedarf der Filialen decken. Damit werden nicht nur klimaschädliche HFKW-Kältemittlemissionen vermieden, sondern auch energiebedingte CO₂-Emissionen verringert [Lidl 2010].

Die erforderlichen Sicherheitsvorkehrungen und die Auslegung als Zweikreislanlagentechnik erhöhen die Investitionskosten von Anlagen mit Kohlenwasserstoffen oder Ammoniak [Axima 2003a; Bock 2003]. Für den Sekundärkreislauf sind zusätzliche Wärmetauscher und eine Pumpe erforderlich. Theoretisch führt dies neben höheren Investitionskosten auch zu einem höheren Energieverbrauch der Anlage. In der Praxis zeigt sich, dass die Energieverbräuche von Kälteanlagen im Bereich der Normalkühlung eher in der gleichen Größenordnung oder niedriger liegen als die von Direktverdampfungsanlagen, wohingegen Kälteanlagen für die Tiefkühlung auch mehr Energie verbrauchen können. Lidl geht von insgesamt deutlich verringerten Kosten für die neuen, mit indirekten Anlagen ausgestatteten Filialen aus, da die Investitions-Mehrkosten der Kälteanlage durch wesentlich verringerte Betriebskosten überkompensiert werden. Laut Literaturangaben und Aussagen von Anwendern ist der Energieverbrauch von indirekten Ammoniak- und Kohlenwasserstoff-Anlagen (NK + TK) rund 5-20 % höher, kann aber laut Herstellerinformationen bei (teureren) Anlagen der neuesten Generation auf das gleiche Niveau gesenkt werden. Die Investitionskosten für indirekte Anlagen sind etwa 0-35 % höher, wohingegen die Betriebskosten (inkl. Wartungskosten) meist niedriger sind [siehe z. B. Harnisch u. a. 2008]. Die Aussagen betreffen Standardanlagen und beziehen innovative Konzepte (siehe Integralanlage) nicht mit ein.

Genaue Berechnungen der Energieeffizienz von Verbundanlagen sind schwierig, da der Energieverbrauch von vielen - auch äußeren - Faktoren beeinflusst wird; eine einheitliche Methode zur Klassifizierung/Messung existiert nicht. Die Ermittlung der Energieaufnahme einzelner Kühlmöbel ist zwar relativ unproblematisch und kann in Anlehnung an Europäische Normen (z. B. DIN EN ISO 23953-2 [DIN 2006]) erfolgen. Für die Ermittlung der Energieeffizienz muss hingegen zunächst eine Bezugsgröße (z. B. Inhalt, Sichtöffnung, Kühlregalfläche) definiert werden, deren Wahl das Ergebnis entscheidend beeinflusst. Teilweise zeigt sich beim Vergleich von Energieverbräuchen von weitgehend gleichen Supermarkt-Kälteanlagen, dass die Schwankungsbreite im Energiebedarf viel größer ist, als die angegebenen Unterschiede [ILK 2003a].

Selbst wenn ungünstige Energieverbräuche zu Grunde gelegt werden, schneiden Zweikreislanlagen mit halogenfreien Alternativen bei Betrachtung des TEWI günstiger ab. Da sich der TEWI - wie in der Einleitung zum Kapitel 3.3 beschrieben - aus den indirekten (Energieverbrauch) und den direkten (Kältemittel) Emissionen zusammensetzt, hängt das Ergebnis neben dem Energieverbrauch auch von der angenommenen Emissionsrate und damit von der Verlustrate der Anlage (inkl. Herstellungsemissionen, regulären Emissionen

(= Emissionsrate), Havarie-bedingten Emissionen) ab. Bei Emissionsraten von 10 % ($\triangleq$ 11,65 % Verlustrate), 5 % ($\triangleq$ 6,15 % Verlustrate), und – mit einer Ausnahme – sogar noch bei 2 % ($\triangleq$ 2,65 % Verlustrate) ermittelten Harnisch u. a. [Harnisch u. a. 2008] für HFKW-Direktverdampfungssysteme höhere (= ungünstigere) TEWI-Werte als für indirekte Anlagen.

Aktuelle Berechnungen von spezifischen Vermeidungskosten (Kosten je Tonne vermiedenem CO₂-Äquivalent) haben Harnisch u. a. [Harnisch u. a. 2008] veröffentlicht. Die Autoren haben für die Berechnung die Mehrkosten gegenüber einer R 404A-Referenzanlage herangezogen, wobei sie sowohl die Investitions-, die Energie- und die Vollarbeitshaltungskosten einbezogen haben. Da sich diese Kosten in Abhängigkeit vom Anlagenstandard und von den Rechtsvorschriften zu Wartung und Dichtheitsprüfung ändern, haben die Autoren drei Szenarien festgelegt und durchgerechnet. Im Ergebnis kommen sie in einem Fall zu negativen spezifischen Vermeidungskosten³ und ansonsten zu spezifischen Vermeidungskosten von bis zu mehreren Hundert € / t CO₂-Äquivalent. Für Einzelheiten zu den zu Grunde gelegten Annahmen und Ergebnissen wird auf die Quellstudie verwiesen.

Kohlendioxid (CO₂)

Seit einigen Jahren gibt es Anlagen mit CO₂ als (verdampfendem) Kälteüberträger (analog Zweikreisanlage, siehe weiter vorne), CO₂-Kaskaden-Anlagen und transkritische CO₂-Direktverdampfungsanlagen. Bei CO₂-Kaskaden-Anlagen und transkritischen CO₂-Direktverdampfungsanlagen wird CO₂ nicht als Kälteüberträger, sondern als Kältemittel eingesetzt. Für indirekte Anlagen und CO₂-Kaskaden-Anlagen, in denen CO₂ subkritisch für den TK-Bereich verwendet wird, wird für die Normalkühlung ein weiteres Kältemittel benötigt. Aber auch für CO₂-Direktverdampfungsanlagen (TK + NK), die zur Verflüssigung des CO₂ in Kaskade zu einer weiteren Kälteanlage geschaltet sind, wird ein weiteres Kältemittel benötigt. Als weitere Kältemittel kommen HFKW, Ammoniak oder Kohlenwasserstoffe in Betracht.

CO₂-Kaskadenanlagen für den Bereich der Tiefkühlung haben seit geraumer Zeit die Pilotphase erfolgreich durchlaufen und sind inzwischen Standard-Anlagen anzusehen. Für den Frischhalte-Bereich (NK, Hochdruckseite der Anlage) ist der Einsatz von CO₂ wegen der hohen Drücke (bis zu 120 bar) technisch schwieriger. Eine Voraussetzung für die Realisierung solcher Anlagen war die Bereitstellung der erforderlichen Komponenten für diese Drucklagen. Zwar standen bis 2008 alle Komponenten zur Verfügung, teilweise aber noch nicht als (preiswerte) Serienprodukte. Verbundanlagen mit CO₂ als Kältemittel auch

³ Annahme: hohe Anforderungen an die Referenzanlage. Vergleichsanlage: kleine indirekte Kohlenwasserstoffanlage (nur NK).

für den Bereich der Normalkühlung mit überkritischer Betriebsweise und hohen Drücken hatten Hersteller zunächst nur als Pilot-Anlagen installiert. Mit einer Serienproduktion der Komponenten haben Hersteller gerechnet, sobald ab 2008 bis 2010 Anlagen in größerer Stückzahl installiert werden [Brouwers 2007; Tillner-Roth 2008 aus: Harnisch u. a. 2008]. Dazu passt die Entscheidung von ALDI SÜD, beginnend im Januar 2010 alle neuen Filialen mit CO₂OLtecTM CO₂-Kältesystemen von Carrier auszustatten [Presseportal 2009]. Auch andere Betreiber haben inzwischen transkritische CO₂-Anlagen installieren lassen.

Bereits nach der Deutschen Kälte-Klima-Tagung des Jahres 2007 in Hannover hat die KK [KK 2008b] zusammenfassend zum Entwicklungsstand von CO₂-Kälteanlagen festgestellt: „CO₂ als Kältemittel hat in den Tieftemperaturstufen von Kaskadenanlagen seine Tauglichkeit nachgewiesen und wird umfassend und vorteilhaft verwendet. Als Universalkältemittel, also auch in der transkritischen Verwendung für die Normalkühlung, ist es auf dem Vormarsch. Es ist begründet zu erwarten, dass die doch schon zahlreichen Prototypausrüstungen von Supermärkten mit Anlagen, in denen ausschließlich CO₂ eingesetzt wird, für beide Temperaturstufen bald zur Standardlösung werden.“

Obwohl Kaskaden bei theoretischer Betrachtung energetische Nachteile haben, hat sich in der Praxis gezeigt, dass sie im Supermarkt energetisch konkurrenzfähig sind [Linde 2003; Haaf, Heinbokel 2002; Sienel 2007 aus: Harnisch u. a. 2008; Harnisch u. a. 2008]. Einige Veröffentlichungen bestätigen sogar einen niedrigeren Energieverbrauch als für vergleichbare einstufige HFKW-Anlagen [Rees 2007 u. a., aus Harnisch u. a. 2008]. So kann man den Kaskadentauscher mit sehr kleinen Temperaturabständen von 2 bis 3 Kelvin betreiben. Eventuell vorhandene energetische Nachteile auf der Hochdruckseite können durch einen Gewinn auf der Niederdruckseite ausgeglichen werden, der sich mit CO₂ wegen der höheren Drucklage aus den geringeren relativen Druckverlusten bei den in Supermärkten üblichen, sehr langen Rohrsystemen ergibt. Die bei HFKW-404A auftretenden, mehrfachen kleinen Druckabfälle sind bei CO₂ fast nicht gegeben. Die Wärmeübergangswerte sind bedeutend besser. CO₂-Kaskadenanlagen sind inzwischen weltweit installiert. So wurden beispielsweise CO₂-Ammoniak-Kaskadenanlagen in Supermärkten in Südafrika installiert. Dieses von GTZ Proklima durchgeführte und vom deutschen Umweltministerium im Rahmen der Klimaschutzinitiative finanzierte Projekt führte zu Einsparungen beim Energiebedarf von bis zu 30 % im Vergleich zu den alten R-22-Anlagen [GTZ 2010].

Verschiedene Hersteller haben Vergleichsmessungen zum Energieverbrauch von transkritischen CO₂-Direktverdampfungsanlagen und HFKW-Standardanlagen durchgeführt. Ein guter Überblick zu den Ergebnissen und zu Verbesserungsmöglichkeiten der Energieeffizienz findet sich in Harnisch u. a. [Harnisch u. a. 2008]. Im Ergebnis ist festzuhalten, dass heutige CO₂-Direktverdampfungsanlagen einen zu HFKW-Standardanlagen mindestens gleichwertigen Energieverbrauch haben und

Verbesserungspotenziale noch nicht voll ausgeschöpft sind. Entsprechende kostengünstige Maßnahmen brächten bei anderen Kältemitteln geringere Erfolge [KK 2005].

Transkritische CO₂-Direktverdampfungsanlagen emittieren nach aktuellen TEWI-Berechnungen von Harnisch u. a. [Harnisch u. a.2008] signifikant weniger Treibhausgase pro Jahr als HFKW-Direktverdampfungsanlagen (Referenzanlage: R 404A). Für die betrachteten Kaskadenanlagen sind die Ergebnisse differenzierter: Während die Kaskaden mit natürlichen Kältemitteln oder R 134a in der NK-Stufe geringere Treibhausgasemissionen haben, emittiert die R 404A/744-Vergleichsanlage geringfügig mehr Treibhausgase. Letzteres ist auf die der Berechnung zu Grunde liegende Annahme größerer HFKW-Füllmengen für diese Anlagen zurückzuführen. Abbildung 3.6 zeigt auszugsweise die jährlichen Treibhausgasemissionen pro laufendem Meter Kühlmöbel für Verbrauchermärkte. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, sind alle Varianten ohne Wärmerückgewinnung berechnet. Grundsätzlich kann bei allen Anlagentypen eine Wärmerückgewinnung erfolgen. Dies hat einen Einfluss auf die Höhe der THG-Emissionen, nicht jedoch auf die Reihenfolge der Auslegungsvarianten in Abb. 3.6. Transkritische CO₂-Direktverdampfungsanlagen haben zudem den Vorteil, die Abwärme auf einem höheren Temperaturniveau bereit stellen zu können, so dass auch Brauchwasser erwärmt werden kann.

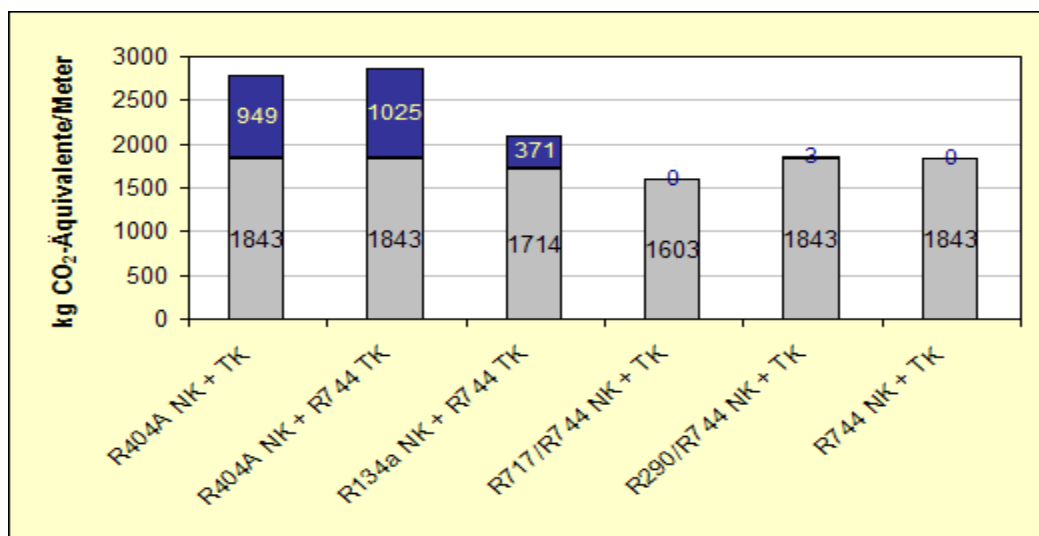


Abbildung 3.6: Jährliche THG Emissionen pro laufendem Meter Kühlmöbel für Verbrauchermärkte mit verschiedenen Auslegungsvarianten (Emissionsrate 10 %, Verlustrate 11,65 %) [nach Harnisch u. a. 2008].

Die Investitionen für Kaskadenanlagen mit CO₂ für die Tiefkühlung liegen heute in der gleichen Größenordnung wie die für HFKW-Direktverdampfungsanlagen. Je nach Ausführung der Kaskade können die Kosten jedoch höher ausfallen. Hintergrund für die

Kostenunterschiede sind höhere Komponentenkosten für die CO₂-Anlage auf der einen Seite, der Kostenverringerungen durch kleinere Dimensionen des Rohrleitungsnetzes und der Verdichter auf der anderen Seite gegenüberstehen. Bei den Betriebs- und Wartungskosten (Vollinstandhaltungskosten) hängt die Höhe der Kosten für die HFKW-Anlage u. a. von den gesetzlichen Vorgaben zur Wartung und Dichtheitsprüfung ab. Legt man die heute hierzu geltenden Rechtsvorschriften zu Grunde, dürften diese Kosten für HFKW-Anlagen weit höher sein als für Kaskadenanlagen mit natürlichen Kältemitteln.

Die Kosten für transkritische CO₂-Anlagen lagen im Jahr 2007 etwa 30 % über den Kosten für direktverdampfende HFKW-Standardanlagen, da es sich um Einzelanfertigungen, welche nicht serienmäßig hergestellte Komponenten enthalten, handelte. Diese Mehrkosten lassen sich nach Ansicht von Experten kurz- bis mittelfristig (ab Serienproduktion der Anlagen) auf 20 % reduzieren [Expertenkreis 2007]. Gleichzeitig gehen die Experten von einer Kostensteigerung für HFKW-Standardanlagen um etwa 15 % im Zusammenhang mit der Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Emissionsraten aus. Damit ist bei konsequenter Umsetzung der rechtlichen Anforderungen von einer Angleichung der Kosten für beide Anlagenarten auszugehen.

Auch für CO₂-Anlagen haben Harnisch u. a. [Harnisch u. a. 2008] aktuelle Berechnungen von spezifischen Vermeidungskosten (Kosten je Tonne vermiedenem CO₂-Äquivalent) veröffentlicht (siehe auch Abschnitt „Kohlenwasserstoffe und Ammoniak“). Die Spannbreite der Ergebnisse ist bedingt durch das gewählte, sehr große Annahmespektrum sehr groß: Für CO₂-Kaskadenanlagen kommen die Autoren auf spezifische Vermeidungskosten von -156,- bis +105,- €/Tonne CO₂-Äquivalent, für transkritische CO₂-Anlagen auf -172,- bis +178,- €/Tonne CO₂-Äquivalent. Für zukünftige Entscheidungen sind die niedrigen und/oder negativen spezifischen Vermeidungskosten heranzuziehen (s. Tab. 3.1), da nur diese die konsequente Umsetzung der bereits heute geltenden Vorschriften zu HFKW-Anlagen als Berechnungsgrundlage heranziehen. Für Einzelheiten zu den zu Grunde gelegten Annahmen und Ergebnissen wird auf die Quellstudie verwiesen.

Tabelle 3.1: Spezifische Vermeidungskosten in €/Tonne CO₂-Äquivalent für CO₂-Verbundanlagen (Kaskaden- und transkritische Direktverdampfungsanlagen) bezogen auf eine R404A-Direktverdampfungsanlage mit einer Emissionsrate von 2 %/a ($\triangleq$ 2,65 % Verlustrate) [nach Harnisch u. a. 2008]

Modelltechnologie	Investitions- mehrkosten [€]	Jährliche Mehrkosten [€]	Vermeidungs- kosten [€/Tonne CO₂]
Referenzanlage R404A	-	-	-
R134a NK + R744 TK (Verbrauchermarkt)	3.958	-1.500	99,-
R717/R744 NK + TK (Verbrauchermarkt)	5.980	-6.750	-18,-
R290/R744 NK + TK (Verbrauchermarkt)	62	-3.250	-156,-
Dir. 744 NK (Discounter)	432	-1.400	-172,-
Dir. 744 NK (Verbrauchermarkt)	2.281	-1.950	16,-
Dir. 744 NK (SB-Warenhaus)	4.932	-4.000	10,-

Verringerte HFKW-Füllmengen

In einigen Ländern, wie z. B. Schweden, werden indirekte Systeme auch eingesetzt, um die Gesamtmenge eingesetzter HFKW gegenüber direkt verdampfenden Systemen deutlich zu reduzieren [UNEP 2003; Harnisch u. a. 2003]. Wegen des möglichen Einsatzes von fabrikgefertigten Einheiten und durch die geringere Kältemittelfüllmenge lassen sich die Kältemittlemissionen bei diesen Anlagen oft erheblich reduzieren.

Außer indirekten Systemen können auch „distributed systems“ (siehe weiter vorne) zu einer Reduktion der Füllmenge beitragen. So sind die Kältemittelfüllmengen von „distributed systems“ im Vergleich zu Direktverdampfungsanlagen um bis zu 75 % geringer [UNEP 2006]. Andere Quellen sprechen von 30-50 % verringerter Füllmenge [Kauffeld 2007].

Eine weitere Möglichkeit der Reduktion der Kältemittelmenge bei HFKW-Anlagen besteht in der Verwendung von Microchannel-Profilen in Wärmeaustauschern, wodurch sich gleichzeitig auch der Wirkungsgrad verbessert [Kauffeld 2007].

Schlussfolgerungen

Verbundanlagen sind die größte HFKW-Emissionsquelle im Anwendungsbereich Gewerbekälte; einem Bereich, auf den im Jahr 2007 31 % aller HFKW-Emissionen (38 % der Emissionen des Bereichs Kälte/Klima) entfielen (s. Abb. 3.4 und Tab. 2.1). Daher sind Emissionsminderungsmaßnahmen in dieser Anwendung besonders wichtig.

Bei den Maßnahmen muss zwischen Alt- und Neuanlagen unterschieden werden.

Neuanlagen

Von allen möglichen Maßnahmen ist die Installation HFKW-freier Anlagen aus Gründen des Klimaschutzes eindeutig zu bevorzugen.

Anlagen ohne HFKW sind bereits heute Stand der Technik, so dass in den überwiegenden Fällen auf halogenfreie Kältemittel zurückgegriffen werden kann. Dies entspricht einer HFKW-Füllmengen- und damit HFKW-Emissionsreduktion um 100 %. Wegen des günstigeren TEWI der HFKW-freien Anlagen führt diese Maßnahme zur größten Emissionsminderung klimaschädlicher Emissionen. Darüber hinaus kann bei einigen der zum Teil erst seit wenigen Jahren auf dem Markt vorhandenen Anlagen noch weiteres Optimierungspotenzial angenommen werden.

Bei Neubauten können HFKW-freie Anlagen bereits bei der Planung vorgesehen werden. Bei der Installation neuer Kälteanlagen in bestehende Gebäude können Umbauten der Betriebsräume erforderlich sein.

Die Installation HFKW-freier Anlagen ist in vielen Fällen noch mit höheren Investitionskosten verbunden. Experten gehen für viele der möglichen Technologien aber von einer weiteren Kostenangleichung in naher Zukunft aus. Ob wirklich höhere Kosten entstehen, muss ohnehin im Einzelfall geprüft werden, da in der Praxis gegenteilige Beispiele zu finden sind. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei Verwendung von HFKW aufgrund der inzwischen hohen gesetzlichen Anforderungen an die Anlagendichtheit mit höheren Investitions- und auch Wartungskosten zu kalkulieren ist.

Ist der Einbau einer HFKW-freien Kälteanlage nicht realisierbar, kann die Reduzierung der regulären Kältemittel-Emissionen am wirkungsvollsten über die Reduzierung der Kältemittelfüllmenge und die Verbesserung der Anlagendichtheit erreicht werden.

Eine Reduzierung der Kältemittelfüllmenge ist durch technische Maßnahmen und durch eine Optimierung der Anlagenauslegung (Kälteleistung) möglich. Am wirkungsvollsten ist jedoch die Installation indirekter Anlagen. Gleichzeitig bleibt das Kältemittel damit auf einen engen, leicht überprüfbaren Raum begrenzt.

Altanlagen

Die Reduzierung der Kältemittel-Emissionen bei bestehenden Anlagen kann meist nur durch technische Maßnahmen zur Verbesserung der Anlagendichtheit und durch regelmäßige Kontrolle der Dichtheit erreicht werden, wie sie inzwischen rechtlich verbindlich vorgeschrieben sind. Dies ist - in Abhängigkeit vom Zustand der Anlage - mit erheblichem personellen und technischen Aufwand verbunden und kann in einer deutlichen Erhöhung der Betriebskosten resultieren.

Im ungünstigsten Fall kann daher ein Anlagenaustausch (siehe Neuanlagen) erforderlich sein, um die vorhandene Emissionen und die laufenden Kosten zu reduzieren.

3.3.3 Industrielle Kälteerzeugung (Industrieanlagen, Kühllhäuser, Lebensmittelverarbeitung etc.)

Unter dem Begriff „industrielle Kälteerzeugung“ können je nach Definition verschiedene Anwendungen zusammengefasst werden. In dem hier vorliegenden Bericht werden unter diesem Begriff die folgenden Bereiche zusammengefasst, ohne jedoch alle Bereiche im Detail zu betrachten:

- Lebensmittelproduktion/-verarbeitung,
- chemische und pharmazeutische Industrie,
- Öl-, Gas- und Kunststoffindustrie,
- Kühllhäuser,
- Sport- und Freizeitanlagen,
- Landwirtschaft,
- Metallindustrie und
- Großwärmepumpen.

Bis zur Entwicklung der FCKW waren für die industrielle Kälteerzeugung die Kältemittel CO₂ und insbesondere Ammoniak Standard. Während sich Ammoniak in vielen, vor allem größeren Anwendungen immer behaupten konnte, war CO₂ für lange Zeit vom Markt verschwunden. Jedoch konnte CO₂ bereits vor etlichen Jahren wieder erfolgreich in der industriellen Kälte eingesetzt werden und sich bis heute immer mehr etablieren. Der Einsatz von Kohlenwasserstoffen ist von eher untergeordneter Bedeutung.

Neben Kompressionskälteanlagen werden auch in der Industrie Absorptionskältemaschinen eingesetzt. Auch der Einsatz von Adsorptionsanlagen ist möglich. Beide Technologien, die in Abhängigkeit vom Anwendungsfall geeignete Ersatztechnologien für Kompressions-

anlagen darstellen, sind kurz in Kapitel 3.3.1 (Grundlagen) und in Kapitel 3.3.5.2 (Anwendung) beschrieben und werden hier nicht weiter betrachtet.

Der Einsatz von FCKW und HFCKW erfolgte in vielen industriellen Anwendungen, in denen sie zum Teil durch FKW und HFKW, vor allem das Kältemittel R 404A [KK 2009a], häufig aber auch durch halogenfreie Kältemittel ersetzt wurden und werden.

Im Jahr 2007 wurden etwa 500 t HFKW als Kältemittel in der Industriekälte zur Herstellung von Neuanlagen verwendet. Etwa 470 t HFKW und 0,8 t FKW (zusammen 0,9 Millionen t CO₂-Äquivalente) sind im Jahr 2007 emittiert (s. auch Abb. 3.4). Der Gesamtbestand im Jahr 2007 betrug in der Industriekälte etwa 5.000 t [BReg 2009]. An den HFKW-Emissionen aus dem Bereich Kälte/Klima hat die Industriekälte einen Anteil von etwa 8 % und ist damit trotz der großen Anlagenzahl und der oft großen Kältemittelfüllmengen von eher geringerer Bedeutung. Dies hängt vor allem mit dem bereits heute vorhandenen hohen Anteil halogenfreier Kältemittel in diesem Bereich zusammen. Durch die meist großen Mengen an HFKW oder FKW pro Anlage können die Emissionen einzelner Anlagen jedoch sehr groß sein. In der Regel liegen keine oder nur grobe Schätzungen bezüglich sektorbezogener HFKW-Emissionen vor (s. Kap. 3.3.3.1 bis 3.3.3.7).

3.3.3.1 Lebensmittelverarbeitung

Unter dem Begriff Lebensmittelindustrie werden alle lebensmittelverarbeitenden Industrien zusammengefasst. Neben Molkereien und Brauereien sind dies z. B. Schlachthöfe, Großbäckereien, Kaffeeröstereien und Schokoladenfabriken. Die installierten Kälteleistungen sind hier meist größer als in den zuvor behandelten Anwendungen und gehen bis zu mehreren Megawatt (MW).

Als Kältemittel für Neuanlagen werden in der lebensmittelverarbeitenden Industrie heute überwiegend Ammoniak und auch CO₂ eingesetzt. In Altanlagen findet sich aber auch noch oft R 22. Der Einsatz von R 22 in Neuanlagen ist in Deutschland bereits seit dem 1. Januar 2000 verboten. FCKW kamen zwar bis zu ihrem Verbot Mitte der neunziger Jahre zum Einsatz, sie waren aber schon damals von geringerer Bedeutung [UNEP 2003; UBA 1989; FKW 1998b]. Die Umrüstung bestehender R 22-Anlagen fand trotz des im Jahr 2010 bevorstehenden Verkaufsverbots von neu produziertem R 22 nur in geringem Umfang statt. Im Jahr 2006 in Frankreich durchgeführte Erhebungen haben ergeben, dass noch etwa die Hälfte aller Kälteanlagen in der Lebensmittelerzeugung R 22 enthalten. KK [2009b] geht davon aus, dass diese Zahlen sich auf Deutschland übertragen lassen und noch geschätzte 4.000 t R 22 in entsprechenden Anlagen vorhanden sind. Für Umrüstungen werden meist, wie zum Teil auch in Neuanlagen, HFKW-Gemische als Kältemittel eingesetzt [FKW 1998b; FKW 2001].

In Bezug auf die Bereitstellung von Kälte kommt der Lebensmittelverarbeitung im Bereich der Industriekälte zwar eine große Bedeutung zu. In den meist großen Anlagen wird aber

schon aus energetischen Gründen oft Ammoniak und seit einigen Jahren auch CO₂ eingesetzt. Die aus der Kältebereitstellung in der Lebensmittelverarbeitung resultierenden HFKW-Emissionen betrugen im Jahr 2001 knapp 120 t [Schwarz 2003b].

Minderungsmöglichkeiten

In Einzelfällen kommen natürliche Kältemittel wie CO₂ und Ammoniak auch für die Umrüstung von FCKW / HFCKW-Anlagen in Frage [UNEP 2003; Gebhardt 2000; Gebhardt 2002b]. Wegen Materialunverträglichkeiten oder höherer Drücke ist dies aber in der Regel schwierig [Witt 2009].

„Für Neuanlagen sind natürliche Kältemittel in der Industriekälte schon allein aus Gründen der Energieeffizienz – Ammoniak ist das anerkannt wirtschaftlichste Kältemittel überhaupt – immer bevorzugt eingesetzt worden“ [Witt 2009]. So ist Ammoniak auch in der Lebensmittelindustrie das übliche Kältemittel. Es eignet sich besonders für industrielle Zwecke über –35 °C. In der industriellen Kälte sind auch direkte Kälteanlagen mit Ammoniak einsetzbar. Ammoniak-Anlagen sind in den hier üblicherweise benötigten Leistungsbereichen energetisch effizient und kostengünstig. Wegen ihrer energetischen Effizienz tragen Ammoniak-Anlagen auch zu einer Reduktion der Gesamtreibhausgasemissionen bei.

Neben reinem Ammoniak findet seit einigen Jahren auch ein Gemisch aus Ammoniak und Dimethylether (DME) Anwendung in Kälteanlagen der Lebensmittelindustrie. Dieses als R 723 bezeichnete Gemisch hat ein sehr geringes Treibhauspotential von 8. Ein Anwendungsbeispiel aus der Lebensmittelverarbeitung ist die Südbayerische Fleischwaren GmbH. In deren Werk in Obertraubling bei Regensburg wurden zwei R 723-Verbundanlagen mit jeweils 150 kW Kälteleistung installiert [KK 2009a].

Vermehrt wird seit einigen Jahren auch wieder CO₂ in Neuanlagen eingesetzt. Entweder als Kältemittel der unteren Stufe von Kaskadensystemen oder als Kälteträger. Der Einsatz von CO₂ in transkritischen Kälteanlagen wird derzeit laut Herstellerangaben für die industrielle Kälteerzeugung nicht angestrebt, u. a. aus energetischen Gründen [Danfoss 2007]. Jedoch führt UNEP [UNEP 2009] CO₂ als Kältemittel auch für transkritische industrielle Anwendungen auf, so dass die weitere Entwicklung industrieller Anlagen mit dem Kältemittel CO₂ abzuwarten bleibt.

Teilweise erfolgt die Verwendung von CO₂, um die eingesetzten Ammoniak-Mengen in den oft sehr großen Anlagen zu reduzieren und somit z. B. Genehmigungsverfahren zu vereinfachen [Axima 2003a; Danfoss 2010]. Dieser Trend kann schon seit fast zehn Jahren gerade bei sehr großen Anlagen nicht nur auf europäischer Ebene, sondern auch weltweit festgestellt werden.

Für den Einsatz von CO₂ als Kältemittel ist nicht die Anlagengröße, sondern die Temperatur entscheidend. CO₂ ist für Temperaturen unter –35°C sehr gut geeignet. In diesem

Temperaturbereich haben CO₂-Anlagen u. a. ökonomische Vorteile. Beispielsweise dadurch, dass aufgrund der hohen volumetrischen Kälteleistung von CO₂ der Bau von kompakten Anlagen (Anlagenkomponenten) möglich wird. Aber auch die gute Verfügbarkeit bei einem geringen Preis reduziert die Kosten. Zudem können CO₂-Kälteanlagen auch die Produktqualität positiv beeinflussen: Werden CO₂-Kaskadensysteme zum Schockfrost von Fisch eingesetzt, kann der Fisch aufgrund der hohen Effizienz der Anlage schneller und bei niedrigeren Temperaturen gefroren werden. Dies verbessert die Qualität. Zudem wird weniger Energie für diesen Prozess verbraucht, als beim Einsatz anderer Kältemittel [Danfoss 2007]. Für die Hochdruckseite kommen in CO₂-Kaskadenanlagen - abgesehen von HFKW (z. B. R 410A oder R507) - vor allem Ammoniak und unter thermodynamischen Gesichtspunkten auch halogenfreie Kohlenwasserstoffe als Kältemittel in Frage.

CO₂ als Kälteüberträger ist für Anwendungsbereiche mit niedrigen und mittleren (bis zu 0° C) Temperaturen sehr attraktiv [Danfoss 2007]. Realisiert wurden Anlagen mit CO₂ als Kälteüberträger wie auch zweistufige CO₂/Ammoniak-Kaskaden-Anlagen im Tiefkühlbereich (bis ca. -50°C) z. B. für Froster (Backwarenfroster und andere Lebensmittel) [eurammon 2002 , KK 2006b], Gefriertrocknung [Selmer 2001; Gebhardt 1999] und Brauereien [KK 2006b].

Eine weitere Möglichkeit Kälte (Kühlung) ohne den Einsatz von HFKW (oder mit geringen Mengen) zu erzeugen, ist die Verwendung von Eisbrei (als Kälteüberträger) in Verbindung mit einem (halogenfreien) Kältemittel. Eisbrei kann z. B. in der Fleischindustrie, in Brauereien und Obst- und Gemüseverarbeitung eingesetzt werden. Durch die höhere Fluidtemperatur und der daraus resultierenden höheren Verdampfungstemperatur im Vergleich zur Direktverdampfung oder zum Solebetrieb können nach Angabe eines Anbieters durch einen geringeren Energieverbrauch die Betriebskosten reduziert werden [Integral 2003]. Diese Aussage bezieht sich jedoch nicht speziell auf die Verwendung von Eisbrei in Kombination mit einem halogenfreien Kältemittel.

Die energetische Effizienz von Anlagen mit natürlichen Kältemitteln ist in der Industriekälte unbestritten. So zeigen Praxiserfahrungen bei der Kalkulationen von Förderanträgen immer wieder, dass Anlagen mit natürlichen Kältemitteln durch ihren besseren Wirkungsgrad bis zu 40 % unter den TEWI-Werten herkömmlicher Systeme liegen [KK 2009a].

Angaben zu den auf CO₂-Äquivalente bezogenen Vermeidungskosten stammen aus den Jahren 2000 und früher. Sie basieren auf dem damaligen Stand der Technik. Der oft sehr wirtschaftliche Einsatz von CO₂ als Kältemittel ist nicht berücksichtigt. Trotzdem sind die berechneten Vermeidungskosten mit 2,7 € je Tonne CO₂-Äquivalent für die vollständige HFKW-Substitution bei Neuanlagen [Harnisch, Hendriks 2000] und 20-30 € je Tonne CO₂-Äquivalent bei verringertem HFKW-Einsatz und einer signifikanten Reduktion der jährlichen HFKW-Leckagerate (Reduktion auf bis zu 3 %) bei den verbleibenden HFKW-

Anlagen [March 1998] gegenüber den geschätzten Kosten für eine reine Reduktion der Emissionen aus HFKW-Anlagen (62 € je Tonne CO₂-Äquivalent [Harnisch, Hendriks 2000]) niedrig. Gerade wegen der Weiterentwicklung auf dem Gebiet der natürlichen Kältemittel in den letzten zehn Jahren lassen diese Kostenschätzungen trotz aller Unsicherheiten die Aussage zu, dass der Ersatz von HFKW wirtschaftlich möglich ist und gegenüber technischen Emissionsminderungsmaßnahmen auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten bevorzugt werden sollte.

Die ökonomische und energetische Bewertung von CO₂-Anlagen, insbesondere von CO₂-Kaskaden (TK), war bereits Gegenstand mehrerer Untersuchungen, über die in der Literatur berichtet wurde. Verglichen wird in der Regel mit Ammoniak-Anlagen, da HFKW-Anlagen keine große Bedeutung in diesem Anwendungsfeld zukommt. Im Ergebnis werden die CO₂/Ammoniak-Anlagen als wirtschaftlich und energetisch effizient bewertet [z. B. Gebhardt 2002a; Gebhardt 2002b; Roth, König 2002].

Neben Kompressionskältemaschinen, auf die sich die obigen Ausführungen beziehen, werden in der Lebensmittelindustrie zum Teil Absorptionskältemaschinen eingesetzt, die grundsätzlich ohne HFKW auskommen. Auf Kapitel 3.1.2 wird verwiesen.

Schlussfolgerungen

Während vor wenigen Jahren noch R 22 und Ammoniak die Standardkältemittel in der Lebensmittelindustrie waren, beschränkt sich dies seit dem Verbot von R 22 auf Ammoniak und zunehmend CO₂ als Tieftemperaturkältemittel. Ammoniak-Anlagen zeichnen sich durch eine hohe Wirtschaftlichkeit und eine hohe energetische Effizienz aus. CO₂/Ammoniak-Anlagen haben ihre Wirtschaftlichkeit ebenfalls bereits unter Beweis gestellt und sind heute Stand der Technik.

HFKW sind in der Lebensmittelindustrie als Kältemittel vernachlässigbar und nicht erforderlich. Dies ist auf ihre geringere Wirtschaftlichkeit in diesem Anwendungsbereich zurückzuführen.

Bei der Beurteilung von Kosten sind grundsätzlich die Investitionskosten und die Betriebskosten einzubeziehen. Im Einzelfall zeigt sich erst hierdurch, dass HFKW-freie Anlagen die langfristig günstigere Alternative sind.

3.3.3.2 Chemische und pharmazeutische Industrie

In der chemischen und pharmazeutischen Industrie gibt es vielfältige Prozesse, die Kälte benötigen. In den meisten Fällen kommt Ammoniak zur Anwendung, teilweise auch halogenfreie oder halogenhaltige Kohlenwasserstoffe. CO₂ hat bisher keine Relevanz.

Der Einsatz halogenfreier Kältemittel ist nur in Ausnahmefällen nicht wirtschaftlich möglich. In diesen Fällen wurden bis zu ihrem Verbot FCKW, z. B. R 13, R 503, oder

bromierte Kältemittel, z. B. R 13B1, eingesetzt. Es handelt sich in der Regel um sehr spezielle Anwendungen mit besonderen Bedingungen. Genannt werden können z. B. Chlorverflüssigungsanlagen. Als FCKW-Ersatzstoffe werden in diesen - zuvor mit FCKW befüllten - Anlagen heute meist HFKW oder auch FKW eingesetzt.

Bei der Beurteilung, ob halogenfreie Kältemittel zur Verfügung stehen, ist vor allem zu unterscheiden, ob bestehende Anlagen umgerüstet oder komplett ausgetauscht werden sollen. So kann bei einem vollständigen Austausch (Neuanlage) häufig auf den Einsatz von FKW und HFKW verzichtet werden. Da es sich insgesamt um Spezialanwendungen handelt, wird der Bereich hier nicht näher diskutiert.

Ausschließlich auf diesen Industriezweig bezogene Angaben zu Kältemittlemissionen liegen nicht vor. Auf die besondere Problematik von FKW wird nochmals im Kapitel 3.3.8 eingegangen.

Turbo-Kältemaschinen

Teilweise kommen in der Industrie Prozessanlagen mit Kaltwasser- oder Soleumlauf zum Einsatz. Bei den meist hohen Kälteleistungen werden Turboverdichter eingesetzt. Daneben werden Turboverdichter in industriellen Anwendungen auch in direkten Anlagen eingesetzt. Zu diesen Turbo-Kältemaschinen können zusätzlich zu den in Kapitel 3.1.1 gemachten technischen Ausführungen folgende allgemeingültige Aussagen getroffen werden:

Turbo-Kälteanlagen fördern große Volumenströme und eignen sich damit für Kältemittel mit geringen volumetrischen Kälteleistungen. Sie benötigen ein Kältemittel mit einem hohen Molekulargewicht und wurden daher bis zum FCKW-Verbot vorwiegend mit diesen Kältemitteln, in der Regel mit R 11, betrieben. Seit dem Verbot von FCKW wird in Neuanlagen meist der HFKW-134a als Kältemittel eingesetzt [FKW 1998a; Grage, Pareidt 2000]. Vereinzelt kommt auch der HFKW-245fa oder - außerhalb der EU - bisher noch der HFCKW-123 zum Einsatz [UNEP 2009].

Bei Neuanlagen kann Wasser (R 718) als Kältemittel eingesetzt werden. In Deutschland sind erste Pilotanlagen mit Wasser als Kältemittel realisiert. Derzeit wird im Rahmen eines vom BMBF geförderten Verbundforschungsvorhabens an der Entwicklung einer 3. Generation dieser R 718-Turbokaltwassersätze gearbeitet [ILK 2010]. Ein realisiertes Beispiel einer Turboanlage mit Wasser als Kältemittel ist die Turbo-Prozessanlage bei DaimlerChrysler in Düsseldorf. Da Turboverdichter hauptsächlich in zur Klimatisierung eingesetzten Flüssigkeitskühlsätzen (Kaltwassersätzen) großer Kälteleistungen zum Einsatz kommen, ist die Möglichkeit des Einsatzes von Wasser als Kältemittel in Kapitel 3.3.5.2 (Gebäudeklimatisierung) näher beschrieben.

Halogenfreie Kohlenwasserstoffe werden soweit bekannt nur in Anlagen der petrochemischen Industrie eingesetzt, da hier routinemäßig mit gefährlichen, insbesondere explosiven Stoffen umgegangen wird [UNEP 2006; UNEP 2009].

Ammoniak ist wegen seines geringen Molekulargewichts für Turbokälteanlagen ungeeignet. Jedoch sind beim Neuanlagenbau theoretisch mehrstufige Ammoniak-Anlagen, die sich durch eine hohe energetische Effizienz auszeichnen, eine technisch realisierbare Alternative zu HFKW-Turbokälteanlagen. Wegen der mit mehrstufigen Ammoniak-Anlagen verbundenen sehr hohen Kosten werden solche Anlagen aber nicht realisiert [Axima 2003b].

Schlussfolgerungen

Der Einsatz halogenfreier Kältemittel ist in der chemischen und pharmazeutischen Industrie abgesehen von Spezialanwendungen Stand der Technik.

Sofern aus technischen Gründen - z. B. bei bestehenden Anlagen - nicht auf den Einsatz von fluorierten Kältemitteln verzichtet werden kann, sollte wegen ihres sehr hohen GWP der Einsatz von FKW vermieden werden. Darüber hinaus müssen wegen der üblicherweise großen Füllmengen pro Anlage besonders effektive Maßnahmen zur Emissionsminderung der fluorierten Kältemittel ergriffen werden.

In Turbokälteanlagen kann vorläufig nicht auf HFKW verzichtet werden. Wasser als Kältemittel ist zukunftsweisend und vielversprechend, kann aber heute u. a. aus Kostengründen nicht überall Anwendung finden. Bei Planungen ist jedoch grundsätzlich zu überlegen, ob der Einsatz von Turboanlagen zwingend ist oder andere Techniken ohne HFKW ebenfalls ökonomisch und ökologisch (energetisch) sinnvoll einsetzbar sind.

3.3.3.3. Kühllhäuser

Die meisten Lebensmittel, aber auch z. B. pharmazeutische Produkte oder Blutplasma, bedürfen während Verarbeitung, Transport und Lagerung einer Kühlung. Kühllhäuser (Kühl- und Tiefkühlager) dienen in dieser Kette der Lagerung der gefrorenen (Produkttemperatur $\leq -18^{\circ}\text{C}$) oder zu kühlenden (Produkttemperatur $> 0^{\circ}\text{C}$) Produkte, die zu fast 90 % Lebensmittel sind. Eine erste Lagerung von Roh- und/oder Fertigware findet bereits beim Hersteller/Verarbeiter statt. Von dort aus gelangt die Fertigware mitunter über Umschlaglager (Speditionslager) zu Zentrallagern, wo sie dann bis zum Transport zur Verkaufsstelle, z. B. Supermärkte, verbleibt. Supermärkte haben ihrerseits Lagerräume. Neben großen Zentrallagern (Regionallagern) werden in Deutschland auch kleinere Handelslager betrieben, die in der Regel näher an den Verkaufsstellen liegen [Meurer, Schwarz 2002].

Kühllhäuser haben eine durchschnittliche Größe von 45.000 bis 75.000 m³ [VDKL 2009a]. In Deutschland gab es im Jahr 2009 nach einer Erhebung des VDKL [VDKL 2009] mehr als 750 Kühllhäuser mit insgesamt 21,6 Mio. m³ Lagerfläche bzw. 4,5 Mio. Europalettenplätzen, wobei sowohl gewerbliche von VDKL-Mitgliedsbetrieben als auch betriebliche Kühllhäuser

erfasst wurden. Die Gesamtkapazität der 239 gewerblichen VDKL-Kühlhäuser (etwa 80 % aller Kühlhausbetreiber sind VDKL Mitglied) betrug etwa 12,6 Mio. m³ [VDKL 2009].

Bis in die neunziger Jahre wurden in geringem Umfang Anlagen großer Kälteleistungen (> 1 MW bei Tiefkühlung) mit dem Kältemittel R 22 (HFKW) für Kühlhäuser gebaut. R 22 ist jedoch in Deutschland seit dem 1. Januar 2000 in Neuanlagen verboten. HFKW haben als Ersatzkältemittel in diesem Leistungsbereich keine Bedeutung erlangt. Sie werden in der Regel schon aus Kostengründen nicht eingesetzt [DKV 2003].

HFKW-Kälteanlagen findet man heute praktisch nur in kleineren Handels-/Umschlaglagern mit einer Größe von weniger als 50.000 m³ [VDKL 2010]. Die Kälteleistungen dieser Anlagen betragen weniger als 500 kW. In diesem Leistungsbereich sind die Investitionskosten für HFKW-Anlagen oft niedriger, da viele seriengefertigte Komponenten zur Verfügung stehen. Dies verbessert auch die Ersatzteilversorgung [VDKL 2003]. Hinzu kommen ein einfacheres und schnelleres Baugenehmigungsverfahren sowie ein breiteres und somit meist günstigeres Serviceangebot [VDKL 2010]. Nachteilig ist, dass eine energetische Optimierung und Anpassung auf die Gegebenheiten dadurch selten stattfinden [DKV 2003]. Vergleichende Angaben zu den Gesamtkosten (Investitions- und Betriebskosten) liegen nicht vor.

Eine statistische Erhebung des VDKL [VDKL 2009a] bei 246 Kühlhäusern mit 554 Kälteanlagen hat gezeigt, dass gut 80 % des zu kühlenden Volumens mittels Ammoniak, etwa 16 % mittels HFKW (hauptsächlich R 404A, R 134a), knapp 2 % mittels R 22 und weniger als 1 % mittels CO₂ gekühlt werden. Im Jahr 2001 sind etwa 7 t HFKW aus dieser Anwendung emittiert [Schwarz 2003b]. Kühlhäusern kommt in Bezug auf HFKW-Emissionen mit einem Anteil von etwa 4 % an der Industriekälte keine große Bedeutung zu. Dies hängt vor allem mit dem bereits heute vorhandenen hohen Anteil halogenfreier Kältemittel in diesem Bereich zusammen.

Minderungsmöglichkeiten

Ammoniak ist in großen Kühlhäusern, die meist mit Kälteanlagen mit einer Kälteleistung von mehr als 1 MW betrieben werden, bereits heute das eingesetzte Standardkältemittel. Da es sich um Räume ohne Publikumsverkehr handelt, werden ganz überwiegend Ammoniak-Kälteanlagen mit Direktverdampfung eingesetzt. Als energetisch günstige Alternative sind seit einigen Jahren vereinzelt Ammoniak/CO₂-Kaskaden im Einsatz [UNEP 2003; Meurer, Schwarz 2002]. Bei diesen Systemen ist die installierte Ammoniakmenge wesentlich geringer, so dass das bei Ammoniakmassen von 3 t und mehr erforderliche immissionsschutzrechtliche Genehmigungsverfahren nicht erforderlich ist [UNEP 2003; Axima 2003a]. Dennoch konnten sich diese Anlagen u. a. wegen höherer Investitionskosten im Vergleich zu Ammoniak-Anlagen bisher nicht durchsetzen [VDKL 2010]. Das VDMA-Einheitsblatt (Entwurf) 24247-3 [VDMA 2009] empfiehlt für neu zu planende Kühlhäuser grundsätzlich Ammoniak oder eine Ammoniak-CO₂-Kaskade. Kühlhäuser mit reinen CO₂-

Anlagen sind in Deutschland die Ausnahme und sehr selten [VDKL 2010]. In UNEP [UNEP 2009] wird berichtet, dass im Jahr 2008 in Dänemark ein Kühl- und Tiefkühlager mit einer transkritischen CO₂-Kälteanlage errichtet wurde. Diese liefert neben der erforderlichen Kälte (1.500 kW) auch Wärme (1.200 kW), welche in ein lokales Heizsystem eingespeist wird. CO₂ wird für diese Form der Anwendung als sehr wirtschaftlich bewertet.

Ammoniak-Anlagen oder Ammoniak/CO₂-Kaskaden können technisch ohne größere Schwierigkeiten auch für Leistungen von 500 kW und weniger gebaut werden. Bedingt durch notwendige Sicherheitsaufwendungen und die erforderlichen Genehmigungen, ist eine längerfristige Planung erforderlich. Dieser Planungsaufwand, die bis zu gut 30 % höheren Investitionskosten sowie ein wenig flächendeckendes Servicenetz verhindern bisher den Einsatz dieser umweltgerechteren Technologie [VDKL 2010; DKV 2003; Peilnsteiner, Truszkiewicz 2002].

Bei größeren Ammoniak-Anlagen werden die höheren Investitionskosten durch verringerte Betriebskosten aufgewogen: Ammoniak-Anlagen sind im Vergleich zu einer üblichen HFKW-Anlage im Betrieb energetisch etwa 15-20 % günstiger zu bewerten [VDKL 2003; DKV 2003]. Da die Kälteanlage für gut 70 % des Energieverbrauchs eines Kühlhauses verantwortlich ist [VDKL 2009a], können die Energiekosten damit erheblich gesenkt werden. Außerdem fallen bei Ammoniak-Anlagen geringere Kosten für das Kältemittel an [VDKL 2003; DKV 2003]. Allerdings werden die Energieeffizienz - oder allgemein die Betriebskosten - in der Praxis nicht selten geringer bewertet als die Investitionskosten [Peilnsteiner, Truszkiewicz 2002].

Bei kleineren Anlagen (Ammoniak oder Ammoniak/CO₂) sind die in den ersten Jahren erzielten Einsparungen bei den Betriebskosten meist geringer als die im Vergleich zu einer HFKW-Anlage zusätzlich aufzuwendenden Investitionskosten. Für den Kostenvergleich ist letztlich die zu Grunde gelegte Abschreibungsdauer entscheidend.

Die hohe energetische Effizienz von Ammoniak-Anlagen ergibt sich aus den günstigen thermodynamischen Eigenschaften von Ammoniak. In Bezug auf den TEWI zeigen Ammoniak-Anlagen daher vorteilhafte Werte. Wegen der hohen Verdampfungswärme können gegenüber HFKW zudem kleinere Rohrdurchmesser gewählt werden [Peilnsteiner, Truszkiewicz 2002], was sich wiederum positiv auf die Investitionskosten auswirkt.

Im Gegensatz zu HFKW-Anlagen wird eine Ammoniak-Anlage für den jeweiligen Einsatzort gebaut. Komponenten werden in vergleichsweise kleinen Stückzahlen hergestellt. Auch material- und herstellungsbedingte Aspekte führen zu höheren Kosten. So können wegen der Materialunverträglichkeit von Ammoniak und Kupfer bei Ammoniak-Anlagen nicht die in der Kältetechnik üblicherweise verwendeten Kupferrohre genutzt werden. Insgesamt sind diese Anlagen aus den genannten Gründen in der Investition teurer [DKV 2003], aber von hoher Qualität.

In anderen Ländern, z. B. in den Niederlanden, sind auch kleinere Kühlhäuser (mit Kälteleistungen von etwa 350 kW und auch darunter) mit sehr energieeffizienten Ammoniak/CO₂-Kaskaden in Betrieb [Axima 2003a]. Deren Bau wurde allerdings meist durch staatliche Förderprogramme ermöglicht [VDKL 2010]. Technisch wären auch Anlagen mit etwa 100 kW realisierbar, die einen guten Coefficient of Performance (COP) hätten. Solche Anlagen werden bisher aus Kostengründen (Investitionskosten) nicht realisiert [Axima 2003a]. Auch die Auswahl der erforderlichen Kältekomponenten wird mit geringer werdender Anlagenleistung schwieriger [VDKL 2010].

Zu den auf CO₂-Äquivalente bezogenen spezifischen Vermeidungskosten liegen keine Angaben vor. Dies hängt damit zusammen, dass Kostenbetrachtungen in der Regel über den gesamten Bereich der Industriekälte und nicht aufgeschlüsselt nach Einzelbereichen vorgenommen wurden.

Schlussfolgerungen

In Kühlhäusern mit Kälteanlagen von Leistungen > 1 MW ist Ammoniak das Standardkältemittel. Der Einsatz von HFKW ist in diesem Leistungsbereich weder technisch noch ökonomisch sinnvoll.

Auch in kleineren Lagern (< 50.000 m³, Leistungsbereich der Kälteanlagen < 500 kW) sind Kälteanlagen mit Ammoniak oder Ammoniak/CO₂ Stand der Technik. Bereits heute können mit Ammoniak Kälteleistungen von nur 100 kW technisch realisiert werden. Dennoch werden in Deutschland in kleineren Lagern bisher keine Ammoniak- oder Ammoniak/CO₂-Anlagen, sondern ausschließlich HFKW-Anlagen gebaut. Als Gründe werden höhere Investitionskosten und der höhere Planungs- und Genehmigungsaufwand bei Ammoniak-Anlagen genannt. Dabei bleibt unberücksichtigt, dass Anlagen mit natürlichen Kältemitteln eine sehr gute Energieeffizienz haben und damit meist geringere Betriebskosten verursachen.

3.3.3.4 Sport- und Freizeitanlagen

Abgesehen von kleinen Kältegeräten und -anlagen, wie sie auch in anderen Bereichen Anwendung finden, wird Kälte in diesem Sektor in Deutschland in größerem Umfang nur für Kunsteisbahnen und – in geringerem Umfang – für Hallen-Skiparks benötigt. Kunsteisbahnen können als stationäre oder als mobile Anlagen ausgeführt sein. Kälteanlagen sind hier zum Eisaufbau und zum Erhalt des Eises erforderlich. In Deutschland gibt es heute über 200 Eissporthallen und Freilufteisbahnen. Diese werden überwiegend ohne HFKW-Kälteanlagen betrieben. In Deutschland gibt es derzeit sechs Hallen-Skiparks (Stand 2010). Die Kälteanlage ist hier dafür verantwortlich, die Halle und den Schnee zu kühlen sowie kaltes Wasser für die Schneekanonen bereitzustellen. Außer für

Hallen-Skiparks wird Schnee auch für Sportveranstaltungen, Festivals/Veranstaltungen, Filmaufnahmen etc. künstlich hergestellt. Hierfür kommen mobile Anlagen zum Einsatz.

Kunsteisbahnen

Als Kältemittel wurde neben Ammoniak auch das für Neuanlagen inzwischen verbotene R 22 (HFCWK) eingesetzt. Heute kommen auch HFKW (R 404A) zum Einsatz [Reiner 2003]. Darüber hinaus gibt es in Deutschland inzwischen einige Kunsteisbahnen, bei denen CO₂ als Kälte-träger zur Anwendung kommt. Kältemittel ist auch bei diesen Anlagen Ammoniak [Cofely 2009].

Die Höhe der aus der Erzeugung von Kunsteis resultierenden HFKW-Emissionen ist nicht bekannt. Wegen des umfangreichen Einsatzes von Ammoniak kann in Bezug auf die Gesamtemissionen von einer vergleichsweise geringen Emissionsmenge ausgegangen werden.

Hallen-Skiparks / mobile Anlagen zur Schneeerzeugung

Erste Hallen-Skiparks wurden in Deutschland erst im Jahr 2001, also nach dem FCKW und HFCWK-Verbot für Neuanlagen, erbaut. In der Folge finden sich diese Kältemittel nicht in den dort installierten Kälteanlagen. In den in Deutschland gebauten Hallen-Skiparks sind überwiegend Ammoniak-Kälteanlagen installiert; der Einsatz von HFKW wird aber nicht ausgeschlossen. Mobile Anlagen zur Schneeerzeugung, die auch für Skihallen einsetzbar sind, enthalten z. B. das HFKW-Gemisch R 404A als Kältemittel [Schnee- und Eistechnik 2009].

Minderungsmöglichkeiten

Als Kältemittel stellt Ammoniak für diesen Anwendungsbereich den Regelfall dar [Reiner 2003]. Es kann entweder als direkt verdampfendes Kältemittel oder zusammen mit einem (verdampfenden) Kälte-träger (z. B. Sole, CO₂) eingesetzt werden.

Beim Einsatz von Kältemitteln in direktverdampfenden Systemen muss sichergestellt sein, dass das Kältemittel nicht in den Publikumsraum (Eishalle) gelangen kann [BGV 1997]. Aus Sicherheitsgründen werden heute vielfach indirekte Anlagen eingesetzt. Als Kälte-träger wird entweder Glykol oder CO₂ eingesetzt. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Eisbrei [Integral 2003].

Der Einsatz von CO₂ hat vor allem energetische Vorteile. Zwar benötigt die CO₂/Ammoniak-Anlage etwa 8-10 % mehr Energie als eine direkte Ammoniak-Anlage. Eine Ammoniak/Sole-Anlage benötigt jedoch etwa 40 % mehr Energie als eine direkte Ammoniak-Anlage [Lindborg 2000]. Zusätzlich können mit CO₂ gleichmäßigere Kälte-trägertemperaturen erreicht und so die Oberflächenqualität von Kunsteisbahnen verbessert werden [eurammon 2002].

Angaben zu Kostenvergleichen liegen uns nicht vor. Da üblicherweise Ammoniak als Kältemittel eingesetzt wird, ist von einer Wirtschaftlichkeit dieser Anlagen auszugehen.

Schlussfolgerungen

Für Kunsteisbahnen und Hallen-Skiparks ist der Einsatz von HFKW als Kältemittel weder technisch noch wirtschaftlich erforderlich. Mit Ammoniak, Ammoniak/Sole, Ammoniak/CO₂ und ggf. Ammoniak/Eisbrei stehen halogenfreie Alternativen zur Verfügung, die bereits heute als Standardkältemittel für den genannten Bereich bezeichnet werden können. Diese Aussage gilt auch für mobile Kunsteisbahnen.

3.3.3.5 Metallindustrie (Gießereien, Hütten etc.)

In der Metallindustrie werden – neben Standard-Kälteanlagen und -geräten – speziell für diesen Industriezweig entwickelte Kranklimageräte eingesetzt, die bei den herrschenden, extremen Umgebungstemperaturen von bis zu 90°C sicher arbeiten müssen. Im Jahr 2005 ging Schwarz [Schwarz 2005] auf Basis von Herstellerangaben von einem Anlagenbestand in Höhe von 1.000 aus. Neuere Schätzungen liegen nicht vor. Die von der Kälteleistung abhängige Kältemittelfüllmenge variiert von 2,5 bis mehr als 20 kg [Axima 2003b; FKW 1998a; Schwarz 2005; FrigorTec 2007].

Wegen ihrer thermodynamischen Eigenschaften wurden in dieser Anwendung der FCKW-114 und das bromierte Kältemittel R 12B1 eingesetzt [FKW 1998a]. Beide Kältemittel dürfen in Neuanlagen bereits seit den neunziger Jahren und inzwischen auch in bestehenden Anlagen nicht mehr verwendet werden. Als drop-in Ersatzstoffe für bestehende Anlagen kamen zunächst HFCKW in Frage [FKW 1998a]. Auch in Neuanlagen wurden zwischenzeitlich HFCKW eingesetzt. Diese stellten wegen ihres noch vorhandenen ODP jedoch keine geeignete langfristige Alternative dar und sind für Neuanlagen inzwischen ebenfalls verboten.

Heute setzen Hersteller daher für Neuanlagen die HFKW-227ea, HFKW-236fa und HFKW-134a ein, wobei der Einsatz von R 227ea und insbesondere von R 134a auf niedrigere Umgebungstemperaturen begrenzt ist. Die Herstellerangaben bezüglich der zulässigen Umgebungstemperatur für R 227ea variieren zwischen 75°C [FrigorTec 2007], 80°C [Weisshaar 2009] und 85°C [Wende 2008; Axima 2003b]. Der HFKW-134a wird bis zu vergleichsweise niedrigen Umgebungstemperaturen von 60°C [Wende 2008; Weisshaar 2009] oder 65°C [FrigorTec 2007] eingesetzt.

Da in Bezug auf die Anlagenzahl in Deutschland nur grobe Schätzungen vorliegen und die Füllmengen stark variieren, ist die Höhe der jährlichen Emissionen aus Kranklimageräten in Deutschland nicht bekannt.

Minderungsmöglichkeiten

Neben den HFKW kamen theoretisch auch Kohlenwasserstoffe (z. B. iso-Butan) als drop-in Ersatzstoffe für bestehende Anlagen in Frage. Soweit bekannt, haben in der Praxis wegen Sicherheitsaspekten und den mit den erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen verbundenen hohen Kosten keine Umrüstungen auf Kohlenwasserstoffe stattgefunden [FKW 1998a].

Neben Kohlenwasserstoffen ist auch der Einsatz von CO₂ denkbar. Dies ist aber mit einer schlechten Energieeffizienz verbunden [Axima 2003b]. Weitere Forschungsarbeit hat zwar stattgefunden, bisher aber nicht zu einem marktfähigen Produkt geführt. Neben der schlechten Energieeffizienz sind insbesondere auch die durch die hohen Umgebungstemperaturen bedingten hohen Drücke eine Herausforderung.

Schlussfolgerungen

Als halogenfreie Kältemittel zur Klimatisierung von Krankabinen eignen sich wegen ihrer thermodynamischen und stofflichen Eigenschaften Kohlenwasserstoffe, deren Einsatz aber wegen den erforderlichen besonderen Sicherheitsanforderungen und den damit verbundenen erheblichen Zusatzkosten nicht erfolgt. Ob zukünftig ein sinnvoller Einsatz von CO₂ möglich sein wird, kann heute noch nicht beurteilt werden und hängt auch von Entscheidungen in anderen Anwendungen (Automobilindustrie) ab.

Es ist darauf hinzuweisen, dass der HFKW-236fa ein wesentlich größeres GWP₁₀₀ (6.300) als der HFKW-227ea (GWP₁₀₀ = 2.900, s. Tab. 1.2) hat. Wo technisch möglich, sollte - wenn der Einsatz von HFKW auch zukünftig erforderlich ist - auf den HFKW-227ea zurückgegriffen werden.

3.3.3.6 Industrielle Großwärmepumpen

Wärmepumpen größerer Leistung (Großwärmepumpen) werden häufig in der Industrie oder in speziellen Anwendungen wie Fernheizung/Fernkühlung sowie zur Beheizung und Entfeuchtung von Schwimmbädern eingesetzt. Diese Wärmepumpen haben Leistungen von 500 kW und mehr und sind oft gasmotorisch angetrieben, können die Wärme alternativ hierzu jedoch auch aus Fernwärmenetzen oder dem Abwasser von Kläranlagen nutzen. Üblich sind Leistungen von 3,5 bis 5 MW; in Einzelfällen werden Leistungen bis 28 MW erreicht. Insgesamt handelt es sich um wenige, sehr spezielle Anlagen.

Entgegen früherer Angaben [Anhörung 2003] sind Großwärmepumpen mittlerweile nicht mehr ausschließlich mit Turboverdichtern ausgestattet. So werden z.B. Hochtemperaturwärmepumpen mit einer Heizleistung von 0,5 bis zu 4 Megawatt angeboten, welche Vorlauftemperaturen von 80 °C erreichen. Hierzu wird nicht mehr das für diese Anlagengröße bisher übliche Standardkältemittel R 134a, sondern CO₂ verwendet. Die Wärmepumpe erzielt bedingt durch die Wärmeübertragung im überkritischen Bereich

gegenüber einem Gerät mit R 134a eine deutlich höhere Leistungszahl [Wobst u.a. 2008]. Für die Verdichtung des CO₂ kommt ein Schraubenverdichter zum Einsatz. Vom gleichen Hersteller soll voraussichtlich im Jahr 2010 eine Wärmepumpe auf den Markt kommen, welche mit einem Turboverdichter arbeitet und Heizleistungen von bis zu 8 MW bei einer Vorlauftemperatur von 130 °C erreicht [Thermea 2009].

Minderungsmöglichkeiten (HFKW-freie Verfahren)

Im Gegensatz zum unterkritisch eingesetzten HFKW R 134a, welches in den meisten ausgeführten Anlagen Verwendung findet, befindet sich CO₂ in Wärmepumpen auf der Wärmenutzungsseite im überkritischen Gebiet. Es wird bei der Wärmeübertragung daher nicht verflüssigt, sondern nur abgekühlt, wodurch sich die Temperatur des Gases ändert. Der zu erwärmende Stoffstrom (Wasser) kann an diese Änderung angepasst werden, wodurch die exergetischen Verluste auf ein Minimum reduziert werden können [Wobst u.a. 2008]. Somit sind bei Wärmepumpen mit CO₂ nicht nur die direkten Emissionen (Leckagen, Havarien), sondern auch die indirekten Emissionen durch verbesserte Energieeffizienz geringer als bei Anlagen mit HFKW. Auch aus ökonomischer Sicht ist bei dieser Anwendung CO₂ dem Kältemittel R 134a vorzuziehen, da bei gleicher Leistung weniger Energie benötigt wird und sich somit die Betriebskosten (Stromverbrauch des Verdichters) reduzieren. Wärmepumpen mit großer Kälteleistung (>3 MW), die je nach Bedarf zur Kälte- oder Wärmegewinnung eingesetzt werden können, werden mit dem Kältemittel Ammoniak realisiert.

Als Beispiel sei eine Anlage im schweizerischen Mülligen erwähnt, welche das dortige Briefzentrum wahlweise mit Kälte oder Wärme versorgt. Ein Großteil der zum Heizen benötigten Energie stammt dabei aus der Abwärme der Gebäudeklimatisierung und dem Abwasser eines nahen Klärwerkes. Bei der Kälteproduktion wird hingegen das Abwasser für die Rückkühlung verwendet [KI 2008c]. Als Verdichter der zweistufigen Ammoniakanlage (4,3 MW Kälteleistung) wurden Kolben- bzw. Hochdruckkolbenverdichter (Wärmepumpenbetrieb) eingebaut.

2009 erhielt die Firma Thermea einen ersten Preis (BMU Förderpreise: Klimaschutz mit Klimatechnik) in der Kategorie „Hocheffiziente Kälteanlagen mit halogenfreien Kältemitteln“ für eine Baureihe industrieller Hochtemperatur-Wärmepumpen in den Leistungsbereichen von 50 bis 100 kW sowie 1.000 bis 4.000 kW mit dem natürlichen Kältemittel CO₂ [BMU 2009].

Schlussfolgerungen

Aufgrund der erheblichen Fortschritte bei der industriellen Wärmepumpenentwicklung mit natürlichen Kältemitteln kann auf Anlagen mit HFKW verzichtet werden. Der Vorteil der HFKW-freien Anlagen liegt nicht nur in der Kältemittelsubstitution, sondern zusätzlich in der deutlich verbesserten Energieausbeute bei CO₂-Anlagen im Wärmepumpenbetrieb. Die damit verbundenen höheren Investitionskosten werden somit durch verminderte Betriebskosten mehr als ausgeglichen. Werden diese Kosten trotz schneller Amortisierung gescheut, besteht die Möglichkeit des „Wärmecontracting“, das von Anlagenherstellern angeboten wird [Thermea 2009].

3.3.3.7 Sonstige Anwendungen

Die Anwendungsgebiete für (Turbo-)Prozesskälteanlagen und Flüssigkeitskühlsätze (Kaltwassersätze) sind in der Industrie vielfältig. So werden z. B. Flüssigkeitskühlsätze zur Kühlung von Laser-Schneidemaschinen in der Automobilindustrie und in der Medizintechnik (z. B. die Computertomographie oder Magnetresonanztomographie) eingesetzt [KKW, HEA 2003; Grasso 2003a]. Für verschiedene Anwendungsbereiche im Leistungsbereich ab etwa 20 kW werden Flüssigkeitskühlsätze mit dem Kältemittel Ammoniak als komplett fertiggestellte Produkte angeboten.

In Kraftwerksanlagen (z. B. Atomkraftwerken) werden große Kälteanlagen (Turbo-Kältemaschinen) benötigt, die sehr speziellen Anforderungen (Erdbebenprüfung etc.) genügen müssen. Für diese Anwendung sind heute noch keine halogenfreien Lösungen auf dem Markt [Axima 2003a].

Eine Diskussion der einzelnen Anwendungen ist in diesem Bericht nicht erforderlich, da die Ausführungen zu Flüssigkeitskühlsätzen/Turboanlagen in den Kapiteln 3.1.1 (Turboverdichter, technische Ausführungen), 3.3.3.2 (Turboverdichter, Kältemittel) und 3.3.5.2 (Flüssigkeitskühlsätze sowie Turboverdichter, Wasser als Kältemittel) im Grundsatz übertragbar sind.

3.3.4 Transportkälte

Der Transport von tiefgeköhlten oder geköhlten Produkten, meist Lebensmitteln, nimmt weltweit zu. Transportiert wird auf der Straße, der Schiene und dem Wasser. Transportmittel sind kleinere Köhlfahrzeuge, Lkw-Auflieger, Wechselbehälter (kombiniert Straße/Schiene), Container für den internationalen Verkehr (z. B. für Schiffe) und Köhlschiffe.

Dieses Kapitel stellt nur die Kälteanlagen dar, Fragen zur Isolierung sind in Kapitel 4 zu finden.

Neben der Fahrzeugklimatisierung ist die Transportkälte eine der relevanten Anwendungen in Bezug auf den Energieverbrauch und die Emission von Treibhausgasen künstlich erzeugter Kälte. Es gibt ein hohes Einsparpotenzial sowohl auf energetischer als auch auf kältemitteltechnischer Seite.

Im Jahr 2007 waren Transportkälteanlagen (Fahrzeuge, Kühlcontainer) in Deutschland mit etwa 950 Tonnen teilhalogenierter Kohlenwasserstoffe (HFKW) befüllt. Die Gesamtemissionen aus diesen Anlagen betrugen im Jahr 2007 etwa 155 t HFKW und hatten damit einen Anteil von 3,5 % an den Emissionen aus dem Bereich Kälte/Klima.

Straßenfahrzeuge

Auf der Straße wurden im Jahr 2005 weltweit 16 Billionen (10^{12}) t·km Frachttransportleistung erbracht, wobei Wachstumsraten bis zum Jahr 2030 von 2,5% pro Jahr erwartet werden. In Europa beträgt die jährliche Frachttransportleistung etwa 50 Milliarden (10^9) t·km. Dazu steht eine Flotte von 650.000 Kühlfahrzeugen bereit [UNEP 2006]. In Deutschland waren im Jahr 2007 etwa 55.500 temperaturgeführte Lkw zugelassen. Hinzu kamen etwa 44.500 Anhänger mit maschineller Kühlung [KBA 2009].

Transportkälteeinrichtungen müssen bei Umgebungstemperaturen, die zwischen -40°C und +40°C schwanken, einwandfrei kühlen; zum Teil ist das Transportgut selbst noch abzukühlen. Die Kälteleistung ist international vorgeschrieben (ATP-Abkommen, siehe Glossar), die Innen- und Außenmaße der Fahrzeuge sind normiert [FRIGOBLOCK 2003].

Die Kälteaggregate enthalten zwischen 2-15 kg Kältemittel. Für den Langstreckentransport kommen Kühlfahrzeuge mit 6-15 kg Kältemittel zum Einsatz; das sind Lkw, Anhänger und Sattelaufleger mit jeweils unabhängiger Transportkälte-Maschine [Peilnsteiner, Truskiewitz 2002]. Kleinere Fahrzeuge (Verteilerfahrzeuge) mit Füllmengen von ca. 2 kg Kältemittel sind für den Frisch- und teilweise für den Tiefkühldienst vor Ort unterwegs. Viele Fahrzeuge werden sowohl für den Frischdienst (NK) als auch für den Tiefkühldienst (TK) eingesetzt.

Als Kältemittel in Kühlfahrzeugen wurden traditionell die FCKW-12, FCKW-502 und HFCKW-22 eingesetzt [UNEP 2003]. Die FCKW sind durch die Verordnung (EG) Nr. 1005/2009 auf Basis des Montrealer Protokolls [Montrealer Protokoll 2000] in Europa verboten. HFCKW-22, der in einigen Ländern als Ersatz zulässig ist, darf in Deutschland wegen bestehender Regelungen in Neufahrzeugen nicht mehr verwendet werden. Als Kältemittel in Neufahrzeugen werden heute teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW) eingesetzt. Für den Tiefkühl- und Frischdienst für Langstreckenkühlfahrzeuge kommen die Gemische R 404A und R 410A (vor allem in Deutschland) zum Einsatz, für den Frischdienst der HFKW-134a [FRIGOBLOCK 2003; Öko-Recherche 2003; Thermo King 2003a].

Die HFKW-Emissionen aus Kühlfahrzeugen betrugen in Deutschland im Jahr 2007 etwa 86 t [Schwarz 2009a]. Die Emissionen bei der Entsorgung vieler Langstreckenfahrzeuge erfolgen nicht in Deutschland, da die Fahrzeuge vor ihrer Verschrottung ins Ausland verkauft werden. Fahrzeuge aus dem Verteilerverkehr, die R 134a enthalten, werden hauptsächlich im Inland entsorgt.

Kühlcontainer

Kühlcontainer werden im internationalen Warenverkehr auf der Straße, im Bahn- und Schiffsverkehr eingesetzt. Sie können integrierte oder externe Transportkälte-Maschinen haben [Peilnsteiner, Truskiewitz 2002]. Üblich sind heute die Container mit integrierter Kälteanlage, die *Integrierten Reefer Container*. Container ohne eigene Kälteversorgung, sogenannte *Port-Hole-Container*, sind hingegen selten [Kauffeld, Christensen 1998]. Im Bereich der Kühlcontainer war bis zum FCKW-Verbot ebenfalls der FCKW-12 das Kältemittel der Wahl. Er wurde durch den HFKW-134a, das Gemisch HFKW-404A und auch durch den HFCKW-22 ersetzt. Die jährliche Produktion von Containern beläuft sich auf etwa 100.000 Stück weltweit, die heute mit dem HFKW 134a und dem Gemisch HFKW-R404A kühlen [UNEP 2003; Wild 2008]. Die gesamte Herstellung von Schiffscontainern erfolgt inzwischen in China [Wild 2008].

Der deutsche Anteil der HFKW-Emissionen aus den Kälteanlagen von Kühlcontainern betrugen im Jahr 2007 etwa 51 t, die Freisetzung erfolgte auch außerhalb von Deutschland [Schwarz 2003b; Schwarz 2009].

Schiffe

Kältemittel sind enthalten in Kälte- und/oder Klimaanlage von Fabriksschiffen, wie sie im Fischfang eingesetzt werden, Kühlschiffen zum Transport von gekühlter Ware, sonstigen Frachtschiffen, Forschungsschiffen, Marine- und Fahrgastschiffen. In diesem Kapitel „Transportkälte“ werden nur die Schiffskälteanlagen betrachtet; Schiffsklimaanlagen sind in Kapitel 3.3.7 diskutiert.

Unter deutscher Flagge laufende Kühlschiffe gibt es nicht mehr [Öko-Recherche 2003]. Ältere Kühlschiffe erzeugen die Kälte mit Direktverdampfungs-Kälteanlagen. Diese Anlagen enthalten 3-5 t Kältemittel. Wie in den anderen Bereichen der Transportkälte wurde zunächst FCKW-12 eingesetzt, welches nach dem Verbot der FCKW⁴ oft durch HFCKW-22 ersetzt wurde. Durch die Einschränkung auch dieses Kältemittels kommen HFKW-Gemische der 400er Reihe zum Einsatz [UNEP 2003]. Heute werden kaum noch

⁴ Die Anlage VI des *Internationalen Übereinkommens zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe* (MARPOL 73/78) enthält auch Vorschriften zur Verwendung von die Ozonschichtschädigenden Stoffen auf Schiffen [MARPOL 1997]. Für Deutschland und die EU haben diese wegen der hier bestehenden, schärferen Regelungen (s. Kap. 1.2) keine Bedeutung.

Kühlschiffe mit Direktverdampfungs-Kälteanlagen gebaut, sondern es werden Kühlcontainer mit eigener Kälteversorgung (s. Abschnitt *Kühlcontainer*) verwendet. Diese können, da sie lediglich einen Stromanschluss benötigen, auf den meisten Frachtschiffen transportiert werden.

Auf älteren Hochseefischerei-Schiffen (Fabrikschiffen) wurde neben Ammoniak das Kältemittel R 22 eingesetzt. HFKW konnten sich bei Fabrikschiffen nicht als Ersatzkältemittel durchsetzen und kommen nur in wenigen Einzelfällen zum Einsatz [Schwarz 2003b].

Für alle weiteren Kälteanlagen auf „Schiffen“ - von der Fähre bis zum Forschungsschiff - werden vorwiegend HFKW verwendet: Für die Klimatisierung wird üblicherweise R 134a eingesetzt, für die Kälteversorgung (Proviandräume etc.) R 404A oder R 407C. In einigen Fällen wird der bereits zur Klimatisierung vorhandene R 134a auch zur Bereitstellung der Kälte genutzt. Obwohl der Einsatz von R 404A in der Tiefkühlung effizienter ist, wird R 407C auch als alleiniges Kältemittel für die Normal- und Tiefkühlung eingesetzt. Die benötigten Kälteleistungen sind im Vergleich zu den auf Fabrikschiffen benötigten Leistungen deutlich geringer.

Nach Schätzungen betragen die HFKW-Emissionen bei Schiffen (Kühlung und Klimatisierung) der EU-27- Staaten 241 t, wobei 38 t aus der Kühlung stammen [BiPRO 2008].

Flugzeuge

Bei maximal 20% der Flugzeuge werden geringe Mengen fluorierte Kältemittel zur Proviantkühlung verwendet, die 0,5 kg Kältemittel pro Kompakteinheit enthalten mit Leckageraten <0,1% pro Jahr; normalerweise wird im Flugzeug mit Trockeneis gekühlt [Schwarz 2007].

Minderungsmöglichkeiten

Straßenfahrzeuge

Für Straßenfahrzeuge kommen als halogenfreie Kältemittel Kohlenwasserstoffe und Kohlendioxid (CO₂; R744) in Frage.

Ein Hersteller von Transportkälteanlagen rüstete in den neunziger Jahren ein Kühlfahrzeug mit einer Demonstrationskälteanlage mit Kohlenwasserstoffen aus. Diese Anlage wurde von einer Lebensmittelkette einige Jahre betrieben und erwies sich energetisch als geeignet. Ein wirtschaftlicher Einsatz solcher Anlagen war jedoch unter den gegebenen rechtlichen Randbedingungen (Sicherheitsanforderungen und Normen für Kohlenwasserstoffe) bisher nicht möglich [FRIGOBLOCK 2003, 2009]. Auf der IAA 2010 wurde eine Kälteanlage für den sog. Multitemp-Einsatz (d.h. Fahrzeuge mit Normal- und Tiefkühlung) mit dem

natürlichen Kältemittel Propan vorgestellt. Ein vom TÜV geprüftes Sicherheitskonzept ist erstellt und Feldtests mit Kühlfahrzeugen sind geplant [FRIGOBLOCK 2010].

Der Einsatz von CO₂ als Kältemittel in Kälteanlagen für den Lebensmittel-Verteilerverkehr (Normal- und Tiefkühlung) wurde in einem mehrjährigen Prototypentest im Rahmen eines Forschungsprojektes bei einem Discounter (Aldi) demonstriert. Die Testergebnisse der von der Konvekta AG entwickelten mobilen Kälteanlage zeigen, dass der Einsatz von CO₂ als Kältemittel für diese Anwendung für gemäßigte Klimazonen (z. B. in Deutschland) eine umweltgerechte Alternative zur Verwendung von HFKW ist [DBU 2003]. Die Erweiterung auf ein 2-stufiges System könnte zu weiteren Effizienzsteigerungen für den Transportkühleinsatz führen, insbesondere bei tiefen Innenraum- und hohen Außentemperaturen [DBU 2009]. Eine weitere neue Entwicklung ist eine Transportkälteanlage auf der Basis des Kältemittels CO₂ für den Frischdienst. Die Anlage ist einstufig ausgelegt, Messergebnisse sind noch nicht veröffentlicht, zweistufige Anlagen zur Erzeugung von niedrigeren Temperaturen sind geplant. Zunächst ist ein Feldtest der Anlage für den Frischdienst in einem ebenfalls neu entwickelten und noch im Betrieb zu testenden Auflieger auf der Basis von Kohlenstofffasern geplant [IAA 2010].

Weltweit werden Kälteanlagen in Kühlfahrzeugen noch mit R 404A befüllt. Eine der wichtigsten Fragen ist neben der Reduktion des Treibhausbeitrages des Kältemittels der Energieverbrauch der Transportkälteanlage.

In einer Gesamtbetrachtung (TEWI) kam ein Hersteller von Transportkältemaschinen zu dem Ergebnis, dass die Umweltbelastung durch den Einsatz von Kohlenwasserstoffen bei höheren Temperaturen (Verdampfungstemperaturen von 0 bis -10°C) geringer ist als beim Einsatz des Gemisches HFKW-410A. Der GWP des HFKW-410A ist noch geringer als der des Gemisches HFKW-404A [FRIGOBLOCK 2003].

Die Einführung von CO₂ als Kältemittel in der Transportkälte für den Frisch- und Tiefkühldienst hängt auch von der Entwicklung im Bereich Pkw-Klimaanlagen ab. Anbieter von Transportkälteanlagen würden einen breiten Einsatz von CO₂-Anlagen im Markt begrüßen. Ein Grund ist, dass CO₂ in der Transportkälte als alleiniges Kältemittel den gesamten Bereich des Frisch- und Tiefkühldienstes abdecken könnte. Die durch den bisher erforderlichen Einsatz von mehr als einem HFKW-Kältemittel entstehenden Mehrkosten entfielen [Konvekta 2003].

Ein erster Kostenvergleich liegt von Konvekta [2002] vor. Hierbei wurde eine R 134a Serienanlage mit einer fiktiven, serienreifen CO₂-Kälteanlage verglichen. Damit handelt es sich um eine erste Schätzung der Kosten. Die Autoren kommen je nach Kalkulation auf 16 bis 34 % höhere Gesamtkosten für die CO₂-Anlage im Falle einer Serienfertigung. Diesen stehen nicht quantifizierte Kostenreduzierungen im Bereich Wartung, Kältemittel und Entsorgung gegenüber [Konvekta 2002]. Der Einsatz des Kältemittels CO₂ ist wegen der damit verbundenen Vorteile (weltweite einfache Verfügbarkeit des Kältemittels, geringere

negative Umweltauswirkungen, vereinfachte Entsorgung, reduzierte Betriebskosten etc.) trotz der Mehrkosten bei der Investition gerechtfertigt [DBU 2003].

CO₂ wird auch als sogenanntes Verbrauchskältemittel eingesetzt. Verflüssigtes CO₂ gelangt aus einem vakuumisolierten Edelstahltank in einen Wärmetauscher im Aufbau und kühlt den Innenraum. Das direkte Einsprühen in den Innenraum wurde, insbesondere aus Arbeitsschutzgründen, aufgegeben. Die Anlage enthält kein Antriebsaggregat und keinen Kompressor, die sonstige technische Innenausstattung entspricht der einer üblichen Kälteanlage. Das gesamte gasförmige CO₂ wird ins Freie abgeleitet. Diese offene CO₂-Kühlung eignet sich eher für den Frischdienst-Verteilerverkehr. Stationäre CO₂-Tanks mit verflüssigtem CO₂ zum Nachfüllen der CO₂-Behälter am Kühllaster sind vorzuhalten. Der Hersteller sieht Vorteile dieser Technik, die bisher vorrangig in Schweden eingesetzt wird, in einem geringeren Geräuschpegel der Kühlanlage und niedrigeren Instandhaltungskosten durch den einfachen Systemaufbau [Thermo King 2003b]. Für den Überlandverkehr ist eine Kombination mit einer Kälteanlage mit konventionellem Dieselantrieb möglich [Peilnsteiner, Truskiewitz 2002]. Eine vollständige Ökobilanz, die einen Vorteil der Techniken mit CO₂ als Verbrauchskältemittel im Vergleich mit optimierten Kompressorkälteanlagen belegt, liegt bisher nicht vor.

Kühlcontainer

In Kühlcontainern ist der Einsatz von Kohlenwasserstoffen oder Ammoniak wegen ihrer Brennbarkeit nach den internationalen Regeln für die Schifffahrt (IMO-Regularien) nicht zulässig. Der Einsatz von CO₂ wurde im Rahmen verschiedener, von der dänischen Umweltbehörde geförderter Projekte vor einigen Jahren erprobt. Beteiligt waren u. a. Komponentenhersteller, Hersteller der Kälteanlagen sowie Anwender [Kauffeld, Christensen 1998]. Neben bisher nicht geklärten technischen Fragen sind beim Einsatz von CO₂ auch logistische Probleme zu lösen. So muss vor einem breiten Einsatz sichergestellt sein, dass in jedem Hafen ein Reserveaggregat zur Verfügung steht [Bock 2003; VDR 2003]. Da die Container mittlerweile nur noch in China hergestellt werden, und Container international eingesetzt werden, sind Maßnahmen zur Umstellung auf CO₂ als Kältemittel auf internationaler Ebene erforderlich.

Schiffe

In den Kälteanlagen von Hochseefischerei-Schiffen (Fabrikschiffe) wird neben dem HFCKW-22 für die großen benötigten Kälteleistungen bis heute Ammoniak eingesetzt. Bei Schiffsneubauten wird HFCKW-22 nicht durch HFKW, sondern durch Ammoniak oder Ammoniak/CO₂ ersetzt [Schwarz 2003b; Lindborg 2003; Lund 2003].

Auch auf Kühlschiffen werden Ammoniak-Kälteanlagen eingebaut [Grasso 2003b]. Allerdings, werden heute nur noch wenige Kühlschiffe mit Kälteanlagen gebaut.

Von der Germanischen Lloyd (Schiffsklassifikationsgesellschaft) gibt es für Schiffskälteanlagen spezielle Vorschriften zu Ammoniak. Die Einhaltung dieser Sicherheitsauflagen führt zu einer Verteuerung der Kälteanlagen [Grasso 2003b]. Bei Fabriksschiffen mit Kälteanlagen großer Leistung werden die höheren Investitionskosten durch geringe Betriebskosten ausgeglichen.

Sonst gibt es nur einige Schiffe mit Ammoniakkälteanlagen. Ein Beispiel ist das Greenpeace Schiff *Esperanza*. Auf einem der weltgrößten Schiffe zum Schockgefrieren von Fisch wird mit einer Kaskadenkälteanlage mit Ammoniak und CO₂ gekühlt. Ein weiteres Beispiel für den Einsatz natürlicher Kältemittel bei Schiffen ist die Ausrüstung eines speziellen Rohöltransport- und Behandlungsschiffes mit einer 5 MW Kühlung mit dem Kältemittel Propan [eurammon 2007].

Mit dem Umweltzeichen UZ 110 „Umweltschonender Schiffsbetrieb“ [UZ 110] hat die Jury Umweltzeichen Anforderungen an einen umweltgerechten Schiffsbetrieb festgelegt. Eine der Anforderungen bezieht sich auf die eingesetzten Kältemittel: Diese dürfen kein ODP besitzen. Der Einsatz von FCKW und HFCKW ist somit ausgeschlossen. Da HFKW nicht in allen Anwendungen auf Schiffen durch umweltgerechtere Stoffe ersetzt werden können, sind HFKW als Kältemittel zwar zugelassen, ein GWP₁₀₀-Wert von 1.650 darf aber nicht überschritten werden. Das UZ 141 „Umweltfreundliches Schiffsdesign“ hat diese Anforderung übernommen [UZ 141]. Das UZ 110 wird seit 2009 überarbeitet und zukünftig den Einsatz der Kältemittel von Ammoniak und/oder CO₂ als eine optionale Maßnahme festlegen.

Schlussfolgerungen

Straßenfahrzeuge

Prototypen von CO₂-Transportkälteanlagen sind für den Frisch- und Tiefkühlendienst bereits entwickelt worden und haben Praxistests bestanden. Optimierungen bezüglich der Energieeffizienz sind wünschenswert. Der Einsatz der CO₂-Anlagen in der Transportkälte (Kühlfahrzeuge, insbesondere Frischdienst) hängt auch von den Entwicklungen im Pkw-Bereich ab (s. Kap. 3.3.7.1). Wenn sich bei Pkw eine positive Entwicklung in Richtung CO₂ abzeichnet, wird mittel- bis langfristig auch eine Entwicklung effizienter, kostengünstiger CO₂ basierter Systeme bei Kühlfahrzeugen möglich sein.

Andere Systeme auf der Basis natürlicher Kältemittel wurden bereits erprobt. Insbesondere beim Einsatz brennbarer natürlicher Kältemittel sind sicherheitstechnische Fragen zu beachten und begrenzende normative Festlegungen zu überprüfen.

Der Einsatz von CO₂ als Verbrauchskältemittel im Frischdienst erfolgt vorrangig in Schweden. Eine umfassende Ökobilanz steht noch aus.

Die neuen Techniken sind in der Einführungsphase mit Mehrkosten verbunden. Die Markteinführung bedarf daher unterstützender Maßnahmen.

Kühlcontainer

Für Kühlcontainer wurde CO₂ als Kältemittel erprobt. Es sind noch technische und logistische Probleme zu lösen, die Entwicklung ist noch nicht abgeschlossen. Sofern CO₂ in anderen Bereichen als Kältemittel flächendeckend in den Markt eingeführt wird, sind Vereinfachungen im Bereich der Logistik für diesen Bereich möglich. Das könnte die Einführung von CO₂ für die Containerkühlung vorantreiben. Da Kühlcontainer weltweit transportiert und heute nur noch in China hergestellt werden, muss der Einsatz von CO₂ als Kältemittel international gefördert und vereinbart werden.

Schiffe

Bei Fabriksschiffen und Kühlschiffen kann die Kälteversorgung problemlos mittels Ammoniak und/oder Ammoniak/CO₂-Anlagen erfolgen.

Andere Schiffe, die nur geringere Kälteleistungen benötigen, etwa zur Kühlung von Provianträumen, verwenden HFKW als Kältemittel. Die Möglichkeit der Kühlung mit halogenfreien Kältemitteln ist im Einzelfall zu prüfen. Bereits heute lassen sich Beispiele finden, bei denen vollständig auf den Einsatz von HFKW verzichtet wurde. Grundsätzlich unterscheiden sich die Möglichkeiten nicht von denen in anderen Anwendungsbereichen. Die speziellen Vorschriften zu Schiffskälteanlagen sind zu beachten.

Sofern HFKW zum Einsatz kommen, müssen Betreiber zukünftig Maßnahmen zur Emissionsminderung treffen und sollten ein Kältemittel mit einem geringen GWP wählen.

3.3.5 Klimatisierung von Räumen und Gebäuden

Noch bis vor wenigen Jahren blieb die Klimatisierung von Räumen oder Gebäuden in Deutschland auf wenige Nutzungsarten beschränkt. Zu klimatisierten Gebäuden zählten z. B. Luxushotels, Produktionsstätten mit besonderen Anforderungen an Temperatur und Luftfeuchte oder Räume mit besonderen Hitzelasten (z. B. Computerräume). Durch den erhöhten Lebensstandard sind die Erwartungen an den Komfort in Wohn- und Arbeitsräumen gestiegen. In der Folge hat der Klimatisierungsgrad in vielen Lebensbereichen zugenommen. Häufig wird auf eine Klimatisierung mittels Klimaanlage und damit auf den Einsatz von Kältemitteln zurückgegriffen.

In diesem Kapitel wird zwischen Raumklimageräten mit Kühlleistungen zwischen 1 bis 50 kW (max. 100 kW) und der Klimatisierung von Räumen und Gebäuden mittels

Kälteanlagen größerer Leistungen unterschieden. Split- und Multi-Split-Klimageräte sind in Kapitel 3.3.5.1 und Flüssigkeitskühlsätze, die bereits ab Kühlleistungen von 5 kW Einsatz finden, sind im Kapitel 3.3.5.2 abgehandelt.

Die Klimatisierung von Räumen und Gebäuden war im Jahr 2002 die Quelle für etwa 120 t HFKW-Emissionen [BReg 2004]. Allein aus Raumklimageräten emittierten im Jahr 2001 etwa 5 t [Schwarz 2003b]. Der HFKW-Bestand betrug im Jahr 2002 in diesem Anwendungsbereich etwa 2.300 t [BReg 2004].

3.3.5.1 Raumklimageräte

Unter dem Begriff Raumklimagerät werden verschiedene Gerätetypen zusammengefasst. Je nach Gerät kann die Raumluft gekühlt, entfeuchtet oder auch erwärmt werden. Der überwiegende Teil der z. B. in Japan produzierten Klimageräte ist „umschaltbar“ und damit auch zum Heizen geeignet. Diese im Englischen als „Heat-Pump-Air-Conditioner“ bezeichneten Geräte sind aber von den in Deutschland gebräuchlichen Heizungswärmepumpen (s. Kap. 3.7) zu unterscheiden.

Grundsätzlich kann zwischen Geräten mit Abluftschlauch (mobile Raumklimageräte) und Geräten mit Außenteil (Split-Geräten) unterschieden werden. Splitgeräte mit Außenteil wälzen die Raumluft um und entziehen die Wärme mittels eines Kältemittels. Schlauchgeräte entsorgen die Abwärme des Kondensators über den Abluftschlauch nach außen und saugen gleichzeitig warme Außenluft in den zu kühlenden Raum. Die Kühlwirkung dieser Geräte ist dadurch sehr gering.

Mobile Raumklimageräte haben ihre Anwendung dort, wo schnelle, flexible Lösungen gefragt sind. Sie sind nur für den kurzzeitigen Einsatz (z. B. zur Überbrückung kurzer Hitzeperioden) und nicht für den Dauerbetrieb geeignet. Typische Anwendungsbereiche sind Arbeits- und Wohnräume [Stiebel Eltron 2003a]. Die Leistungsbereiche (Kühlleistung) der Geräte liegen zwischen 1 bis 5 kW.

Des Weiteren gibt es Kompakt-Klimageräte mit einem hermetisch geschlossenen kompakten Kältekreislauf im Leistungsbereich von etwa 1,5 bis 9 kW und meist stationäre Split-Raumklimageräte bis ungefähr 15 kW. Letzteres sind Geräte, die aus einem jeweils werksmäßig hergestellten Innengerät (Verdampfer) und einem Außengerät (Verdichter-Verflüssiger-Einheit) bestehen, aber vor Ort zu einer Anlage mit Kältemittel-Verbindungsleitungen zusammengefügt werden.

In einem Artikel der Zeitschrift „test“ der Stiftung Warentest schreiben die Autoren zum Testergebnis von mehreren Monosplit- und Kompaktklimageräten von 2 bis 4 kW Leistung: „Aus Umweltsicht sind Klimageräte wegen Ihres Stromverbrauchs keine empfehlenswerten Produkte. Intelligenter Hitzeschutz mit Schattenspendern ist besser“. Und weiter: „Verbessern Sie [...] den baulichen Hitzeschutz. Wo übermäßig viele Sonnenstrahlen gar

nicht erst ins Haus gelangen können, droht auch keine extreme Überhitzung. Häufig kann schon ein Außenrollladen Wunder wirken“ [test 2008].

In Leistungsbereichen bis 50 kW (max. bis 100 kW) kommen stationäre Multi-Split-Raumklimageräte zur Anwendung, die aus mehreren Innenteilen bestehen, die an ein Außenteil angeschlossen sind [Daikin 2003]. Multi-Split-Geräte werden meist als VRF-Geräte bezeichnet (VRF: variable refrigerant flow). Durch die Installation mehrerer VRF-Raumklimageräte können auch größere Gebäude klimatisiert werden. Diese Technik steht dann in Konkurrenz zu den üblicherweise zur Gebäudeklimatisierung eingesetzten zentralen Anlagen. Zentrale Anlagen und die dort vorhandenen Möglichkeiten des Einsatzes halogenfreier Kältemittel sind in Kapitel 3.3.5.2 beschrieben.

Stationäre Klimageräte können sehr leise sein und eignen sich für den Dauerbetrieb. Innen- und Außenteil dieser Geräte sind meist durch Kupferrohrleitungen miteinander verbunden. Die Anwendungsbereiche sind mit Arbeits- und Wohnräumen, technischen Räumen, Weinkellern etc. vielfältiger als bei mobilen Geräten [Stiebel Eltron 2003a].

Auch Geräte mit Innen- und Außenteil (Split-Geräte) können als mobile Geräte ausgeführt sein. Meist sind in diesem Fall beide Teile mit einer festen „Nabelschnur“ verbunden, so dass die kleine Außeneinheit auf die Fensterbank oder auf den Balkon gestellt werden kann [Fachinstitut Gebäude-Klima 2003].

Die überwiegende Zahl der Geräte, die in Deutschland auf dem Markt sind, werden in Asien, einige im europäischen Ausland produziert [Daikin 2003].

Als Kältemittel wurden zunächst FCKW und HFCKW, zuletzt vor allem R 22, eingesetzt, die heute für Neugeräte in der EU verboten sind. Als Ersatz werden überwiegend HFKW-Gemische wie R 407C und R 410A, aber auch Kohlenwasserstoffe (R 290/Propan) eingesetzt [TÜV Süd 2003a; Daikin 2003; Delonghi 2009]. Bereits mit R 22 hergestellte Geräte wurden im Jahr 2000, da der Verkauf mit R 22 in Deutschland nicht mehr erlaubt war, auf das HFKW-Gemisch R 417A umgerüstet [Rhodia 2000].

Split-Klimageräte werden auch in Kaufhäusern, Baumärkten und zum Teil Supermärkten vertrieben. Dies ist im Hinblick auf die Kältemittlemissionen, besonders bei unsachgemäßem Umgang, problematisch. Diese Geräte bedürfen im Gegensatz zu „steckerfertigen Geräten“ (mobilen Raumgeräten) einer Installation durch Fachleute. Dieses ist für den Käufer aber häufig nicht oder erst nach dem Studium der Bedienungsanleitung ersichtlich. Bei nicht fachgerecht installierten Geräten muss aber von erhöhten Kältemittelleckagen ausgegangen werden; teilweise bis zum Totalverlust.

Die HFKW-Emissionen lagen im Jahr 2008 bei 321 t, was der 64fachen der im Jahr 2001 emittierten Menge entspricht [Schwarz 2009b]. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass seit dem endgültigen Verbot von R 22 im Jahr 2000 überwiegend Geräte mit HFKW auf den

Markt kommen. Die Schätzung der Emissionsraten geht von einer fachgerechten Installation der Geräte aus.

Minderungsmöglichkeiten

Bei Splitgeräten, bei denen sich die Innenteile in Wohn- oder Büroräumen befinden, gibt es eine direkte Verbindung zu den Räumen. Dadurch ist der Einsatz von halogenfreien Kältemitteln, wie z. B. Kohlenwasserstoffen, erschwert [Daikin 2003].

Dennoch werden insbesondere bei mobilen Raumklimageräten von einigen europäischen Herstellern auch Kohlenwasserstoffe (R 290) eingesetzt [TÜV Süd 2003a; Daikin 2003; Delonghi 2009]. Vereinzelt sind auch Split-Klimageräte mit Kohlenwasserstoffen auf dem Markt [Delonghi 2009]. Diese Klimageräte haben eine Füllmenge zwischen < 500 g und 1.000 g [TÜV Süd 2003a]. Allgemein kann als Näherung mit 0,25 kg (bei Kohlenwasserstoffen mit 0,15 kg) Kältemittel pro kW Kälteleistung gerechnet werden [UNEP 2003]. Die Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) hat in Zusammenarbeit mit dem chinesischen Hersteller Gree ein Split-Klimagerät mit dem Kältemittel Propan entwickelt, welches eine maximale Füllmenge von 330 g aufweist und abhängig von der Gerätegröße Leistungen zwischen 2,7 und 3,5 kW erzielt. Die Geräte erreichen einen COP von mindestens 3,5, was die europäischen Anforderungen für die Energieeffizienzklasse A deutlich übertrifft. Im Falle einer Leckage stoppt der Kompressor, um hohe Temperaturen zu vermeiden, wohingegen der Ventilator weiterläuft und dadurch das austretende Kältemittel verdünnt und damit brennbare Konzentrationen verhindert. Akustische und optische Warnsignale zeigen eine vorhandene Leckage an. Mit der Serienproduktion soll 2010 begonnen werden [Hasse 2009]. Auch andere Hersteller stehen kurz vor der Markteinführung von Monosplit-Systemen mit Kohlenwasserstoffen [Hydrocarbons21 2010].

In UNEP [UNEP 2003] wird ausgeführt, dass eine Reihe von Organisationen Risikobewertungen durchgeführt haben, die im Ergebnis ein eher geringes Feuer- oder Explosionsrisiko durch einen Kohlenwasserstoff-Einsatz zeigen. Das Risiko ist dabei proportional zur Füllmenge. Voraussetzung für einen breiten Einsatz von Kohlenwasserstoffen sind aber auch bei einem nur geringen Risiko anerkannte Normen und Regeln für ihren Einsatz. Energetisch ist der Einsatz von Kohlenwasserstoffen (Propan) positiv zu beurteilen [UNEP 2003; Calor 2002].

Obwohl der Einsatz von CO₂ im Klima-/Komfortbereich bisher als technisch schwierig und energetisch ungünstig eingeschätzt wurde [Daikin 2003], ist kürzlich der erste Prototyp eines VRF-Klimatisierungssystem mit CO₂ als Kältemittel vorgestellt worden [Daikin 2009; CCI 2008]. Dieses ist so konzipiert, dass es wahlweise mit CO₂ oder dem HFKW-Gemisch R410A betrieben werden kann. Für die Variante mit CO₂ wurde eigens ein Kompressor (Swing-Kompressor) sowie eine neue Wärmetauscher- und Ventiltechnologie entwickelt, um die hohen Kondensationsdrücke von bis zu 123 bar zu erreichen. Mit der Auslieferung

der ersten serienreifen Anlagen ist jedoch nicht vor 2012 zu rechnen. Trotzdem ist gerade im Hinblick auf die neuerdings angebotenen Wärmepumpen mit dem Kältemittel CO₂ (s. Kap. 3.3.6) davon auszugehen, dass hier in Zukunft weitere Fortschritte erzielt werden und eine wachsende Zahl von Herstellern ähnliche Splitsysteme anbietet.

Im Vergleich zu Kompakt-Geräten ist die Kältemittelfüllmenge bei VRF-Geräten (größere Kälteleistung) groß. Wegen der Konstruktion dieser Geräte (ein Außenteil und mehrere Innengeräte mit der Folge vieler Anschlüsse) ist auch das Risiko von Kältemittelleckagen größer, nicht zuletzt durch die hierfür benötigte Gesamtlänge der Rohrleitungen, die nicht selten mehrere hundert Meter bis einige Kilometer betragen kann [KI 2008b]. Die Leckagerate liegt bei ungefähr 5-15 % [Jakob 2009]. In den meisten Fällen kann auf andere Möglichkeiten der Klimatisierung mit geringeren Kältemittelfüllmengen und geringeren Kältemittlemissionen zurückgegriffen werden. Hier bieten sich zum Beispiel Flüssigkeitskühlsätze mit Ammoniak an (s. Kap. 3.3.5.2).

Eine weitere Möglichkeit zur Emissionsminderung sind auch in dieser Anwendung technische und/oder organisatorische Maßnahmen. Hierzu gehört auch die Installation durch Fachpersonal.

Schlussfolgerungen

Bei Raumklimageräten ist zwischen mobilen Kompakt-Geräten sowie meist stationären Split- und Multi-Split(VRF)-Geräten zu unterscheiden.

In mobilen Geräten, in denen Kältemittelfüllmengen unter 500 g realisierbar sind, ist der Einsatz von halogenfreien Kältemitteln (Kohlenwasserstoffen) auch unter sicherheitstechnischen Gesichtspunkten möglich. Insbesondere im Bereich der Normung sind bessere Voraussetzungen/Randbedingungen zu schaffen, um einen sicheren Einsatz von Kohlenwasserstoffen in größerem Umfang in den geeigneten Bereichen zu ermöglichen.

Lediglich bei Split- oder Multi-Split-Geräten kann heute nicht vollständig auf HFKW verzichtet werden. Vereinzelt sind aber auch (kleinere) Split-Geräte mit Propan auf dem Markt. Als Alternative zur Installation mehrerer VRF-Klimageräte mit in der Summe großen HFKW-Füllmengen bietet sich die Installation einer zentralen Klimaanlage an (s. Kap. 3.3.5.2).

Von einem breiten Einsatz von CO₂ kann heute nicht ausgegangen werden, wobei zukünftige Entwicklungen in diesem Bereich abzuwarten sind.

Bei Geräten, die direkt an den Endverbraucher verkauft werden, sollte - sofern erforderlich - deutlich sichtbar auf die Notwendigkeit der Installation durch einen Fachbetrieb hingewiesen werden.

3.3.5.2 Gebäudeklimatisierung / Flüssigkeitskühlsätze

Während allgemein unter Gebäudeklimatisierung die Klimatisierung eines gesamten Gebäudes verstanden wird, wird in diesem Kapitel - sofern ähnliche Anlagen zum Einsatz kommen - auch die Klimatisierung von Gebäudeteilen (Raumklimatisierung) mit abgehandelt, z. B. von Arztpraxen, Verkaufsräumen u. a.. (Multi-)Split-Klimageräte, die für diese Anwendungen ebenfalls eingesetzt werden, sind in Kapitel 3.3.5.1 beschrieben.

Zur Gebäudeklimatisierung sind heute vielfältige Systemlösungen denkbar. Sofern nicht wegen bautechnischer Maßnahmen vollständig auf zusätzliche Systeme verzichtet wird, können Kompressions-, Absorptions- und Adsorptionskältemaschinen zur Anwendung kommen (s. auch Kap. 3.1). In neuen Gebäuden können und werden vor allem die beiden letztgenannten Systeme heute an eine regenerative Energieversorgung gekoppelt (Solarkollektoren, geothermische Systemlösungen etc.) [Wolkenhauer 2002].

Trotz der heute vielen möglichen Systeme erfolgt der überwiegende Teil der Gebäudeklimatisierung weiterhin mittels Kompressionskältemaschinen. Eingesetzt werden Direktverdampfung und Flüssigkeitskühlsätze (Kaltwassersätze, Wasserkühlsätze), häufig mit Turboverdichtern. Unterhalb von etwa 1.000 kW werden Flüssigkeitskühlsätze ohne Turboverdichter eingesetzt. Wie oben genannt werden in einigen Fällen aber auch andere Kältetechniken verwendet, z. B. Wasser-Lithiumbromid(LiBr)- oder Ammoniak-Wasser-Absorptions-Maschinen sowie Adsorptionskältemaschinen [TÜV Süd 2003a; Wolkenhauer 2002].

Die verschiedenen Lösungsansätze zur Gebäudeklimatisierung ohne Kälteanlagen und Möglichkeiten der Energieeinsparung, z. B. durch Abwärmenutzung, werden in diesem Bericht nicht diskutiert, obwohl die Wahl der Kältemaschine in einem Zusammenhang mit der gewählten Energieversorgung und der gewählten Gesamtlösung steht. Dieses komplexe Zusammenspiel muss aber bei der Konzeption und beim Betrieb des Gesamtsystems berücksichtigt werden.

Flüssigkeitskühlsatz

Flüssigkeitskühlsätze (Kaltwassersätze) kühlen Wasser oder einen anderen Kälte Träger; die Klimatisierung erfolgt über einen Verteiler-Kreislauf. Bei Flüssigkeitskühlsätzen unterscheidet man z. B. nach der Leistung oder nach der Verdichterart. Ab Kälteleistungen von 700 kW werden häufig Turboverdichter eingesetzt. Alternativ können auch durch mehrere Flüssigkeitskühlsätze mit Schraubenverdichtern sehr große Kälteleistungen erzeugt werden.

Flüssigkeitskühlsätze zur Gebäudeklimatisierung haben Leistungsbereiche von etwa 30 kW (in Einzelfällen, z. B. für Arztpraxen, ab 5 kW) bis etwa 30 MW, zum Teil auch darüber hinaus. Die Kühlung kann als Luftkühlung oder Wasserkühlung ausgeführt werden. Die Betriebskosten (Wasserpreis versus Energiepreis, Wartungskosten), aber auch die

Installation einer Wasserkühlung (Wasserturm) sind höher gegenüber der luftgekühlten Ausführung. Energetisch sollte wegen des zum Teil deutlich geringeren Energieverbrauchs die Wasserkühlung bevorzugt werden [Anhörung 2003].

Flüssigkeitskühlsatz (HFKW)

Auf dem deutschen Markt sind Flüssigkeitskühlsätze bis etwa 100 kW Kälteleistung als industriell gefertigte (größtenteils im Ausland), anschlussfertige Produkte erhältlich (Kolben- und Scrollverdichter, s. Kap. 3.1). Diese Flüssigkeitskühlsätze haben Füllmengen von 1 bis 50 kg Kältemittel und sind zu großen Teilen aus Kupfer gefertigt. Der Einsatz von Ammoniak ist damit in diesen Geräten ausgeschlossen. Vor Ort muss bei diesen Geräten nur noch der Wasseranschluss realisiert werden. Sie werden heute fast ausschließlich mit HFKW (z. B. 407C) betrieben [KKW, HEA 2003]. Früher kam im Wesentlichen R 22 zum Einsatz [FKW 1998b]. Neben der Klimatisierung werden diese Geräte auch in der Industrie, der Medizin und teilweise im Gewerbe eingesetzt [KKW, HEA 2003].

Auch in höheren Leistungsbereichen, bis etwa 900 kW, werden vielfach HFKW wie R 134a oder R 407C eingesetzt [KKW, HEA 2003, Clivet 2009].

Insbesondere Turbokaltwassersätze, die für Kälteleistungen etwa ab 250 kW eingesetzt werden [Axima 2009], wurden bis zum FCKW-Verbot nahezu ausschließlich mit dem FCKW-11 betrieben. Heute wird R 11 in Neuanlagen durch den HFKW-134a ersetzt [FKW 1998a]. Es wird auf Kapitel 3.1.1 (Turboverdichter, technische Ausführungen) und 3.3.3.2 (Turboverdichter, Kältemittel) verwiesen.

Minderungsmöglichkeiten

Wie oben dargestellt, gibt es zahlreiche Systemlösungen zur Klimatisierung von Gebäuden; bis hin zu den hier nicht betrachteten bautechnischen Maßnahmen, die einen (nahezu) vollständigen Verzicht auf eine zusätzliche Kälteversorgung ermöglichen. Bei der Beschreibung der Minderungsmöglichkeiten wird deshalb im Folgenden zwischen verschiedenen Technologien unterschieden.

Flüssigkeitskühlsatz (HFKW-frei)

Technisch ist der Einsatz aller Kältemittel in Flüssigkeitskühlsätzen möglich [Axima 2003a; KKW, HEA 2003].

Bei der Verwendung halogenfreier Kältemittel wie Kohlenwasserstoffen oder Ammoniak kommt erneut die Haftungsfrage zum Tragen [KKW, HEA 2003]. Im Unterschied zu Kohlenwasserstoffen, die in der Kältetechnik relativ neu sind und wo es Unsicherheiten in Bezug auf die technischen Anforderungen (Normen etc.) und die Rechtsprechung gibt, ist mit Ammoniak eine seit vielen Jahren erprobte und anerkannte Technologie gegeben. Die Haftungsfrage wird hier bei den Herstellern als weniger problematisch gesehen [Axima 2003a; Grasso 2003a].

Ammoniak

Bereits heute gibt es ab Kälteleistungen von etwa 30 kW (Klimatisierung kleiner Gebäude) Flüssigkeitskühlsätze mit Ammoniak [Behnert, König 2003; KI 2008a]. Im Zuge des FCKW-Ausstiegs Anfang bis Mitte der neunziger Jahre kamen zunächst vermehrt kompakte, anschlussfertige Flüssigkeitskühlsätze mit Ammoniak auf den Markt. Dieser Trend wurde durch die Vermarktung von Flüssigkeitskühlsätzen mit HFKW unterbrochen, die zum Teil in den Investitionskosten günstiger sind, dafür aber meist höhere Energieverbräuche haben und damit höhere Betriebskosten verursachen. In wassergekühlten, anschlussfertigen Flüssigkeitskühlsätzen können die Füllmengen an Ammoniak heute stark reduziert werden. Realisiert werden $< 3 \text{ kg/100 kW}$ [Axima 2003b; Behnert, König 2003].

Größere Flüssigkeitskühlsätze, wie sie vielfach in der Industrie Anwendung finden, werden häufig mit Ammoniak betrieben [KKW, HEA 2003; Grasso 2009]. Insbesondere zur Klimatisierung großer Gebäude gibt es mit Flüssigkeitskühlsätzen (Schraubenverdichter, Kälteleistungen ab etwa 0,2 MW) eine technisch gute Lösung ohne HFKW. Sowohl in Deutschland wie auch in anderen Ländern wurden bereits viele Ammoniak-Flüssigkeitskühlsätze zur Klimatisierung großer Gebäude realisiert [Anhörung 2003; Grasso 2003b]. So wird zum Beispiel der Gebäudekomplex des Berliner Ostbahnhofs, bestehend aus Ladenpassage, Hotel- und Bürogebäude, über vier Kompaktflüssigkeitskühlsätze mit einer Gesamtleistung von 1.600 kW klimatisiert [eurammon 2009].

Bei der Entscheidung für ein Kältemittel müssen die Aufstellungsbedingungen berücksichtigt werden. Selbstverständlich müssen vorhandene Richtlinien, die z. B. die Aufstellung von Ammoniak-Anlagen in Bereichen mit großem Publikumsverkehr untersagen, beachtet werden. Es ist grundsätzlich zu prüfen, ob eine Aufstellung in einem separaten Maschinenraum möglich ist, ob ein Hochhaus/Hotel klimatisiert werden soll, wo die Anlage im Keller (= Maschinenraum) oder auf dem Dach oder innerhalb des Gebäudes (Techniketage) steht bzw. stehen kann, und wie viel Publikumsverkehr es gibt. Der Aufstellungsort für kleinere Geräte kann wegen der Flexibilität von Wasserleitungen relativ gut frei bestimmt werden. Vor allem bei Neubauten lassen sich aber auch für größere Anlagen Aufstellungsorte realisieren, die den Einsatz von Ammoniak ermöglichen [Axima 2003a].

Ein von eurammon [eurammon 1998] veröffentlichter Energieverbrauchsvergleich auf Basis von COP-Werten zeigt, dass Ammoniak-Flüssigkeitskühlsätze (500 kW, Schraubenverdichter) im Vergleich mit R 134a-Anlagen eine geringere Leistungsaufnahme haben. Damit sind in der Regel auch die Energiekosten beim Einsatz des Kältemittels Ammoniak erheblich niedriger.

Demgegenüber sind die Investitionskosten für Ammoniak-Anlagen gegenüber HFKW-Anlagen höher, wobei die genauen Kostenunterschiede nicht pauschal angegeben werden

können. Sie hängen von den jeweiligen Anforderungen und der jeweiligen Ausführung ab [Anhörung 2003]. Für eine ökonomische Bewertung von Ammoniak und HFKW als Kältemittel ist somit eine Gesamtwirtschaftlichkeitsbetrachtung erforderlich.

Kohlenwasserstoffe

In der petrochemischen Industrie werden Flüssigkeitskühlsätze mit Kohlenwasserstoffen schon lange eingesetzt [UNEP 2003]. Seit 1997/98 bieten laut UNEP [UNEP 2003] europäische Hersteller trotz der hohen Sicherheitsanforderungen auch Flüssigkeitskühlsätze (Luft- oder Wasserkühlung) mit Kohlenwasserstoffen für den Klimabereich (Gebäudeklimatisierung) an. Als Kältemittel kommen R 1270 (Propylen), R 290 (Propan) und R 290/R 170-Gemische (Propan/Ethan) in Füllmengen von 3 bis 34 kg zum Einsatz. Als Leistungsbereiche werden 20 kW bis 1.265 kW angegeben [Earthcare 2009], wobei die möglichen Leistungen von dem gewünschten Temperaturbereich abhängig sind. Die Energieeffizienz ist vergleichbar mit R 134a-Flüssigkeitskühlsätzen [UNEP 2003].

Bezüglich der Aufstellung von Kohlenwasserstoff-Flüssigkeitskühlsätzen gelten im Grundsatz die Aussagen zu Ammoniak (siehe weiter vorne). Zusätzlich sind Explosionsschutzmaßnahmen erforderlich. Dadurch und durch die bisher geringen produzierten Stückzahlen sind Flüssigkeitskühlsätze mit Kohlenwasserstoffen als Kältemittel etwas teurer [UNEP 2003].

In Anlagen zur Gebäudeklimatisierung mit höheren Kälteleistungen wurde der Einsatz von Kohlenwasserstoffen wegen der erforderlichen großen Füllmengen bisher ausgeschlossen [Axima 2003a; Grasso 2003a]. Einige Beispiele in England verdeutlichen jedoch, dass R290-Flüssigkeitssätze mit Außenaufstellung eine Alternative zu HFKW-Anlagen in der Klimatisierung darstellen [Earthcare 2010].

Ammoniak / Dimethylether (DME)

Das Kältemittel R 723, ein azeotropes Gemisch, das zu 60 % aus Ammoniak und zu 40 % aus Dimethylether besteht, ist als umweltfreundliche und effiziente Alternative zu den HFKW-haltigen Kältemitteln fest am Markt etabliert. Für verschiedene Anwendungen, darunter die Gebäudeklimatisierung, stehen Anlagen mit einer Leistung ab 10 kW zur Verfügung [KI 2008a]. Huber [2003] berichtete über erste Erfahrungen mit einem Wasserkühlsatz zur Kühlung einer Kunststoffteileproduktion. Er bezifferte die Mehrkosten gegenüber HFKW-Anlagen auf etwa 10 %. Bis heute werden die Komponenten für Anlagen mit kleineren Leistungen immer noch in relativ geringen Stückzahlen hergestellt, was die Investitionskosten dieser Anlagen gegenüber solcher mit HFKW um etwa 20-30 % verteuert [Frigopol 2009]. Den Mehrkosten gegenüber steht die höhere Energieeffizienz der Ammoniak/DME-Anlagen, welche die laufenden Energiekosten um 25-30 % reduziert und für eine schnelle Amortisierung (2-3 Jahre) der Investitionsmehrkosten sorgt.

CO₂

Wie auch bei den VRF-Anlagen galt der Einsatz von CO₂ als Kältemittel in größeren zentralen Anlagen wegen der in der Klimatisierung gewünschten Temperaturen (Klimabereich) bis vor wenigen Jahren als ausgeschlossen. Dies lag zusätzlich darin begründet, dass weder Komponenten für die entsprechenden Drücke zur Verfügung standen, noch deren Entwicklung mittelfristig zu erwarten war [KKW, HEA 2003]. Letzteres war dadurch bedingt, dass die mittels CO₂ im Klimabereich zu erreichenden Energieeffizienzen als zu schlecht eingeschätzt wurden, um gegen HFKW-Anlagen konkurrieren zu können [UNEP 2003]. Trotz dieser Hindernisse wurde vor kurzem eine Klimaanlage für Bürogebäude vorgestellt, die einen Leistungsbereich von 50 bis ca. 340 kW abdeckt. Die Anlage ist als Direktverdampfungssystem ausgelegt, benötigt daher keinen zusätzlichen Wasserkreislauf mit den dazugehörigen Pumpen und übertrifft daher konventionelle HFKW-Anlagen in der Energieeffizienz um 10-20 %. Zusätzlich ist mit geringeren Installationskosten zu rechnen [R744 2009]. Siehe auch Kapitel 3.3.2.3.

Kosten

Untersuchungen zu den auf CO₂-Äquivalente bezogenen Vermeidungskosten liegen nur aus dem Jahr 2000 vor. Harnisch und Hendriks [Harnisch, Hendriks 2000] geben als durchschnittliche Vermeidungskosten für die stationäre Klimatisierung mittels Flüssigkeitskühlsätzen 49 € und 173 € je Tonne CO₂ für die EU an. Erstgenannte Kostenschätzung bezieht sich auf eine Substitution von HFKW durch halogenfreie Kältemittel, zweitgenannte auf die Reduzierung der HFKW-Emissionsraten. Damit beurteilen Harnisch und Hendriks [Harnisch, Hendriks 2000] die Substitution des Kältemittels HFKW im Vergleich zu anderen Maßnahmen einer HFKW-Emissionsminderung als wesentlich kostengünstiger. Im Vergleich mit anderen CO₂-Minderungsmaßnahmen liegen die auf CO₂-Äquivalente bezogenen Vermeidungskosten für die HFKW-Substitution in dieser Anwendung im mittleren bis oberen Bereich. Auch an dieser Stelle sollten diese Angaben nur als grobe Schätzungen, basierend auf einer Vielzahl von Annahmen, gesehen werden. Für Einzelheiten zu den zu Grunde gelegten Annahmen wird auf die Quellstudie verwiesen.

Turbokälteanlagen mit Wasser (R 718) als Kältemittel

Für die Gebäudeklimatisierung wird auch Wasser als Kältemittel in Turbo-Kälteanlagen eingesetzt (s. Kap. 3.1.1 und Kap. 3.3.3.2). Die Vorteile von Wasser als Kältemittel sind vor allem seine uneingeschränkte Verfügbarkeit, der niedrige Preis, die einfache Handhabbarkeit und die Ungiftigkeit [ILK 2003b]. In Deutschland werden bisher nur vereinzelt Anlagen mit Wasser betrieben. Ein Beispiel ist die Klimatisierung der *Gläsernen Manufaktur Dresden (VW)*. Derzeit wird im Rahmen eines vom BMBF geförderten Verbundforschungsvorhabens an der Entwicklung einer 3. Generation dieser R 718-Turbokaltwassersätze gearbeitet [ILK 2010]. Die Leistungsbereiche (Kälteleistung)

beginnen ab 400 kW. Nachteilig ist, dass mit Wasser grundsätzlich im Unterdruckbereich gearbeitet werden muss und dass das spezifische Volumen von Wasserdampf sehr groß ist. Es werden sehr große Volumenströme (50 m³/s) benötigt; die Verdichter sind sehr groß [ILK 2003a]. Energetisch sind die Anlagen vergleichbar oder besser als andere Anlagen [ILK 2003b]. Die Betriebskosten sind etwas geringer als bei HFKW-Anlagen, die Investitionskosten liegen jedoch deutlich über den Kosten vergleichbarer Anlagen mit HFKW als Kältemittel. Das liegt zum Großteil daran, dass die Anlagen mehr oder weniger als Einzelstücke gefertigt werden. Unterhalb von 400 kW Kälteleistung würden sich die Preisunterschiede noch verstärken [ILK 2003a].

Absorptionskältemaschinen (HFKW-frei)

Eine weitere Möglichkeit der HFKW-freien Klimatisierung basiert auf dem Einsatz von Absorptionskältemaschinen. Absorptionskälteanlagen werden in größeren Stückzahlen auch zur Gebäudeklimatisierung installiert. Als Arbeitsmittel (Kältemittel und Lösungsmittel) können verschiedene Stoffpaare eingesetzt werden, wobei heute nur zwei in Kälteanlagen technisch realisiert werden: Wasser/Lithiumbromid und Ammoniak/Wasser. Die Leistungsbereiche liegen bei 10 kW [Wiemken 2009] bis 17,5 MW [UNEP 2003] und decken damit auch den Bedarf von kleineren Gebäuden und Einfamilienhäusern ab. Die Investitionskosten sind für die Absorptionstechnik höher als für Kälteanlagen mit mechanischem Antrieb.

Als Kältemaschine mit thermischem Antrieb kann die Absorptionskältemaschine dafür mit wirtschaftlich sonst wenig nutzbarer thermischer Energie als Antriebsenergie versorgt werden, zum Beispiel mit Wärme aus Fernwärmenetzen oder einer Solaranlage. Als Wärmesenke entlasten Absorptionsanlagen (und Wärmepumpen, siehe 3.) die Fernwärmenetze im Sommer, wenn kaum Abnehmer für Wärme vorhanden sind. Da kein Kompressor für die Verdichtung des Kältemittels benötigt wird, verbrauchen Absorptionskältemaschinen weitaus weniger elektrische Energie als Kompressionskältemaschinen. Thermische Klimatisierungssysteme (Absorption und Adsorption) sparen Primärenergie, wenn der primärenergetisch bewertete jährliche Energiebedarf (Wärme sowie elektrische Hilfsantriebe) einer Sorptionskältemaschine kleiner ist als der primärenergetisch bewertete Strombedarf einer Kompressionskältemaschine. Sie leisten darüber hinaus einen erheblichen Beitrag zur Kappung von Leistungsspitzen an warmen Sommertagen, wenn viel Strom für die auf dem Kompressionsprinzip beruhenden Klimaanlage benötigt wird. Mit dieser Technik werden somit Treibhausgasemissionen aus zwei Quellen, Stromerzeugung und Kältemittel, vermieden bzw. gänzlich eliminiert.

Wirtschaftlich rechnet sich der Einsatz von Absorptionstechnik insbesondere dann, wenn eine günstige Wärmequelle (Abwärme) zur Verfügung steht. Absorptionskältemaschinen zeichnen sich durch eine einfache, robuste und sehr wartungsarme Anlagentechnik aus. Am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Boston, USA, sorgt eine

Absorptionskältemaschine seit Ende der 1930er Jahre für die Kältebereitstellung. Auch die Verwendung des umweltfreundlichen Kältemittels Wasser ist möglich [Grage, Pareidt 2000]. In Deutschland sind viele Gebäude mittels Absorptionskältemaschinen klimatisiert.

Adsorptionskälteanlage (HFKW-frei)

Adsorptionskälteanlagen arbeiten wie Absorptionskältemaschinen grundsätzlich ohne HFKW. Sie arbeiten mit Niedertemperaturwärme und sind besonders für den Einsatz von Solarenergie oder zur Nutzung von Abwärme - auch von Abwärme vergleichsweise niedriger Temperatur - geeignet. Ein großer Vorteil bei der Nutzung von Solarenergie ist, wie bereits erwähnt, die zeitliche Übereinstimmung von Kältebedarfsspitzen im Sommer und der für den Antrieb benötigten Solarwärme. Sie können gegenüber Kompressionskälteanlagen energetisch günstig betrieben werden, wenn der jährliche solare Deckungsanteil und die Kälteleistungszahl ausreichend groß sind [Schölkopf 2008]. Adsorptionskälteanlagen sind Stand der Technik und werden in letzter Zeit vermehrt zur Gebäudeklimatisierung eingesetzt. Als Arbeitsmittel kommen die Stoffpaare Silicagel/Wasser und Zeolith/Wasser zur Anwendung. Eine Flüssigsorptions-Pilotanlage mit dem Stoffpaar LiCl/Wasser sorgt im Solar Info-Center in Freiburg für die Klimatisierung von 310 m² Bürofläche [Wiemken 2009]. Flüssigsorptionsanlagen haben den Vorteil, dass sich ein Teil der Sonnenenergie in Form von regeneriertem Adsorbens speichern lässt und damit Schwankungen in der Sonneneinstrahlung bei gleichzeitig kontinuierlichem Kältebedarf ausgeglichen werden können. Adsorptionskälteanlagen zeichnen sich durch eine einfache Bauweise und hohe Zuverlässigkeit aus. In der Investition sind sie jedoch teurer als Kompressionskälteanlagen. In Deutschland sind mehrere Anlagen installiert. Für den Neubau des Umweltbundesamtes in Dessau wurde eine Adsorptionskälteanlage realisiert, deren Kälteleistung etwa 70 kW beträgt. Allgemeine technische Informationen sind in Kapitel 3.1.2 dargestellt.

Schlussfolgerungen

Die Gebäudeklimatisierung mittels Kälteanlagen ohne den Einsatz von HFKW ist mit vielen realisierten Projekten Stand der Technik. Es stehen folgende Optionen zur Verfügung:

1. Absorptionskältemaschinen,
2. Adsorptionskältemaschinen,
3. Flüssigkeitskühlsätze mit dem Kältemittel Ammoniak ab Kälteleistungen von etwa 20 kW,
4. Flüssigkeitskühlsätze mit Kohlenwasserstoffen als Kältemittel für Kälteleistungen von etwa 20 kW bis 1.200 kW und
5. Turbokälteanlagen mit Wasser als Kältemittel.

Die Wahl zwischen Kompressions- und Absorptions- oder Adsorptionskältemaschine wird entscheidend vom Gesamtkonzept, einschließlich der zur Verfügung stehenden Wärme- und Energiequellen, abhängen.

Wird ein Flüssigkeitskühlsatz als geeignete technische Lösung gewählt, wird sich der gewählte Verdichter (Kolben-, Schrauben-, Turboverdichter) nach der zu erbringenden Kälteleistung richten. Bereits ab einer Kälteleistung von 20 kW stehen HFKW-freie Lösungen zur Verfügung.

Die Kosten für Ammoniak-Flüssigkeitskühlsätze sind in der Anschaffung im Vergleich zu gängigen HFKW-Techniken etwas höher. Diese Mehrkosten können meist durch verringerte Betriebskosten (verringertes Energieverbrauch etc.) ausgeglichen werden. Somit ist der Einsatz von Ammoniak häufig auch unter ausschließlich ökonomischen Gesichtspunkten vorteilhaft; eine genaue Beurteilung ist nur auf Basis einer Gesamtwirtschaftlichkeitsbetrachtung möglich. Ökologisch ist der Einsatz von Ammoniak im Vergleich mit HFKW positiv zu beurteilen.

Turbokälteanlagen mit Wasser als Kältemittel sind - obwohl sie sich wegen der bisher geringen Stückzahl und den im Vergleich zu HFKW-Anlagen höheren Investitionskosten noch nicht durchsetzen konnten - eine unter ökologischen Gesichtspunkten interessante und zukunftsweisende Technologie, da sie als energetisch gleichwertig oder sogar besser beurteilt werden und bereits jede einzelne Anlage eine sehr große HFKW-Menge (Kältemittel) ersetzen kann.

Werden Absorptions- oder Adsorptionskältemaschinen gewählt, kann wirtschaftlich sonst wenig nutzbare Energie als Antriebsenergie genutzt werden. Beide Anlagenarten zeichnen sich durch eine einfache Bauweise und hohe Zuverlässigkeit aus. Während die Investitionskosten gegenüber mechanischen Kälteanlagen höher sind, können Betriebskosten gespart werden. Es ist ein breites Spektrum an Absorptionskältemaschinen (10 kW bis mehrere MW) erhältlich.

3.3.6 Wärmepumpen (Hauswärmepumpen)

Wärmepumpen (Wärmepumpenanlagen und -geräte) können Wärmeleistungen sehr unterschiedlicher Höhe bereitstellen. In diesem Kapitel werden Wärmepumpen betrachtet, die bis 50 kW Wärmeleistung liefern (Hauswärmepumpen). Diese Wärmepumpen werden als Heizungswärmepumpen zum Beheizen und Kühlen von kleinen Gebäuden (1-2 Familienhäuser) oder zur Erwärmung von Brauchwasser eingesetzt (Brauchwasserwärmepumpen). Wenn mehrere Häuser zusammengeschlossen werden, können Wärmeleistungen von 100 kW erforderlich werden [Stiebel Eltron 2003]. Wärmepumpen mit größeren Leistungen, ab etwa 500 kW, sind in Kapitel 3.3.3.6 betrachtet.

Während in Deutschland 1990 gerade einmal 400 Heizungswärmepumpen installiert wurden [Laue 2000], waren es 2001 bereits 10.100 [Frey 2003]. In den folgenden fünf Jahren ist die Installation von Wärmepumpen weiter stark angestiegen, teilweise in erheblichen Sprüngen. So wurden 2005 18.500 Anlagen installiert, während sich diese Zahl im darauffolgenden Jahr mit fast 44.000 Anlagen mehr als verdoppelte. 2008 sind nach Angaben des Bundesverbandes Wärmepumpen (BWP) 62.500 Anlagen installiert worden [BWP 2009]. Damit gab es seit Anfang der Neunziger Jahre einen fast stetigen Anstieg. Die bisher einmalig hohen Absatzzahlen von mehr als 20.000 um 1980 in Folge des Ölpreisschocks wurden damit seit 2006 mehrfach um mehr als das Doppelte übertroffen. Der Anteil von Wärmepumpen als Heizungsart bei Neubauten (Einfamilienhaus) lag in Deutschland im Jahr 2009 bereits bei 25 % [BWP 2010]. Auch in anderen europäischen Ländern verzeichnet der Wärmepumpenmarkt beeindruckende Absatzzunahmen. So wurden z.B. in Frankreich im Jahr 2008 ca. 135.000 Anlagen installiert [KK 2009], was einem Wachstum von 180 % im Vergleich zum Vorjahr entspricht.

Es werden in dem hier benötigten Leistungsbereich derzeit nahezu ausschließlich elektrisch angetriebene, nach dem Kompressionsprinzip arbeitende Wärmepumpen eingesetzt. Bei größeren Einheiten (>100 kW Heizleistung) stehen auch gasmotorisch angetriebene Wärmepumpen zur Verfügung. Mittlerweile sind auch Gaswärmepumpen kleinerer Leistung erhältlich, jedoch kaum im Leistungsbereich unterhalb von 20 kW [ASUE 2008]. In diesem Segment dominieren nach wie vor elektrische Wärmepumpen.

Als Wärmequellen dienen vor allem das Grundwasser (selten Oberflächenwasser), die Umgebungsluft oder das Erdreich. Im Jahr 2008 wurden 48 % aller neu installierten Wärmepumpen mit horizontalen Flachkollektoren oder vertikalen Erdsonden zur Nutzung der Wärme des Erdreichs ausgestattet (Sole/Wasser-Wärmepumpe), 44,9 % bezogen die Wärme aus der Umgebungsluft. Lediglich 7,1 % nutzten das Grundwasser als Wärmequelle [BWP 2009].

Die Wärme der genutzten Energiequelle (Erdwärme) wird zunächst an einen Kälte Träger, der in den eingesetzten Kollektoren/Sonden zirkuliert, abgegeben (Prinzip einer Zweikreisanlage, s. auch Kapitel 3.3.2). Vor wenigen Jahren sind jedoch auch Anlagen mit Direktverdampfung in die Diskussion gekommen, bei denen das Kältemittel selbst durch die meterlangen Kollektoren, z. B. kunststoffbeschichtete Kupferrohre oder Kunststoffrohre, zirkuliert. Diese benötigen bei gleicher Leistung etwa doppelt so viel Kältemittel wie Zweikreisanlagen, sind aber energetisch effizienter [Klima:aktiv 2007]. Dies liegt daran, dass direkt verdampfende Systeme im Gegensatz zu Zweikreisanlagen auf den zusätzlichen Wärmeübergang (Zwischenwärmetauscher) sowie auf die Solepumpe für die Erdkollektoren verzichten können. Bei der Verwendung von natürlichen Kältemitteln, wie z.B. Propan, sind solche Anlagen den Anlagen mit HFKW aus Klimaschutzsicht eindeutig überlegen.

Direktverdampfungssysteme sind trotz dieser Vorteile nicht unumstritten. Neben der größeren Menge an benötigtem Kältemittel in Direktverdampfungssystemen sehen Fachleute teilweise auch das erhöhte Leckagerisiko kritisch [KKW, HEA 2003]. Trotz der theoretisch günstigeren Auslegung gegenüber Zweikreisanlagen haben Vergleichsmessungen eines Prüflabors in Wien gezeigt, dass in der Praxis keine energetischen Unterschiede messbar sind. Zum Teil zeigten die Solesysteme sogar energetische Vorteile [Anhörung 2003].

Als Kältemittel in Wärmepumpen war lange das Gemisch R 502 Standard. Es wurde wegen des darin enthaltenen FCKW zunächst durch den HFCKW-22 ersetzt [FKW 1998b]. Ab etwa 1997/98 haben Hersteller vermehrt begonnen, HFKW als sogenannte Sicherheitskältemittel einzusetzen [Stiebel Eltron 2003]. Zum Einsatz kommen die HFKW-Gemische (Blends) R 407C, R 410A, R 404A und R 417A sowie der Reinstoff R 134a. Letzterer wird oftmals in Brauchwasserwärmepumpen verwendet.

Die HFKW-Emissionen aus der Anwendung Hauswärmepumpen betrugen im Jahr 2007 etwa 8,5 t bei einem Bestand von ca. 570 t. Damit haben sich die Emissionen gegenüber dem Jahr 2002 mit etwa 2 t (Bestand ca. 90 t HFKW) mehr als vervierfacht [Schwarz 2005; Schwarz 2009a]. Aufgrund des stark zunehmenden Absatzes ist zu befürchten, dass sich dieser Trend in den nächsten Jahren fortsetzt.

Minderungsmöglichkeiten

Noch vor dem Einsatz von HFKW, ab etwa 1992/1993, haben Hersteller den HFCKW-22 meist durch brennbare Kohlenwasserstoffe, wie z. B. Propan (R 290) oder Propen (R 1270), ersetzt [Stiebel Eltron 2003; Laue 1999]. Sicherheitsaspekte beim Einsatz brennbarer Kältemittel waren beherrschbar [Bock 2003; Stiebel Eltron 2003; Hautech 2002].

Die Entwicklung von mit Kohlenwasserstoffen arbeitenden Wärmepumpen wurde durch die Einführung der HFKW jedoch kaum weiter vorangetrieben. Eine technische/energetische Optimierung erfolgte nicht [Stiebel Eltron 2003; HEA 2003].

Die Gründe für den Abbruch der Entwicklungsarbeit mit Kohlenwasserstoffen sind vielfältig. Als ein Problem geben Hersteller immer wieder die gültigen Normen und das Fehlen rechtsverbindlicher Vorschriften zum Einsatz von brennbaren Kältemitteln an [Bock 2003; Stiebel Eltron 2003; ASERCOM 2003; Carrier 2003]. Für den Bereich einschlägige Normen, z. B. DIN EN 378 [DIN 2008], lassen den Einsatz von brennbaren Kältemitteln in Mengen größer 1 kg unter der Erdgleiche nicht zu.

Heizungswärmepumpen enthalten jedoch - außer bei sehr kleinen Heizleistungen - üblicherweise mehr als 1 kg Kältemittel und eine Aufstellung dieser Geräte über Erdgleiche ist nicht üblich. Vielmehr werden Heizungswärmepumpen im Allgemeinen im Keller untergebracht.

Der Einsatz größerer Mengen brennbaren Kältemittels in Wärmepumpen ist bei Einhalten bestimmter Sicherheitsmaßnahmen (mechanisch belüftete Gehäuse) laut DIN EN 378 möglich. Auch andere Normen, wie die DIN 7003 (Entwurf) [DIN 1995b], lassen den Einsatz größerer Mengen bei Installation bestimmter Sicherheitsvorkehrungen zu. Europäische Normen werden aber aus Gründen der Produkthaftung vorrangig beachtet. Zukünftige europäische Normen könnten jedoch auch den Einsatz größerer Mengen zulassen.

Anders gestaltet sich die Situation bei der Brauchwasserwärmepumpe. Hier sind Füllmengen von weniger als 150 g Stand der Technik und entsprechende Geräte auf dem Markt [Stiebel Eltron, 2009]. Bei dieser kleinen Füllmenge ist der Einsatz von brennbaren Kältemitteln wie Propan unproblematisch (z. B. nach IEC 60335, Teil 40) [Stiebel Eltron 2003; IEC 2003].

Neben der Normensituation wird von Wärmepumpen-Herstellern auch die mangelnde Bereitschaft von Komponenten-Herstellern, z. B. Herstellern vollhermetischer Verdichter in den USA und Frankreich, zur Freigabe für den Einsatz von brennbaren Kältemitteln als Ursache genannt [Bock 2003; Stiebel Eltron 2003; Laue 1999]. So wurde die Freigabe von Komponenten für den Einsatz von Kohlenwasserstoffen durch die Zulieferindustrie etwa im Jahr 1998 abrupt gestoppt. Begründet wird dies mit dem hohen Produkthaftungsrisiko im Schadensfall [Anhörung 2003].

Im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Energie haben Wolfer u. a. [Wolfer u. a. 1999] eine Studie erarbeitet, die sich in Bezug auf den Einsatz von Ammoniak und Kohlenwasserstoffen als Kältemittel mit dem Risiko, der Produkthaftungspflicht und dem Strafrecht auseinandersetzt. Für das untersuchte Szenario „Wärmepumpe in einem Einfamilienhaus“ kommen die Autoren zu dem Ergebnis, dass *„die Risiken des Einsatzes von Ammoniak oder Propan für den Besitzer der Wärmepumpe akzeptabel und geringer als bei einer konventionellen Gasheizung sind“*.

Bezüglich der Frage der haftplicht- und strafrechtlichen Verantwortung des Herstellers oder des Monteurs kommen die Autoren zu dem Ergebnis, dass *„die Verwendung von Ammoniak oder Kohlenwasserstoffen nicht als fehlerhaft bezeichnet werden kann, da es gute ökologische Gründe gibt, sie anstelle ozonschädigender oder klimawirksamer Substanzen zu verwenden. Der Stand der Technik muss jedoch erreicht werden.“* In der Studie wird aufgezeigt, welche Maßnahmen zu treffen sind, um im Ereignisfall nicht haftbar gemacht zu werden.

Die Studie - hierauf weisen die Autoren ausdrücklich hin - basiert auf der Schweizerischen Gesetzgebung. Nach Auffassung der Autoren sollten die Schlussfolgerungen jedoch auch auf andere europäische Rechtssysteme übertragbar sein.

Kruse und Heidelck [Kruse, Heidelck 2002] weisen darauf hin, dass *„ein durch brennbare Kältemittel verursachter Unfall zwar generell niemals gänzlich ausgeschlossen werden kann, das Sicherheitsrisiko bei sachgerechter Installation und Betriebsweise jedoch gegen null geht.“*

Trotz der genannten Schwierigkeiten sind heute weiterhin Wärmepumpen (Heizungs- und Warmwasserwärmepumpen) mit Kohlenwasserstoffen als Kältemittel bis zu einer Leistung von etwa 20 kW auf dem Markt [Buderus 2009]. Anlagenausführungen mit zwei Verdichtern erreichen sogar Leistungen von über 25 kW [Dimplex 2009]. Dem Problem der Brennbarkeit von z.B. Propan begegnet man dadurch, dass die Wärmepumpe inklusive Verdampfer im Freien aufgestellt wird (Luft/Wasser-Wärmepumpe) und somit bei Leckagen oder gar einer Havarie die Gefahr, welche vom Kältemittel ausgeht, zumindest deutlich herabgesetzt ist [Acalor 2009; Dimplex 2009, Klima:aktiv 2007]. Bei Aufstellung unter der Erdgleiche ist die Anlage mit einem Gaswarngerät ausgestattet. Dieses startet bei austretendem Kältemittel einen Lüfter, welcher das Gas ins Freie befördert und so die Entstehung eines explosionsfähigen Luft/Propan Gemisches verhindert [Acalor 2009a]. Einige Anlagen sind als Direktverdampfungssysteme ausgelegt und erreichen dadurch eine hohe Energieeffizienz und entsprechend hohe Leistungszahlen [Klima:aktiv 2007].

Neben dem Einsatz von Kohlenwasserstoffen als Kältemittel ist auch der Einsatz von CO₂ als Kältemittel in der Anwendung Haushaltswärmepumpe, vor allem in der Brauchwasserwärmepumpe, möglich und bereits etabliert. Nachdem Brauchwasserwärmepumpen mit CO₂ bereits seit einigen Jahren auf dem japanischen Markt angeboten werden [Kruse, Heidelck 2002], stehen mittlerweile auch in Deutschland CO₂-Wärmepumpen für Heizung und Brauchwasseraufbereitung zur Verfügung [KK 2008a]. Für die Heizung und Brauchwassererwärmung in Neu- und Altbauten geeignet ist eine ab 2008 auf dem deutschen Markt erhältliche CO₂-Luft-/Wasser-Wärmepumpe mit einer Heizleistung bis zu 9 kW [Kaut,Sanyo 2008]. Für den Niedrigstenergie- und Passivhaussektor steht eine 2 kW-Wärmepumpe mit dem Kältemittel CO₂ vor der Markteinführung. Diese deckt den gesamten Wärmebedarf eines Einfamilienhauses mit durchschnittlich 145 m² (Warmwasser und Heizung) bei deutlich günstigerer Jahresarbeitszahl im Vergleich zu einer Anlage mit R 134a [Kosowski u.a. 2008]. Eine Wärmepumpenpilotanlage mit CO₂-Erdwärmerohr und CO₂ als Kältemittel nahm im Frühjahr 2009 seinen Betrieb am Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH auf [FKW 2009].

Obwohl Ammoniak bisher in nach dem Kompressionsprinzip arbeitenden Hauswärmepumpen nicht verwendet und als nicht praxisrelevant eingestuft wurde [Stiebel Eltron 2003; Laue 1999], konnte eine Studie innerhalb des EU-SHERPHA-Projektes demonstrieren, dass eine Wärmepumpe mit Ammoniak nicht nur grundsätzlich möglich, sondern hinsichtlich der Effizienz in der Lage ist, konventionelle Anlagen mit HFKW zu übertreffen [Palm 2008]. Die Studie verdeutlicht, dass der limitierende Faktor hierbei weniger thermodynamischer oder technischer Natur ist, sondern der Umstand, dass kaum

Komponenten auf dem Markt zur Verfügung stehen, die in diesem Leistungsbereich (etwa 10 kW) für Ammoniak ausgelegt sind. So bietet lediglich ein Hersteller einen für dieses Kältemittel geeigneten halbhermetischen Kompressor an. Dieser sogenannte Trennhaubenkompressor, dessen Motorwicklung nicht in Kontakt mit dem Kältemittel steht, wird in Industrieprozessen eingesetzt, in denen aggressive Gase verdichtet werden. In der Kältetechnik findet diese Bauart bisher jedoch kaum Anwendung. Die vorhandenen offenen Verdichter sind für Hauswärmepumpen aufgrund der Leckagegefahr und der Giftigkeit von Ammoniak kaum geeignet. Auch weitere Komponenten wie Wärmetauscher und Drosselventile sind entweder gar nicht oder nur sehr eingeschränkt verfügbar. Trotzdem ist es gelungen, den Prototyp einer Wärmepumpe mit Ammoniak zu konstruieren, welche eine Kältemittelfüllmenge von nur 100 g aufweist und Leistungszahlen von >4 erreicht [Palm 2008].

Anders ist dies in Absorptionswärmepumpen, die mit Ammoniak (dem Stoffpaar Ammoniak/Wasser) vermarktet werden. Die Grundlagen des Absorptionsprinzips sind in Kapitel 3.1.2 dargestellt. Heute werden Absorptionswärmepumpen nur mit Wärmeleistungen zwischen 16 und 40 kW angeboten und kommen daher erst für Mehrfamilienhäuser oder gewerbliche Einrichtungen in Betracht. Für Ende 2011 ist allerdings der Serienstart für eine Absorptionswärmepumpe im Leistungsbereich zwischen 4 und 10 kW geplant, die für Einfamilienhäuser geeignet sein wird [FAZ 2010]. Absorptionswärmepumpen haben wenig bewegliche Teile und sind damit sehr leise [ASUE 2002].

Eine weitere Alternative zu nach dem Kompressionsprinzip arbeitenden Wärmepumpen stellen Adsorptionswärmepumpen dar. Kapitel 3.1.2 stellt die Grundlagen des Adsorptionsprinzips mit festen Sorptionsmaterialien vor. Ein Hersteller bietet seit 2010 eine gasbetriebene Adsorptionswärmepumpe mit dem Stoffsystem Wasser (Kältemittel) und Zeolith (Sorptionsmittel) und einer Heizleistung von bis zu 10 kW an [Vaillant 2010]. Ein anderer Hersteller hat Zeolithwärmepumpen bereits erfolgreich im Feldtest geprüft und plant die Markteinführung für Ende 2012 [FAZ 2010]. Auch Geräte mit größerer Heizleistung sollen entwickelt werden.

Die unterschiedliche energetische Effizienz von Wärmepumpen in Abhängigkeit von der genutzten Antriebsenergie und Wärmequelle sowie die Auswirkung auf die Einsparung an CO₂-Emissionen kann, da hier vielfältige Faktoren zu beachten sind, in diesem Bericht zu fluorierten Treibhausgasen nicht behandelt werden. Einen Überblick hierzu geben z. B. Laue [Laue 2000], Leven u. a. [Leven u.a. 2001] und die ASUE [ASUE 2002]. In einer vergleichenden Studie von elektrischen Wärmepumpen und konventionellen sowie erneuerbaren Heiztechniken hat das Umweltbundesamt bereits die Umweltbilanz dieses Anlagentyps ermittelt und bewertet [UBA 2008]. Obwohl Wärmepumpen heutzutage als ausgereifte Technik gelten, ist aufgrund kontinuierlicher Verbesserungen zukünftig mit einer weiteren Effizienzsteigerung bei dieser Anwendung zu rechnen [Löffler 2008].

Es ist klar hervorzuheben, dass neben der Kältemittelfrage die Frage der energetischen Effizienz erheblich an Bedeutung gewonnen hat. Seit dem erfolgreichen Einzug der Wärmepumpe in den Markt haben Hersteller von Wärmepumpen und Komponenten hier Verbesserungen erreichen können. Heutige, mit HFKW-befüllte Wärmepumpengeräte erreichen laut Herstellerangaben wegen der geleisteten Entwicklungsarbeit bessere Leistungszahlen im Vergleich zu Geräten, die Mitte der neunziger Jahre hergestellt und mit Kohlenwasserstoffen (meist Propan) betrieben wurden. Dies ist jedoch zum einen nicht überraschend, da jede Weiterentwicklung u. a. auch zu einer verbesserten Energieeffizienz führt. Zum anderen decken sich die Herstellerangaben oft nicht mit den tatsächlichen Werten, die bei bereits installierten Anlagen gemessen werden. Die Neuanschaffung einer Wärmepumpe wird, wie auch bei Solarkollektor- und Biomasseanlagen, durch die Richtlinie zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt vom Bundesministerium für Umwelt (BMU) in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) im Rahmen des Marktanreizprogramms der Bundesregierung gefördert [BAFA 2009]. Gleiches gilt auch für gasmotorisch angetriebene Wärmepumpen. Zur Förderfähigkeit einer Anlage wird im Wesentlichen die Jahresarbeitszahl herangezogen, die nach der VDI-Richtlinie 4650 zu ermitteln ist. Nach neuesten Erkenntnissen durch eine vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme durchgeführte Feldstudie werden die vor der Installation errechneten Jahresarbeitszahlen jedoch selten erreicht [Morhart 2009]. Ob die überarbeitete Fassung der Richtlinie eine Verbesserung der Vorausberechnung der Jahresarbeitszahl bringt, bleibt abzuwarten. Weiterhin nachbesserungswürdig erscheint der Umstand, dass das eingesetzte Kältemittel bei der Feststellung der Förderfähigkeit keine Rolle spielt. Dies wäre jedoch ein entscheidender Punkt, um den natürlichen Kältemitteln (z.B. Propan, CO₂), welche im Vergleich zu HFKW kaum klimarelevant sind, in der Anwendung Wärmepumpe endgültig zum Durchbruch zu verhelfen und klimaschädliche Kältemittel zu ersetzen. Gerade vor dem Hintergrund steigender Verkaufszahlen und damit einhergehender HFKW-Emissionszunahmen erscheint dies dringend geboten.

Schlussfolgerungen

Für Wärmepumpen geringer Leistung (bis 20 kW) und dementsprechend geringer Kältemittel-Füllmenge stehen heute mit Kohlenwasserstoffen (Propan) und CO₂ umweltgerechtere Alternativen zur Verfügung. Somit kann in dieser Anwendung schon heute vollständig auf den Einsatz von HFKW verzichtet werden. Dies gilt insbesondere für Brauchwasserwärmepumpen. Für diesen Bereich werden Geräte zu etwas höheren Kosten (Zusatzkosten für eine Gehäuseentlüftung betragen etwa 1,5 % der Gesamtkosten) angeboten.

Kohlenwasserstoffe werden von vielen Experten als thermodynamisch sehr gute Kältemittel mit akzeptablem Risiko für den Einsatz in Wärmepumpen angesehen.

Trotzdem haben viele Hersteller die technische Weiterentwicklung einschließlich einer energetischen Optimierung dieser Wärmepumpen gestoppt und setzen mittlerweile ausschließlich auf HFKW. Ein möglicher Weg, den Einsatz von Propan für Hersteller attraktiver zu gestalten, wäre eine stärkere Förderung von Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln gegenüber HFKW-Anlagen im Rahmen des Marktanreizprogramms der Bundesregierung.

Ab Leistungsbereichen von etwa 16 bis 40 kW (z. B. für Mehrfamilienhäuser und gewerbliche Zwecke) stehen neben Kompressionswärmepumpen auch Absorptionswärmepumpen zur Verfügung, in denen keine halogenierten Kältemittel eingesetzt werden. Die Entwicklung von Absorptionswärmepumpen für Einfamilienhäuser (Leistungsbereich zwischen 4 und 10 kW) hat bereits begonnen. Der Serienstart ist für 2011 geplant [FAZ 2010].

Absorptionswärmepumpen mit einer Heizleistung von bis zu 10 kW (für Einfamilienhäuser), die mit Wasser als Kältemittel arbeiten, sind bereits heute auf dem deutschen Markt erhältlich. An der Entwicklung von Wärmepumpen mit größerer Heizleistung wird gearbeitet.

3.3.7 Fahrzeugklimatisierung

Mobile Klimaanlage (MAC)⁵ sind Fahrzeugklimaanlagen in Personenkraftwagen (Pkw), Lastkraftwagen (Lkw) oder Nutzfahrzeugen (Nfz), Kraftomnibussen (Reisebusse, Linienbusse), Schienenfahrzeugen, Flugzeugen⁶ und auf Schiffen. Sowohl beim Kältemittelverbrauch als auch bei den Kältemittlemissionen dominieren die Pkw-Anlagen. 89 % der HFKW-Emissionen aus mobilen Klimaanlage stammen aus Pkw-Klimaanlagen [Schwarz 2010].

Alle vor 1991 gebauten Fahrzeuge enthielten den FCKW Dichlormethan (R 12) als Kältemittel [SAE 2001]. Das Verbot von R 12 in mobilen Kälteanlagen < 5 kg erfolgte 1995. Seitdem wird in mobilen Klimaanlage nahezu vollständig das HFKW-Kältemittel Tetrafluorethan (R 134a) eingesetzt. Ausnahme sind umgerüstete R 12-Klimaanlagen, die an Stelle von R 134a zu einem geringen Anteil mit dem Drop-In-Kältemittel R 413A (88 % R 134a, FKW-218 (9 %) und R 600a (Isobutan)) befüllt wurden [Schwarz, Leisewitz 1999].

⁵ MAC - Mobile Airconditioning Systems – engl. Abkürzung für mobile Klimaanlage

⁶ In Flugzeugen erfolgt die Kühlung üblicherweise durch die Umgebungsluft. Fluorierte Kohlenwasserstoffe werden nur zur Klimatisierung von Hubschraubern und Flugzeugen für geringe Flughöhen eingesetzt. Die gesamte Füllmenge in diesen Anlagen in der Europäischen Union beträgt 6,7 t; bei einer angenommenen Emissionsrate von 5 % würden 336 kg/Jahr emittieren [Schwarz 2007].

Klimaanlagen für Straßenfahrzeuge sind in der Regel keine hermetisch geschlossenen Systeme: Ihre Verdichter werden mechanisch über eine Welle vom Fahrzeugmotor angetrieben und sind den Vibrationen des Motors ausgesetzt.⁷ Das Kältemittel strömt durch flexible Leitungen (Schläuche) zu den mit dem Fahrzeugrahmen verbundenen übrigen Bauteilen des Kältekreislaufs. Durch diffusionsdichtere Schläuche und bessere Abdichtungen konnten bei den R134a-Systemen die Verluste aus dem laufenden Betrieb gegenüber FCKW-Systemen um etwa 50 % verringert werden [Schwarz, Leisewitz 1999; Nonnenmann 1995]. Die insgesamt von Fahrzeugklimaanlagen im Betrieb verursachten Treibhausgasemissionen gehen zu zwei Dritteln auf direkte Emissionen des Kältemittels (R 134a) und zu einem Drittel auf indirekte Emissionen aus dem mit der Klimaanlage verbundenen Kraftstoffverbrauch zurück [COM 2003].

Auf den japanischen und nordamerikanischen Märkten gehören Klimaanlagen schon seit langem zur Standardausrüstung der Fahrzeuge [Holdack-Janssen 1996]⁸. In den vergangenen Jahren hat der Ausrüstungsgrad der Neufahrzeuge mit Klimaanlagen (MAC-Quote) auch in Deutschland und Europa stark zugenommen. Im Jahr 2008 waren beispielsweise in Deutschland bereits 96 % aller neu zugelassenen Pkw mit einer Klimaanlage ausgerüstet, 98 % bei deutschen Marken und 92 % bei importierten Pkw (s. Tab. 3.2) [Schwarz 2010].

3.3.7.1 Pkw-Klimaanlagen

Gesetzliche Regelungen

Am 4. Juli 2006 trat die EU-Richtlinie 2006/40/EG über Emissionen aus Klimaanlagen in Kraftfahrzeugen (sog. MAC⁹-Richtlinie) in Kraft. Die Richtlinie gilt für kleinere Kraftfahrzeuge zur Personenbeförderung mit mindestens vier Rädern und höchstens 8 Sitzplätzen plus Fahrersitz (Fahrzeugklasse M1) sowie für Kraftfahrzeuge, die für die Güterbeförderung ausgelegt und gebaut wurden, mit mindestens vier Rädern und einer zulässigen Gesamtmasse bis zu 3,5 Tonnen, wobei das Fahrzeuggewicht höchstens 1,305 Tonnen beträgt (Fahrzeugklasse N1, Gruppe 1)¹⁰. Zur Klasse M1 zählen vor allem die

⁷ Einzelne Hybridfahrzeugtypen haben elektrisch angetriebene Verdichter, die nicht über eine Welle vom Fahrzeugmotor angetrieben werden.

⁸ 1994 waren in Japan bereits 98 % aller Pkw klimatisiert, in den USA betrug die Ausrüstungsrate über 90 %. Im Vergleich dazu waren in Europa im selben Jahr erst 20 % der Fahrzeuge klimatisiert.

⁹ MAC- Mobile Air Conditioning – Fahrzeugklimaanlage.

¹⁰ Richtlinie 2007/46/EG der Europäischen Parlamentes und des Rates vom 5. September 2007 zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge, im Jahr 2008 durch die Verordnung (EG) Nr. 1060/2008 der Kommission geändert. Begrenzung des

Pkw und Kleinbusse, aber auch Sonderfahrzeuge wie Wohnmobile, Kranken- und Leichenwagen sowie beschussgeschützte oder rollstuhlgerechte Fahrzeuge. Zur Klasse N1, Gruppe 1, gehören kleinere Nutzfahrzeuge wie Kleintransporter, aber auch Sonderfahrzeuge wie Wohnanhänger.

Beginnend ab 1. Januar 2011 verbietet die EU-Richtlinie 2006/40/EG Klimaanlage in Kraftfahrzeugen der Klassen M1 und N1, Gruppe 1, die als Kältemittel fluorierte Treibhausgase mit einem Treibhauspotential (GWP) über 150 enthalten. Die Ausstiegsfristen sind gestaffelt. Ab 1. Januar 2011 erteilen die Mitgliedsstaaten keine EG-Typengenehmigung und keine einzelstaatliche Betriebserlaubnis für neue Fahrzeugtypen mit solchen Klimaanlage. Auch ein nachträglicher Einbau ist verboten. Ab 1. Januar 2017 dürfen auch neu gebaute Fahrzeuge, deren Typengenehmigungen vor dem 1. Januar 2011 erfolgte, mit Klimaanlage, die Kältemittel mit GWP größer 150 enthalten, nicht mehr verkauft und zugelassen werden. Ebenfalls ist der nachträgliche Einbau solcher Klimaanlage in jegliche Fahrzeuge verboten.

Außerdem enthält die Verordnung Vorschriften zur Dichtheitsprüfung. Klimasystemen mit einem Verdampfer dürfen höchstens 40g/Jahr, Systeme mit zwei Verdampfern höchstens 60g/Jahr fluorierte Treibhausgase mit einem GWP über 150 freisetzen. Die Dichtheitsprüfung gilt für neue Pkw-Typen seit 21. Juni 2008, ab 21. Juni 2009 für alle neuen Pkw mit R 134a Anlagen¹¹.

Kältemittelmengen und Emissionen

Im Jahr 1995 war nur ein Viertel aller Neuwagen klimatisiert. Heute ist fast jeder neue Pkw in Deutschland mit einer Klimaanlage ausgerüstet. Im Jahr 2008 waren in Deutschland 96 % der neuen Pkw mit Klimaanlage ausgerüstet, und bereits drei Viertel (73%) aller in Deutschland zugelassenen Pkw klimatisiert [Schwarz 2004; Schwarz 2010].

Noch bis zum Jahr 2017 dürfen Klimaanlage von neuen Pkw mit dem HFKW-134a (R 134a) befüllt werden. Trotz der geringeren durchschnittlichen Füllmenge unter 0,7 kg Kältemittel pro Klimaanlage stieg der jährliche Neueinsatz von R 134a zur Erstbefüllung von Pkw-Klimaanlagen für den deutschen Markt durch die hohe Zahl der neuen Klimaanlage an. Im Jahr 1995 wurden 1.400 t, im Jahr 2008 bereits 3.800 t R 134a eingefüllt (s. Tab. 3.1). Die Gesamtfüllmenge des Kältemittels R 134a in Pkw-Klimaanlagen

Fahrzeuggewichtes (Gruppe 1) bei der Klasse N1 ergibt sich aus der aktuellen Fassung der Richtlinie 70/220/EWG.

¹¹ Die Dichtheitsanforderungen sind von der KOM durch ein harmonisiertes Verfahren zur Messung von Leckagen bei Typenzulassungen in der EG- VO 706/2007 vom 21. Juni 2007 in Artikel 7 i. V. m. Anhang II ergänzt worden.

steigt ebenfalls noch weiter an. Im Jahr 2008 befanden sich in Deutschland etwa 23.645 t R 134a in Pkw-Klimaanlagen, dies entspricht einer Menge von etwa 31 Mio. t CO₂-Äquivalenten [Schwarz 2010].

Die jährlichen Kältemittlemissionen stiegen von 1995 bis 2008 von 133 t/a auf 2.700 t/a. Diese Mengen entsprechen einem stetig erhöhten Beitrag zum Treibhauseffekt von 0,17 Mio. t auf 3,5 Mio. t CO₂-Äquivalenten in 2008 (s. Tab. 3.1). Schon heute sind über ein Drittel aller HFKW-Emissionen auf Pkw-Klimaanlagen zurückzuführen [Schwarz 2010]. Falls weiterhin R 134a eingesetzt wird, wäre im Jahr 2020 mit jährlichen Emissionen in Höhe von 3.500 t dieses Kältemittels zu rechnen [Schwarz 2003a].

Kältemittlemissionen entstehen bei der Befüllung, infolge allmählicher Diffusion durch die Dichtungen der Klimaanlage, beim Service (Öffnen und Evakuieren des Kreislaufs), irregulär bei Zerstörung der Anlage durch Unfälle, Steinschlag etc. und bei der Entsorgung der Klimaanlage [Schwarz 2001; Schwarz 2005]. Die Emissionen bei der Befüllung werden mit 2 % angegeben. Im Durchschnitt entweichen im Betrieb etwa 10 % des Kältemittels pro Jahr in die Atmosphäre (7 % für regulären Kältemittelverlust und 3 % für irreguläre Verluste), die Serviceemissionen pro Wartung werden von einigen Gramm bis zu 10 % geschätzt. Die Entsorgungsverluste werden mit 30 % angenommen [Schwarz 2005]. Ab dem Jahr 2002 wurden Pkw mit R 134a-befüllten Klimaanlage entsorgt; ab 2005 wurden die ersten Pkw-Jahrgänge verschrottet, die R 134a als Erstbefüllung enthielten [Schwarz 2010].

Heute wird ein großer Teil der abgemeldeten Pkw vor der Verschrottung außer Landes gebracht (z. B. Export ins östliche Ausland und nach Afrika) [Buchert, Hagelüken 2003]. Nur wenige dieser Fahrzeuge gelangen in Länder, in denen eine geregelte Entsorgung des Kältemittels gewährleistet ist. Über den Verbleib der Fahrzeuge und damit über Emissionen, Wartung und Entsorgung der Kältemittel gibt es keine gesicherten Erkenntnisse. Es ist daher wahrscheinlich, dass ein großer Teil des in den Klimaanlage dieser Fahrzeuge enthaltenen Kältemittels (R 134a) letztlich emittiert.

Tabelle 3.2: Pkw-Klimaanlagen in Deutschland – HFKW-134a Füllmengen und Emissionen von 1995-2008 [BReg 2004; Schwarz 2004; Schwarz 2003a; Schwarz 2010; Schwarz 2010a]

	1995	1998	2000	2002	2004	2006	2008
eingefüllte Menge R 134a (Neufahrzeugherstellung inkl. Exportfahrzeuge) (t)	1.446	3.345	3.486	3.473	3.623	3.779	3.806
R 134a-Füllmenge in Pkw in Deutschland (t)	1.680	6.523	10.782	14783	18.537	21.846	23.645
Emissionen von R 134a aus Klimaanlagen (t)	133	561	984	1.401	1.817	2.292	2.696
Emissionen von R 134a aus Klimaanlagen (Mio. t CO ₂ -Äquivalente)	0,17	0,73	1,3	1,8	2,4	3,0	3,5
Ausrüstungsrate neuer Pkw mit Klimaanlagen ¹²	25 %	62 %	80 %	87 %	93 %	96 %	96 %

Kältemittelkreislauf eines Pkw

Die Klimaanlage entzieht dem Innenraum des Pkw Wärme und gibt diese nach außen ab. Der Kältemittelkreislauf einer R 134a-Pkw-Klimaanlage setzt sich zusammen aus den Komponenten: Verdichter (bzw. Kompressor), Verflüssiger (bzw. Kondensator), Trockner/Sammler, Expansionsventil, Verdampfer, Schlauch- und Rohrleitungen sowie Regelungs- und Steuerungseinrichtungen. Alle Komponenten sind zu einem geschlossenen Kreislauf verbunden (s. Abb. 3.7). Die Klimaanlage arbeitet nach dem Prinzip der Kompressionskälteanlage (s. Kap. 3.1.1). Sobald die Klimaanlage bei laufendem Fahrzeugmotor eingeschaltet wird, saugt der Verdichter kaltes gasförmiges Kältemittel aus dem Verdampfer ab, verdichtet es, wobei es sich erhitzt, und drückt es in den Verflüssiger (Hochdruckteil). Durch die vorbeiströmende Außenluft (Fahrtwind oder Zusatzgebläse) wird das verdichtete heiße Gas abgekühlt. Sobald der vom Druck abhängige Taupunkt erreicht ist, kondensiert das Kältemittel. Es wird anschließend im Flüssigkeitsbehälter gesammelt und im Trockner von eventuell vorhandener Feuchtigkeit und von Verunreinigungen befreit. Das unter hohem Druck stehende, flüssige Kältemittel strömt durch das Expansionsventil und wird in den Verdampfer (Niederdruckteil) eingespritzt. Dort entspannt es sich und verdampft. Die notwendige Verdampfungswärme wird der an den Verdampferlamellen vorbeiströmenden Luft entzogen, die den Innenraum des Pkw kühlt.

¹² Anteil klimatisierter Fahrzeuge an allen inländischen Neuzulassungen eines Jahrgangs.

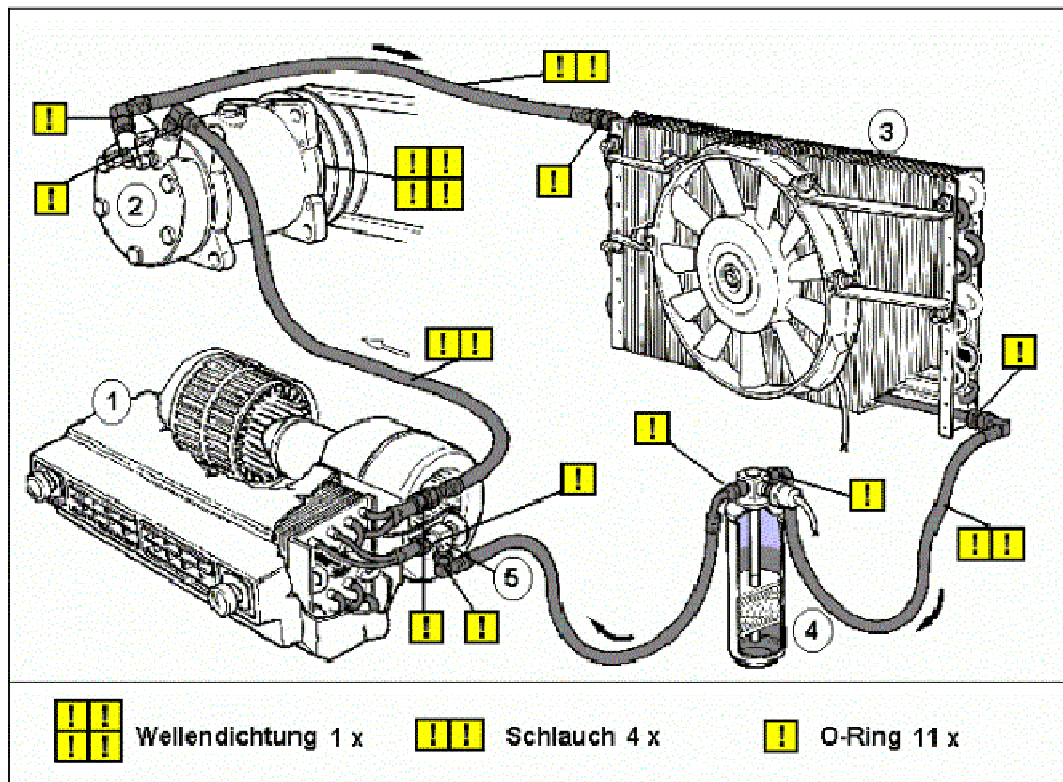


Abbildung 3.7: Der R 134a-Kältemittelkreislauf eines Pkw.
Die Zahl der Ausrufezeichen (!) entspricht der Bedeutung einzelner Verlustquellen. Kältekreislauf: 1: Verdampfer, 2: Kompressor, 3: Kondensator, 4: Sammler/Trockner, 5: Expansionsventil. Aus: [WAECO 2000, modifiziert nach Schwarz 2001].

Die durchschnittliche Kältemittel-Füllmenge für in Deutschland neuzugelassene, werkseitig klimatisierte Fahrzeuge reduzierte sich von 1995 bis 2008 von 900 g auf 625 g [Schwarz 2004; Schwarz 2010a]. Die wichtigsten Austrittsstellen für Kältemittel im Rahmen des normalen Schwundes (ca. 50 g pro Jahr) sind die Wellendichtung des Kompressors, das Schläuchsystem und die Dichtungsringe (O-Ringe) (s. Abb. 3.7) [Schwarz 2001].

Minderungsmöglichkeiten

Ab 1. Januar 2011 müssen Klimaanlage in neuen Typen von Pkw- und kleineren Nutzfahrzeugen ein Kältemittel mit einem Treibhauspotential (GWP) kleiner 150 enthalten. Im Folgenden werden mögliche alternative Kältemittel diskutiert.

CO₂ (R 744)

Bereits in den 90er Jahren haben deutsche Automobilhersteller und die Zulieferindustrie CO₂ als am besten geeignetes Kältemittel für Fahrzeugklimaanlagen identifiziert. Entscheidend hierfür waren u. a. seine thermodynamischen Eigenschaften, sein

vernachlässigbarer Beitrag zum anthropogenen Treibhauseffekt ($\text{GWP}_{\text{CO}_2} = 1$) und seine Stoffeigenschaften „nicht brennbar“ und „nicht giftig“. CO_2 fällt als Nebenprodukt in der chemischen Industrie an (s. Kap. 1.4.1). Allerdings erforderte der Einsatz von CO_2 in Pkw-Klimaanlagen die Entwicklung eines völlig neuen Systems mit neuen Komponenten für den Kältemittelkreislauf. Unterschiede zu einer herkömmlichen Klimaanlage für R 134a sind die Auslegung für höhere Drücke von bis zu 135 bar und der zusätzliche innere Wärmetauscher. Dieser Wärmetauscher ist notwendig, weil CO_2 -Klimaanlagen oberhalb von 31 °C mit überkritischer Wärmeabgabe arbeiten [Parsch, Brunsch 2002]. Es muss außerdem Vorsorge getroffen werden, dass sich keine gefährlichen CO_2 -Konzentrationen im Innenraum des Fahrzeuges bilden (s. Kap. 1.4.1).

Vorteilhaft beim Einsatz des Kältemittels CO_2 im Pkw ist, dass kein zweiter Kreislauf notwendig ist wie bei brennbaren Kältemitteln und keine Vorkehrungen gegen Entzündung getroffen werden müssen, da CO_2 selbst ein Feuerlöschmittel ist. Außerdem ist keine Umkonstruktion des gesamten Pkw nötig, da der Bauraum für die bisherige R 134a Anlage genutzt werden kann. Es ergibt sich für die CO_2 -Klimaanlage sogar ein geringerer Platzbedarf gegenüber R 134a [Parsch 2002].

Im Vergleich mit R 134a und R 152a ist mit CO_2 eine schnellere Abkühlung sowie ein schnelleres Aufwärmen des Fahrgastraums möglich. So führt die bessere Kälteleistung und dadurch bessere Abkühltechnik zu einem Komfortgewinn für den Endkunden und steigert die Sicherheit, da beschlagene Scheiben schneller von Feuchtigkeit befreit werden können. Die Tests an Klimaanlagen und im Pkw zeigen die hohe Effizienz von CO_2 als Kältemittel in Pkw-Klimaanlagen [Wieschollek, Heckt 2007; Wolf 2007; Nekså u. a. 2007; Graz 2009].

Auch Berechnungen von Lebenszyklusanalysen (LCCP) von Pkw- Klimaanlagenkreisläufen mit unterschiedlichen Komponenten zeigen, dass CO_2 ein vorteilhaftes Kältemittel ist [Hafner u. a. 2004; Wolf 2007].

Bereits im Jahr 2002 hatte Toyota mit Unterstützung von Denso in Japan und Kalifornien die erste mit Kohlendioxid betriebene mobile Pkw-Klimaanlage kommerziell angeboten [COM 2003]. Heute sind alle Komponenten verfügbar, so dass die CO_2 -Klimaanlage (Pkw) serienreif ist [Riegel 2007; Parsch 2007; Nekså 2007]. Mehrere große Automobilfirmen und Zulieferer in Europa, USA und Japan rüsteten, oft in gemeinsamen Programmen, Versuchsfahrzeuge mit CO_2 Klimaanlagen aus [Mager 2003; Wertenbach 2005; Riegel 2007; Morgenstern 2008; SAE 2009].

Neben der Kühlfunktion im Sommer können CO_2 -Klimaanlagen im Winter als Wärmepumpen zum schnellen Aufheizen des Fahrgastraums genutzt werden, wodurch andere übliche, weniger effiziente Zuheizsysteme verzichtbar werden. An Stelle der technischen Realisierung der Wärmepumpenfunktion von CO_2 -Klimaanlagen wurde noch ein weiteres System, der sogenannte *hot gas cycle*, erprobt. Auch diese, in der Investition etwas kostengünstigere Technologie kann eine herkömmliche Zuheizung ersetzen. Eine

Zuheizung ist zukünftig bei vielen Fahrzeugen, insbesondere bei hybrid- oder nur elektrisch angetriebenen Fahrzeugen erforderlich, da die Abwärme eines sehr effizienten Motors oder Elektromotors zu gering ist, um ausreichend Wärme bereitzustellen [VDA 2004; Heinle u. a. 2003; Heckt 2004]. Auf der IAA 2010 wurde ein neu entwickeltes innovatives Heiz-/Kühl-Modul mit CO₂ als Kältemittel vorgestellt, das auch für Elektrofahrzeuge einsetzbar ist [ixetic 2010].

HFKW-152a (R 152a)

Einige, insbesondere US-amerikanische Hersteller erwägen, statt R 134a das fluoriierte Treibhausgas 1,1-Difluorethan (R 152a) einzusetzen. R 152a weist mit einem GWP₁₀₀ von 140 ein gegenüber dem HFKW-134a (GWP₁₀₀ = 1.300) erheblich geringeres Treibhauspotenzial auf. Da die beiden Stoffe thermodynamisch sehr ähnlich sind, könnte weitgehend auf die vorhandene Technik zurückgegriffen werden. R 152a ist jedoch genau wie Kohlenwasserstoffe entflammbar (von 3,9 bis 20,4 Vol-%), die Selbstentzündungstemperatur beträgt 455 °C. Es ist der Kältemittel-Sicherheitsgruppe A2 zugeordnet [DIN 2008]. Im Brandfall setzt R 152a als fluorierter Stoff u. a. giftigen Fluorwasserstoff (HF) frei. Die für das Kältemittel R 152a auf Basis von Toxizitätsdaten ermittelten, in Normen angegebenen weiteren Sicherheitsgrenzwerte „praktischer Grenzwert“¹³ und ATEL/ODL¹⁴ sind niedriger als für R 134a und CO₂ [DIN 2008].

Im Jahr 2008 hat die amerikanische Umweltbehörde EPA das Kältemittel R 152a als alternativen Ersatz für R 12 zugelassen und eine Anwendungsvorschrift für mobile Klimaanlage herausgegeben. Die Klimasysteme müssen so beschaffen sein, dass der Fahrgast im Fahrzeuginnenraum auch im Fall von Leckagen von R 152a Konzentrationen über 3,7 Vol-% nicht mehr als 15 Sekunden lang ausgesetzt ist [EPA 2008].

Sicherheitsbedenken hatten bereits im Jahr 1990 dazu geführt, dass R 152a von den deutschen Automobilherstellern als Ersatzstoff für den FCKW-12 ausgeschlossen wurde. Um die sicherheitstechnischen Probleme zu lösen, ist der Einbau von Magnetventilen vor und nach dem Verdampfer oder die Installation eines zweiten Wärmetauschers in Verbindung mit einem zweiten Kreislauf notwendig. Einige Experten bezweifeln grundsätzlich, dass alle Sicherheitsprobleme mit verhältnismäßigem Aufwand gelöst werden können [Mager 2005]. Bereits die genannten Maßnahmen zur Lösung der sicherheitstechnischen Probleme würden die Energieeffizienz senken sowie die Kosten, die Größe und das Gewicht der Anlage erhöhen. Weitere Kosten entstehen, weil das Personal in

¹³ Höchste Konzentration in einem Personen-Aufenthaltsbereich, die noch keine akuten Maßnahmen für eine Flucht erfordert.

¹⁴ ATEL: Grenzwert für die Zeit, die Personen akuter Toxizität ausgesetzt sein dürfen [kg/m³] / ODL: Grenzwert für Sauerstoffmangel [kg/m³].

der Produktion und im Service im Umgang mit einem entflammaren Kältemittel geschult werden muss.

Kohlenwasserstoffe

Kohlenwasserstoffe, wie z. B. Propan oder Butan, haben sich als Kältemittel in zahlreichen Anwendungen bewährt. Da sie kein Ozonzerstörungspotenzial besitzen und ihr Treibhauspotenzial sehr gering ist, wird ihr Einsatz z. B. von Nichtregierungsorganisationen auch in mobilen Klimaanlage befürwortet. In Australien und den USA sind Retrofit-Demonstrationsprojekte durchgeführt worden, z.B. mit Mischungen von 60 % Propan und 40 % Isobutan [COM 2003; Maclaine-cross 2004]. In den Philippinen ist die Nachfüllung von R 12-Pkw-Klimaanlagen mit Kohlenwasserstoffen zulässig [Hydrocarbons21 2010].

Die leichte Entzündlichkeit von Kohlenwasserstoffen stellt jedoch ein Risiko für die Fahrzeuginsassen dar. Ihr Einsatz in Autoklimaanlagen ist deshalb z. B. in den Vereinigten Staaten untersagt [EPA 2003]. Für Automobilhersteller in aller Welt kommt der Einsatz von Kohlenwasserstoffen in Fahrzeugklimaanlagen in der Regel nur in Betracht, wenn das Kältemittel durch die Verwendung eines zweiten Kreislaufes hermetisch abgeschlossen im Motorraum untergebracht werden kann.

Neue fluorierte Ersatzkältemittel

Die chemische Industrie hat seit 2006 in rascher Folge verschiedenste Ersatzkältemittel mit einem Treibhauspotential unter 150 für Pkw-Klimaanlagen in die Diskussion gebracht und wieder verworfen. Weiterverfolgt wurde bisher das HFKW-1234yf.

HFKW -1234yf –R 1234yf

Der chemische Name des Stoffes mit der Kurzbezeichnung R 1234yf ist 2,3,3,3-Tetrafluorpropen, die Summenformel ist $\text{CF}_3\text{CF}=\text{CH}_2$. Tetrafluorpropen gehört zur Stoffgruppe der Hydrofluoralkene. Den Großteil der Herstellungspatente für R 1234yf halten Honeywell oder DuPont [Patente 2010]. Honeywell gab im Januar 2010 bekannt, dass die Firma die Anerkennung für ein Europäisches Patent für die Verwendung von R 1234yf in Klimaanlage bekommen habe, an dem auch Dupont teilhaben kann [Chemie.DE 2010, EP 2010]. Weitere Patente zur Herstellung von R 1234yf sind von Honeywell beim Europäischen Patentamt (EP) angemeldet [Wang 2009; Chiu 2010; Nair 2008]. Andere Chemiehersteller meldeten ebenfalls Patente zur Herstellung von R 1234yf oder für Kältemittelmischungen mit R 1234yf an [Elsheikh 2009; Rached 2010], ebenso wie außereuropäische Klimaanlagehersteller [Lim 2009].

R1234yf hat ein Treibhauspotential GWP_{100} von 4, das ODP ist 0. Die atmosphärische Lebensdauer beträgt 11 Tage [Nielsen u. a. 2007; Papadimitrou u. a. 2008]. Die

Zerfallsprodukte entsprechen denen von R 134a [Yau 2008]. Zerfallsprodukte von R 134a sind beispielsweise HC(O)F und $-\text{CF}_3$ - Radikale an der Erdoberfläche und $\text{CF}_3\text{C(O)F}$ in der Tropopause¹⁵ [Tuazon, Atkinson 1993; Hurley UBA. 2008]. Außerdem wird Trifluoressigsäure (CF_3COOH) als Zerfallsprodukt diskutiert [Kajihara 2010; Luecken 2010] (s. a. Kapitel 1.3.1).

Der Arbeitsplatzgrenzwert für R 1234yf für 8 Stunden (TWA Wert)¹⁶ wird von Honeywell mit 400 ppm und von DuPont mit 500 ppm angegeben [Honeywell 2008; DuPont 2009]. Die AIHA hat einen Wert von 500 ppm festgelegt¹⁷ [AIHA 2010].

R 1234yf ist extrem entflammbar, die untere Explosionsgrenze liegt bei 6,2 Vol.-%, die obere Explosionsgrenze bei 12,3 Vol.-% [Dupont 2009; Honeywell 2008]. Unter Anwendung von in Europa üblichen Messverfahren wurde die obere Explosionsgrenze mit 14,4 Vol.-% R 1234yf in Luft höher bestimmt [BAM 2010]. Nach der GHS-Verordnung [GHS 2008] muss der Stoff R 1234yf mit „H220: Extrem entzündbares Gas“ gekennzeichnet sein. Die Selbstentzündungstemperatur von R 1234yf beträgt 405 °C (Vergleich: Propan 470 °C). R 1234yf hat eine vierfach höhere Dichte als Luft. Es kann sich somit am Boden sammeln und dort explosionsfähige Gemische bilden. Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) belegte in anwendungsnahen Versuchen die Bildung explosibler Gasmischungen sowie die von giftigem Fluorwasserstoff (HF) bei der Verwendung von R 1234yf. Im Brand- oder Explosionsfall wurden Konzentrationen über 90 ppm HF im Fahrgastinnenraum festgestellt. Außerdem bildet sich Fluorwasserstoff bereits ohne Explosion oder Brand an heißen Oberflächen, wie sie im Motorraum üblich sind. Wegen seiner Entflammbarkeit und der Bildung von Fluorwasserstoff müssen von der Automobilindustrie vor der Verwendung und dem Umgang mit R 1234yf systematisch verschiedene Szenarien analysiert sowie eine umfassende Gefahrenanalyse durchgeführt werden. Ausreichende sicherheitstechnische Vorkehrungen beim Einsatz des Kältemittels müssen getroffen werden. [BAM 2010; UBA 2010a]. Hierzu gehören beispielsweise eine konsequente Abschirmung heißer Oberflächen sowie der Einbau eines automatischen Löschsystems im Motorraum, Maßnahmen, die im Gefahrenfall eine Einleitung von Fluorwasserstoff in den Passagierraum verhindern, Maßnahmen zur Vermeidung der Funkenbildung auch im Falle eines Unfalls (u. a. Abschaltung der Stromzufuhr) und die Information und Schulung von Rettungskräften.

¹⁵ Tropopause: Atmosphärenschicht, deren obere Grenzschicht in ca. 10-15 km Höhe liegt, darüber beginnt die wesentlich weniger bewegte Stratosphäre.

¹⁶ TWA (Time Weighted Average) entspricht etwa dem deutschen MAK-Wert (maximale Arbeitsplatzkonzentration) bzw. den Arbeitsplatzgrenzwerten (AGW).

¹⁷ Zum Vergleich: TWA von R 134a beträgt 1.000 ppm [AIHA 2010].

Eine Arbeitsgruppe der SAE (Gesellschaft der Automobilingenieure) hat 2009 eine Sicherheitsstudie für R 1234yf angefertigt [SAE 2009]. Da die Datengrundlagen dieser Studie nicht veröffentlicht sind, sind die Ergebnisse nicht nachvollziehbar.

Laut DuPont und Honeywell ist die Leistung von R 1234yf-betriebenen PKW-Klimaanlagen vergleichbar mit der von R 134a-Anlagen [Yau 2008; Spatz 2009; Sorg 2009]. Allerdings werden hierbei verschieden optimierte Anlagen verglichen. Die thermodynamischen Eigenschaften von R 1234yf sind denen von R 134a zwar ähnlich, aber auf der Grundlage des kältetechnischen Diagramms sind keine Vorteile bezüglich des Energieverbrauches von R 1234yf gegenüber dem bisherigen Kältemittel R 134a abzuleiten. Im Gegenteil, R 1234yf hat eine um 8-10 % [Petitjean 2010] bzw. um 10-15 % [Eusitice 2010] geringere Kälteleistung als R 134a. Untersuchungen des Zulieferers Visteon ergaben eine geringere Leistung von R 1234yf um bis zu 10 % gegenüber R 134a in einer identischen Klimaanlage [Wieschollek 2009]. Um eine gleiche Leistung wie die herkömmliche R 134a-Anlage zu erreichen, muss die R 1234yf-Anlage optimiert werden [Petitjean 2010; Eustice 2010]. Bei Optimierung der Anlagen mit dem Kältemittel R 134a würde jedoch R 134a wieder eine bessere Leistung als R 1234yf zeigen.

Für R 1234yf sind neue Kälteöle und der Zusatz von Additiven zur Stabilisierung der Kältemittel/Öl-Gemische notwendig. R 1234yf ist sehr empfindlich gegenüber Feuchtigkeit und Luft [Seeton 2010; Grimm 2010; Dixon 2010]. Alle Komponenten des Kältekreislaufes müssen auf die Verträglichkeit mit dem noch zu entwickelnden Kältemittel/Öl/Additiv-System getestet werden. Die Mischbarkeit von R 1234yf mit dem Öl bei höheren Temperaturen muss noch verbessert werden. Die Entwicklung von passenden Kälteölen und Additiven für R 1234yf wird im Vergleich zu R 134a von Ölherstellern und Kältetechnikinstituten als wesentlich komplizierter eingeschätzt. Letztendlich wird nur eine suboptimale Lösung bezüglich der erforderlichen material- und kältetechnischen Eigenschaften von R 1234yf möglich sein [Grimm 2010; Dixon 2010].

Verunreinigungen im Kältemittel R 1234yf aus der Herstellung können die Stabilität des Kältemittel/Öl/Additiv-Systems sowie der Kältekreislaufkomponenten und Dichtungen wesentlich verringern [Grimm 2010]. Die Spezifikationen von R 1234yf des jeweiligen Herstellers müssen sehr genau beschrieben und chargenweise nachgewiesen werden. Als einen Bestandteil enthält R 1234yf außerdem den toxischen Stoff 1,2,3,3,3-Pentafluorpropen (1225ye), dessen Gehalt auf maximal 150 ppm begrenzt werden soll. Der Gehalt an anderen verunreinigenden Verbindungen in R 1234yf, die auch die Haltbarkeit des Öls beeinflussen können, darf höchstens 0,5 % betragen. Die Zusammensetzung der Verunreinigungen unterscheidet sich je nach Herstellungsprozess von R 1234yf [Low, Schwennesen 2009; Seeton 2010].

R 1234yf kann nicht einfach in die alte R134a Anlage eingefüllt werden. Es müssen z.B. Kunststoffmaterialien wie Dichtungen und Schläuche ausgetauscht werden. Insofern kann der Stoff nicht als Drop-in Lösung bezeichnet werden.

Die Produktionstechnologie für R 1234yf ist noch nicht im großtechnischen Maßstab in Betrieb. Erste kommerzielle Lieferungen an die Autoindustrie plant DuPont ab dem 4. Quartal 2011. Eine Anlage für den Bedarf im Weltmaßstab soll später folgen [Seeton 2010]. Zu den Kosten des Kältemittels R 1234yf an sich sind bisher ebenso keine konkreten Angaben erhältlich wie zu den Kosten für die entsprechende Anlagentechnik. Genannt werden Kältemittelkosten, die um das 10- bis 20-fache über denen für R 134a liegen [Sorg 2009; Eustice 2010].

Weitere Kältemittel in der Diskussion

Im Jahr 2009 hat ein Chemikalienhersteller wiederum ein neues Kältemittelgemisch aus fluorierten Stoffen vorgestellt, das aber erst frühestens 2014 auf dem Markt verfügbar sein soll [Low 2009; Low, Schwennesen 2009]. Es enthält die HFKW-1243zf, HFKW-32 und HFKW-134a, die genaue Zusammensetzung ist bisher nicht offen gelegt. Der GWP soll nahe 150 sein. Auch dieses Gemisch ist brennbar. Allerdings soll dieses Kältemittel energetisch besser sein als R 134a und R1234yf [Low 2009; Low, Schwennesen 2009; UNEP 2010].

Schlussfolgerungen

Der Trend zur standardmäßigen Ausrüstung von Neufahrzeugen mit Klimaanlage hat in Deutschland wie in anderen Ländern zu einem enormen Anstieg sowohl der direkten - durch das Kältemittel R 134a - als auch der indirekten Treibhausgasemissionen - über den erhöhten Treibstoffbedarf - geführt.

Eine kurzfristige Maßnahme zur Reduktion der Kältemittlemissionen ist die Einführung der R 134a-Technik mit geringeren Leckageraten. Durch den Anstieg der Gesamtzahl an Klimaanlage in allen Bereichen werden die Gesamtemissionen in den nächsten Jahren aber weiter steigen. Auch ist es kaum möglich, die Emissionen über den gesamten Lebensweg der Pkw zu überwachen. Dies gilt insbesondere für die Rückgewinnung des Kältemittels aus Altfahrzeugen, die häufig im Ausland verschrottet werden.

Um den Verpflichtungen aus dem Kyoto-Protokoll nachzukommen, erließ die Europäische Kommission im Jahr 2006 bindende Rechtsvorschriften zur Reduzierung der Emissionen aus Klimaanlage von Pkw und kleineren Nutzfahrzeugen. Ab dem Jahr 2011 beginnt der Ausstieg aus R 134a in Pkw- Klimaanlage und kleineren Nutzfahrzeugen europaweit. Die Kältemittel R 152a und R 1234yf, die bei ähnlichen thermodynamischen Eigenschaften zwar ein wesentlich geringeres Treibhauspotenzial als R 134a aufweisen, sind aus Sicht des Umweltbundesamtes sowohl aus

ökologischen als auch aus technischen Gründen keine geeignete Alternative. Der aus sicherheitstechnischen Gründen vermutlich notwendige zweite Kreislauf oder andere vergleichbare sicherheitstechnische Maßnahmen stellen darüber hinaus deren Wirtschaftlichkeit in Frage.

Deutsche Automobilhersteller haben R 152a und Kohlenwasserstoffe bereits vor Jahren als geeignetes Kältemittel für Pkw-Klimaanlagen ausgeschlossen.

Bis Ende 2008 hatten die deutschen Automobilhersteller ihre Forschungsaktivitäten auf CO₂ konzentriert. Die führenden Fahrzeug- und Komponentenhersteller entwickelten Klimaanlagen für das klimaneutrale Kältemittel CO₂. In Japan und Kalifornien waren 2002 bereits die ersten kommerziellen Produkte auf dem Markt. Die Kosten für die einzelne Klimaanlage sind derzeit noch höher als für die herkömmliche R 134a-Technik. Durch Verbesserungen an einigen Komponenten und durch eine Serienfertigung werden sich die Mehrkosten gegenüber einer R 134a-Anlage jedoch wesentlich verringern. CO₂-Klimaanlagen sind serienreif. Tests mit in Pkw eingebauten CO₂-Klimaanlagen haben deren Effizienz gezeigt.

Die chemische Industrie hat seit 2006 mehrere neue Ersatzkältemittel entwickelt; weiterverfolgt wurde bisher das R 1234yf. Aufgrund seiner Brennbarkeit und seiner chemischen Instabilität ist der Einsatz von R 1234yf mit Risiken und zusätzlichen Umweltbelastungen verbunden. Grundlegende Fragen wie passende Kälteöle und die Langzeitstabilität sind derzeit nicht zufriedenstellend geklärt.

Unter Berücksichtigung aller Aspekte ist CO₂ derzeit eindeutig das beste verfügbare Kältemittel.

3.3.7.2 Weitere mobile Klimaanlagen

Im Jahr 2008 emittierten Lastkraftwagen 151 t, Kraftomnibusse 94 t, Landmaschinen 60 t, Schienenfahrzeuge 14 t und Schiffsklimaanlagen 23 t des Kältemittels HFKW-134a [Schwarz 2010].

Kraftomnibusse (Reisebusse, Linienbusse, Stadtbusse)

Die Ausrüstungsquote neu ausgelieferter Fernreisebusse mit Klimaanlage erreicht heute in Deutschland 100 %. Bei Überlandbussen, die wochentags im Regionalverkehr und an Wochenenden im Reiseverkehr eingesetzt werden, werden etwa 73 % der Fahrzeuge mit Klimaanlage ausgeliefert. Um Anreize für den öffentlichen Nahverkehr zu schaffen, werden in zunehmendem Maße auch Stadtbusse klimatisiert. Lag die Ausrüstungsrate neuer Stadtbusse im Jahr 1993 noch bei etwa 5 %, betrug sie 2002 schon 40 % und 2008 64 %. Als Kältemittel wird fast ausschließlich R 134a verwendet [Schwarz 2004; Schwarz 2010; Schwarz 2010a]. Die Omnibusklimaanlagen arbeiten schon seit Jahren unverändert nach dem Kaltdampfprozess. Zumeist werden kältetechnische Standardkomponenten verwendet.

Die Konzepte zur Klimatisierung dieser Fahrzeuge sind durchaus verschieden: Während Fernreisebusse in der Regel mit mehr oder weniger aufwändigen Split-Klimaanlagen¹⁸ ausgerüstet sind, hat sich bei Überland- und Stadtbussen von Anfang an der Trend zur einfacheren und damit kostengünstigeren Aufdach-Kompaktanlage durchgesetzt. Bei dieser sind alle zur Klimatisierung notwendigen Komponenten mit Ausnahme des Verdichters in einem Gerät vereint. Der Verdichter, häufig leistungsgeregelt, wird direkt vom Fahrmotor über Keilriemen und Elektromagnetkupplung angetrieben [Mayer 1997]. Die Anlagen sind seit der Einführung des Kältemittels R 134a (ab etwa 1995) zumeist fest verrohrt, lediglich zum Verdichter hin besteht eine flexible Verbindung.

Die Kälteleistung liegt zwischen 12 und 30 kW (Split-Klimaanlagen) bzw. zwischen 18 und 24 kW (Aufdach-Kompaktklimaanlagen) [Mayer 1998]. Die Anlagen sind so bemessen, dass im Kühlfall beim Überland- und Stadtbuss eine Temperaturdifferenz von 2-3 Kelvin, beim Reisebus von etwa 5-8 Kelvin unter Umgebungstemperatur gehalten werden kann. Regelbarer Frischluftbetrieb (bis zu 100 %) ist zumeist Standard. Fast alle Anlagen sind zudem mit Kühlwasser-Heizregistern ausgestattet, so dass die Fahrzeuge auch beheizt werden können [Mayer 1997].

Die durchschnittliche Leckagerate von neuen Busklimaanlagen beträgt nach einer Studie für die Europäische Kommission 13,3 % Kältemittel pro Jahr für Reisebusse und 13,7 % für Linienbusse [Schwarz 2007b].

Im Busbereich gibt es zur Minderung der Emissionen und zur Reduktion der Kosten zwei Möglichkeiten. Zum einen den Einsatz eines Flüssigkeitskühlsatzes, der auch mit natürlichen Kältemitteln (z. B. Propan, CO₂) betrieben werden kann, und zum anderen die Verwendung des natürlichen Kältemittels CO₂ (R 744) in den bisher üblichen Busklimaanlagentypen (Aufdachklimaanlage) [Mayer 1998; Kirsamer 1999; aus Schwarz, Leisewitz 1999; Sonnekalb 2002].

Kompaktklimaanlage mit Sekundärkreislauf (Flüssigkeitskühlsatz)

Herzstück des Flüssigkeitskühlsatzes ist die sogenannte Energiestation im hinteren Teil des Busses, eine kompakte Baugruppe aus Plattenverdampfer, Standardverflüssiger, allen notwendigen Ventilgruppen, dem Wasserausgleichsbehälter und auch dem Zusatzheizgerät. An Stelle der Verdampfer befinden sich im Fahrgastraum Wasserwärmeaustauscher [Mayer 1998].

Im Gegensatz zur vom Heckmotor angetriebenen Dachanlage mit über 10 kg umlaufendem Kältemittel benötigt der primäre Kreislauf nur noch wenige Kilogramm Kältemittel. Bei

¹⁸ Mehrere Verdampfer im Innenraum sowie ein Fahrerplatzverdampfer sorgen für die richtige Temperatur.

einem Viertel aller Reisebusse konnte auf diese Weise die Füllmenge von 12 kg auf 7 kg gesenkt werden [Schwarz 2004]. Die kleine Baugruppe wird komplett vormontiert, geprüft und mit Kältemittel gefüllt direkt an den Bushersteller geliefert. Neben der deutlichen Reduzierung der Kältemittelmenge sorgen geringe Leckageraten, ein verbesserter Regelkomfort und ein verringerter Wartungsaufwand für beträchtliche Kosteneinsparungen des Busherstellers bei gleichzeitiger Verbesserung des Leistungsumfangs. Noch günstiger wird die Bilanz, wenn die Anlage außerhalb des Fahrgastraumes angebracht wird und im primären Kältekreislauf natürliche Kältemittel wie Propan oder CO₂ zum Einsatz kommen.

Aufdach-Klimaanlage mit CO₂

1996 wurde in Bad Hersfeld der weltweit erste Omnibus mit einer Klimaanlage auf CO₂-Basis im täglichen Linienverkehr eingesetzt. Ein Jahr später nahm ein zweiter Bus den regelmäßigen Dienst auf. Der Langzeittest im Stadtverkehr - über 2.000 Betriebsstunden - zeigte eine gute Funktionstüchtigkeit und hohe Zuverlässigkeit der von der Firma Konvekta AG entwickelten CO₂-Klimaanlage mit handelsüblichen offenen Kompressoren. Vergleichsmessungen an einem bis auf das verwendete Kältemittel (und die dazu erforderlichen Anpassungen) identischen Stadtbus ließen keine Unterschiede hinsichtlich der Kälteleistung, des Wirkungsgrades und des dynamischen Verhaltens erkennen. Die Konvekta AG, die im Bereich Busklimaanlagen einer der Marktführer ist, optimierte die CO₂-Anlage weiter. Mittlerweile sind mehrere Busse mit CO₂-Klimaanlagen ausgerüstet. Seit Mitte 2009 fährt bei der BVG ein Linienbus mit einer CO₂-Anlage, 6 weitere Busse gingen Mitte 2010 in Betrieb [BVG 2010]. Auch bei der Bahntochter Saar-Pfalz-Bus ist ein Fahrzeug mit einer CO₂-Anlage im Einsatz, fünf weitere sollen dazu kommen [BReg 2010]. Statt 10 kg Kältemittel R 134a benötigt die Anlage nur 5-6 kg CO₂ als Kältemittel. Mit der Umstellung von R 134a auf CO₂ können etwa 30 % der direkten und indirekten Treibhausgasemissionen eingespart werden. Eine Senkung der Kosten für die CO₂-Anlagen ist durch die Ausrüstung der Busse mit Klimaanlagen direkt bei den Busherstellern zu erwarten, der Mehrpreis läge dann etwa 20 % über dem Preis für heutige R 134a-Anlagen. Durch die Kostenreduktion bei Betrieb und Wartung beträgt die Amortisationszeit für die CO₂-Klimaanlage nur 4 bis 5 Jahre [Sonnekalb 2002; Sonnekalb 2003; Konvekta 2010].

Ein Konzept einer kompakten Aufdachanlage mit elektrisch angetriebenem R 744-Kältemittelverdichter auf 24 Volt-Basis wurde für Stadtbusse ebenfalls vorgeschlagen [Rindsfüßer 2008]. Sämtliche Kältekreislaufkomponenten sind im Aufbau enthalten, das Luftmanagementsystem ist verändert, die Klimaanlage wird auf die im Stadtverkehr nicht notwendige Notausstiegsöffnung montiert. Die Anlage ist weitestgehend hermetisiert, wodurch der Wartungsaufwand kleiner wird. Bisher ist das Konzept, auch wegen mangelnder Verfügbarkeit von passenden R 744-Bauteilen, nicht eingeführt worden.

Kombination von Kühlung und Heizung

Eine neue Möglichkeit für Busse ist die Anwendung der Klimaanlage mit einer Wärmepumpenfunktion, wodurch sich die Effizienz, verglichen mit üblichen Heizsystemen wie Brennern oder elektrischen Heizungen, verbessert. Versuche sind bereits durchgeführt und dokumentiert [Sonnekalb 2009]. Im Sommer 2010 wird ein Stadtbuss mit einer CO₂-Klimaanlage mit Wärmepumpenfunktion ausgerüstet [Konvekta 2010].

Lkw-Fahrerkabinen und Fahrerhauskabinen

Die technische Entwicklung von Klimaanlagen für Lkw-Fahrerkabinen oder Fahrerhauskabinen von Nutzfahrzeugen (wie Bau-, Landmaschinen) ist eng verknüpft mit den Entwicklungen bei Pkw und Bussen. Beim Ausstieg aus den FCKW entwickelten die Hersteller etwas zeitverzögert angepasste Lösungen für die speziellen Anwendungen bei Lkw und Nutzfahrzeugen, wobei sie die dieselbe Technik wie für Pkw nutzten. Daher dürfte bei Lkw und Nutzfahrzeugen ein Ausstieg aus dem Kältemittel R 134a und z. B. der Einstieg in CO₂-betriebene Klimaanlagen, der technisch möglich ist, erst im Anschluss an die Umstellung der Pkw erfolgen, wenn die erforderlichen Techniken sich bewährt haben und die Komponenten auf dem Markt günstig verfügbar sind.

Da die Anforderungen an die Fahrzeugführer hinsichtlich Konzentration und Reaktionsfähigkeit zugenommen haben, sind die Ausrüstungsraten der Neufahrzeuge mit Klimaanlagen in den letzten Jahren gestiegen. Sie betrugen im Jahr 2008 für kleine Nutzfahrzeuge (< 1,5 t) 45 %, für mittelgroße Nfz 43 % und für große Nfz (> 7,5 t) bereits 85 % [Schwarz 2010; Schwarz 2010a]. Die Füllmengen der Klimaanlagen liegen zwischen 700 g bis 1.450 g, d.h. durchschnittlich 1 kg und sind damit etwas größer als beim Pkw [Schwarz 2004; Schwarz 2007a]. Die durchschnittliche Leckagerate wird, unter Berücksichtigung irregulärer Emissionen, auf 11 % der Füllmenge pro Jahr geschätzt [Schwarz 2007a].

Schienenfahrzeuge

Die Klimatisierung bei der Eisenbahn hat eine lange Tradition. Nachdem in Deutschland bis in die 90er Jahre vor allem Fernzüge mit Klimaanlagen ausgestattet wurden, ist heute auch in Ländern mit gemäßigttem Klima die Klimatisierung von Nahverkehrszügen, S- Bahnen sowie bei neuen Straßenbahnen üblich. Bei U-Bahnen wird in Deutschland bisher nur der Fahrerstand klimatisiert. Im Nahverkehr kommen Klimageräte zum Einsatz, die sich in Bussen bewährt haben. Heutige Klimageräte werden bevorzugt als Kompaktklimageräte ausgeführt und schließen die Funktionen Kühlen, Lüften, Heizen und - bei Hochgeschwindigkeitszügen - den Druckschutz ein. Die Anordnung der Geräte und/oder der Komponenten kann sowohl im Dach, unter dem Fahrzeugboden als auch innerhalb der Fahrzeugstruktur erfolgen [Adolph 1998].

Die erforderliche Kälte- oder Heizleistung des jeweiligen Klimagerätes ergibt sich aus den thermischen Umgebungsbedingungen und den Anforderungen für den Komfort der Fahrgäste, der Isolierqualität des Wagens, der Personenlast, d.h. der Anzahl der Passagiere, dem Außenluft-Umluft-Verhältnis sowie der Last elektrischer Verbraucher im zu klimatisierenden Bereich, wie Beleuchtung, Lüfterantrieb oder Steuer- und Regelgeräte [Adolph 1998].

In Mitteleuropa ist bei etwa 70 Personen je Wagen eine Kühlleistung von 25-35 kW notwendig, wovon bis zu 10 kW für die Entfeuchtung erforderlich sind. Fahrerstände und Triebköpfe benötigen wegen der größeren vorgeschriebenen Frischluft rate, der oft großen Sichtscheibe sowie der Verlustwärme aus zahlreichen zusätzlichen elektrischen Regel- und Steuergeräten etwa 5-10 kW Kälteleistung [Adolph 1998]. Züge sind in der Regel gut wärme gedämmt, während bei Bussen und Straßenbahnen durch die Leichtbauweise und große Fenster die Wärmedämmung gesunken ist.

Nach dem Ausstieg aus den FCKW-Kältemitteln R 12, (in Deutschland) und R 22 (Südeuropa), die in der Anfangsphase der Bahnklimatisierung eingesetzt worden sind, wird heute in Deutschland nur noch das Kältemittel R 134a verwendet. In Südeuropa kommt auch die HFKW-Mischung R 407C¹⁹ zum Einsatz.

Klimaanlagen in Reisezugwagen des Nah- oder Fernverkehrs und ICE-Mittelwagen enthalten durchschnittlich 18 kg Kältemittel, S-Bahnen 10 kg und Fahrerstände und Triebköpfe 2,2 kg [Schwarz 2004]. Seit 1995 hat sich der Bestand von R 134a in den Klimaanlagen des Schienenverkehrs fast verzehnfacht und erreichte im Jahr 2008 224 t [Schwarz 2010]. Für die Klimaanlagen in Zügen werden üblicherweise hermetische oder halbhermetische Klimasysteme verwendet. Die jährliche Emissionsrate neuer Schienenfahrzeug-Klimaanlagen wird auf 5 % geschätzt. Einheiten mit direkt durch den Dieselmotor angetriebenen offenen Verdichtern, sog. diesel-driven multiple units (DMU) weisen eine jährliche Emissionsrate von 10 % auf [Schwarz 2007]. Umgerüstete Altanlagen haben mit etwa 25 % höhere Emissionsraten [Schwarz 2004]. Die Emissionen aus Schienenfahrzeugen nehmen zu, sie betrugen im Jahr 1995 2 t und im Jahr 2008 14 t [Schwarz 2010]. Bei der Deutschen Bahn AG gibt es insgesamt 10.500 Fahrgastraumklimaanlagen, von denen 95 % das Kältemittel R 134a verwenden [BReg 2010].

Bei der dänischen Eisenbahn wurde 1989 beim IC/3 „Rubber Nose“ für 150 Reisezugwagen ein indirektes Kühlsystem mit primärem Kältemittelkreislauf und sekundärem

¹⁹ Die HFKW-Mischung 407C enthält R 32 (23 %), R 125 (25 %) und R 134a (52 %).

Wasserkreislauf installiert. Statt 12 kg Kältemittel für einen direkten Kreislauf werden hier nur 6 kg Kältemittel benötigt [Schwarz 2007].

Eine innovative Lösung bieten die Züge der Bauserie ICE 3 der Deutschen Bahn AG, die mit Kaltluft gekühlt werden, mit einer Technologie, die für Flugzeuge angewendet wird. Bei der ersten Anlagengeneration gab es im Sommer 2003 Schwierigkeiten im Anlagenbetrieb, die nachgebessert wurden. Die zweite Bauserie des ICE 3 wurde mit anderen Kaltluft-Klimaanlagen bestückt, die ohne technische Schwierigkeiten funktionieren und sehr wartungsfreundlich sind. Insgesamt sind 504 luftgestützte Klimaanlagen zur Fahrgastraumklimatisierung in Betrieb, das sind 5 % aller Anlagen [BReg 2010]. Eine Gesamtbilanzierung der luftgekühlten Anlagen ist bisher von Seiten der DB nicht erfolgt. Berechnungen zeigen aber, dass die luftgekühlten Anlagen beispielsweise für Hochgeschwindigkeitszüge, die in mittleren Breiten eingesetzt werden energetisch sinnvoll sein können [Aigner 2007, Liebherr 2010]. Vorteil für die Wartung ist, dass der Umgang mit R 134a entfällt. Allerdings sind die neuesten Züge dieser Baureihe wieder konventionell mit R 134a-Klimaanlagen ausgerüstet worden [Wüst 2010]. Dass kaltluftgestützte Anlagen auch für zukünftige Anwendungen zur Verfügung stehen, zeigt die neueste, für Züge weiter optimierte Generation kaltluftgestützter Anlagen auf der Innotrans 2010 [Liebherr 2010].

Im Sommer 2010 sind eine Reihe von Klimaanlagen des ICE 2 ausgefallen. Dabei handelte es sich um R 134a-Klimaanlagen. Eine Entscheidung für die zukünftigen Klimaanlagen der neuen Züge der ICX- Serie hat die Deutsche Bahn noch nicht getroffen; von der Bahn wurde ein umweltverträgliches, nicht brennbares und nicht giftiges Kältemittel, das für die Lebensdauer des Fahrzeuges zugelassen ist, gefordert [BReg 2010].

Bei der Wahl eines neuen Kältemittels für Schienenfahrzeuge müssen vielfältige Anforderungen erfüllt und durch Erprobungen sichergestellt werden, so z. B. im Hinblick auf Brandschutz, Instandhaltung, Betriebskosten sowie Umweltauswirkungen oder Verfügbarkeit [BReg 2010]. Außerdem müssen Bahnklimaanlagen für die unterschiedlichen Zugarten und Klimazonen jeweils neu entwickelt oder zumindest angepasst werden.

CO₂-Klimaanlagen können für den Schienenverkehr eine Alternative zu R 134a-Anlagen darstellen. Dabei ist auf einen günstigeren Gesamtbeitrag zum Treibhauseffekt (TEWI) zu achten, der mit dem Kältemittel CO₂ technisch grundsätzlich realisierbar ist. Die meisten Komponenten für die Konstruktion der CO₂-Klimaanlagen für Schienenfahrzeuge sind mittlerweile am Markt verfügbar. Die geschätzte Einführungszeit für erste neue Züge mit CO₂-Klimaanlagen liegt in der Größenordnung von 2-3 Jahren.

Bei der Deutschen Bahn AG ist die Ausrüstung eines Dieseltriebzuges mit einer CO₂-Prototypklimaanlage vorgesehen, basierend auf der CO₂-Klimaanlagentechnik für Busse (siehe Abschnitt zu Kraftomnibussen). Der Versuchsbetrieb soll ab 2011 beginnen [Konvekta 2010; BReg 2010]. Die CO₂-Anlage ist etwa 20 % teurer als eine R 134a-Anlage. Die Amortisationszeit für eine CO₂-Klimaanlage beträgt durch

Einsparungen bei der Wartung und beim Energieverbrauch im Betrieb etwa 5 Jahre [Konvekta 2010].

Für elektrisch und dieselektrisch getriebene Schienenfahrzeuge wie Straßenbahnen und Nahverkehrszüge sind Prototypen elektrisch angetriebener kompakter CO₂-Klimaanlagen über Langzeit (10.000 Stunden) im Klimaprüfstand getestet, so dass erste Fahrzeuge für den Probetrieb ausgerüstet werden könnten [Konvekta 2010; Presetschnik 2008 und 2010].

Für einen Reisezug wird die Verwendung eines elektrisch angetriebenen CO₂-Unterfluraggregates bereits seit 2007 in Tschechien erprobt [Presetschnik 2008].

Generell ist der Energieverbrauch von Zugklimaanlagen projektspezifisch zu ermitteln, er ist abhängig vom jeweiligen Anlagenkonzept und den Betriebs- und Umgebungsbedingungen. Messungen des jährlichen Energieverbrauches an einer CO₂-Prototypanlage für Reisezugwagen ergaben 52 % weniger Verbrauch im Vergleich zu einer herkömmlichen R 134a-Klimaanlage und 12 % weniger Verbrauch im Vergleich zu einer optimierten R 134a-Anlage [Aigner 2007; Morgenstern, Ebinger 2008].

Eine neue Möglichkeit der Optimierung des Wärmemanagements in Zügen ergibt sich aus der Kombination der Funktionen Kühlen im Sommer und Heizen im Winter mit dem Kältemittel CO₂. Versuche im Klimaprüfstand und mit Bussen sind erfolgt [Presetschnik 2008 und 2010; Sonnekalb 2009; Hafner 2010]. Computersimulationen zeigen, dass durch Wärmepumpenheizung mit dem Kältemittel CO₂ der Energieverbrauch je nach klimatischen Verhältnissen im Vergleich zum elektrischen Heizen um 78 % gesenkt werden könnte [Hafner 2010].

Schiffe

Alle 353 Seeschiffe (Güterschiffe) unter deutscher Flagge mit einer Bruttoreaumzahl (BRZ) von über 100 sind klimatisiert, ebenso 16 Passagierschiffe und 1 Kreuzfahrtschiff. Nach kurzen Versuchen mit dem Kältemittel R 407C erfolgte ab 1996 die Umstellung auf R 134a. Bis einschließlich 1998 wurde noch häufig der HFKW-22 eingesetzt. Die Füllmengen betragen in neuen Güterschiffen durchschnittlich 100 kg, in Fahrgastschiffen 250 kg und in Marineschiffen 500 kg. Kreuzfahrtschiffe haben je eine Klimaanlage mit etwa 1.000 kg Kältemittel [Schwarz 2004].

Dagegen sind die über 1.300 Güter- und Tank-Motorschiffe in der Binnenschifffahrt grundsätzlich nicht klimatisiert. Sie kühlen den Proviant mit Hausgeräten an Bord. Neue Fahrgastschiffe sind dagegen durchweg klimatisiert, und zwar seit dem Jahr 1997 mit R 134a. Kabinenschiffe benötigen durchschnittlich 250 kg und Tagesausflugsschiffe 100 kg Kältemittel [Schwarz 2004].

In der Regel werden Wasserkühlsätze eingesetzt, d.h. durch die langen Leitungen zirkuliert Wasser und nicht das Kältemittel [Schwarz 2004]. Schiffsklimaanlagen sind relativ undicht, Klimaanlage mit direkter Verdampfung des Kältemittels (wie in Güterschiffen) emittieren

jährlich 40 %, indirekte Systeme (wie in Passagierschiffen) 20 % der Kältemittelmenge [Schwarz 2007].

Schlussfolgerungen

Da die technische Entwicklung von Klimaanlage für Lkw-Fahrerkabinen und Fahrerhauskabinen von Nutzfahrzeugen eng mit den Entwicklungen im Pkw-Sektor verknüpft ist, wird hinsichtlich der grundsätzlichen technischen Möglichkeiten zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen in diesen Sektoren auf die Schlussfolgerungen von Kapitel 3.3.7.1 (Pkw-Klimaanlagen) verwiesen. Ein Ausstieg aus dem Kältemittel R 134a sollte auch in den oben genannten Sektoren angestrebt werden. Die Verwendung von brennbaren Kältemitteln wie Kohlenwasserstoffen, des HFKW-152a oder neuen brennbaren Kältemitteln der Gruppe der Hydrofluoralkene ist wegen der im Vergleich mit Pkw-Klimaanlagen benötigten größeren Füllmengen in diesen Anwendungen nur schwer vorstellbar. Eine Ausnahme könnten hier höchstens Anlagen mit Sekundärkreislauf darstellen. Diese könnten dann aber auch Kohlenwasserstoffe enthalten. Damit wäre auch hier der Einsatz des HFKW-152a oder anderer fluorierter Kältemittel nicht erforderlich. Unter Berücksichtigung dieses und aller weiteren Aspekte wäre hier - wie bereits bei den Pkw-Klimaanlagen - dem klimaneutralen Kältemittel CO₂ der Vorzug zu geben.

Nach jahrelanger Erprobung von Testfahrzeugen sind seit dem Jahr 2010 mehrere Linienbusse mit CO₂-betriebenen Klimaanlage im täglichen Einsatz. Im Schienenverkehr kommen ähnliche Anlagen wie im Bussektor zum Einsatz. Langzeittests mit CO₂-Klimaanlagen sind erfolgreich verlaufen. Mit der kommerziellen Einführung könnte begonnen werden. Wegen der besonderen Bedeutung des Schienenverkehrs für den Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) und weil Schienenfahrzeuge ausgesprochen langlebige Güter mit schwierigen baulichen Gegebenheiten und besonderen Ansprüchen an die Verfügbarkeit darstellen, sind insbesondere Projekte in diesem Sektor zu fördern. Der Klimatisierungsbedarf sollte so genau wie möglich kalkuliert werden, da mobile Klimaanlage Energie benötigen und zusätzliche zu transportierende Masse einbringen. Auf die Klimatisierung der Fahrgasträume von U-Bahnen könnte in Deutschland beispielsweise weitgehend verzichtet werden.

Die betroffenen Hersteller weisen darauf hin, dass eine rechtzeitige und klare Rahmensetzung durch die staatlichen Stellen die gewünschten Innovationen auslösen könnte. Daher sollten die EU-Verordnungen, die bisher nur für Pkw und kleine Nutzfahrzeuge Verbote aussprechen, um Regelungen und Fristen für alle anderen Fahrzeuge ergänzt werden.

3.3.8 Sonstige Anwendungen / Einsatz von FKW

Neben den zuvor konkret genannten Anwendungsgebieten ist die Bereitstellung von Kälte in vielen weiteren Bereichen erforderlich. Teilweise müssen dabei sehr spezielle Anforderungen erfüllt werden. Die trifft z. B. auf einige Laboranwendungen und medizinische Anwendungen zu. Andererseits werden auch im Labor oder Krankenhaus Standardkältegeräte eingesetzt. Für die meisten Kälte- und Klimaanlageanwendungen kann daher auf die Darstellungen in den vorangegangenen Kapiteln verwiesen werden. Insbesondere wird auf die Ausführungen zu Kältegeräten und -anlagen in der Gewerbekälte in Kapitel 3.3.2 und zu Flüssigkeitskühlsätzen in Kapitel 3.3.5.2 hingewiesen.

Auf den in Einzelfällen an besondere Anforderungen geknüpften Kältebedarf in den oben genannten und weiteren Bereichen wird in diesem Bericht nicht eingegangen. Da aber zum Beispiel in einigen medizinischen Anwendungen, z. B. zur Kälteerzeugung für Kältekammern (Tiefsttemperaturen) für die Behandlung von Hautkrankheiten, perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW) eingesetzt werden²⁰, wird hier nochmals auf deren besondere Problematik hingewiesen. FKW-Emissionen tragen wegen ihres sehr hohen Treibhauspotenzials (s. Tab. 1.2) stärker als HFKW-Emissionen zum anthropogenen Treibhauseffekt bei²¹. Daher sollte vor einer Verwendung von FKW die Eignung weniger klimaschädlicher Stoffe geprüft werden. Sofern der Einsatz von FKW erforderlich ist, sollte eine Minimierung sowohl der eingesetzten Mengen als auch der Emissionen angestrebt und durch geeignete Maßnahmen sichergestellt werden.

Ein weiteres in den vorangegangenen Kapiteln nicht betrachtetes Anwendungsfeld für fluorierte Treibhausgase ist ihr Einsatz als organisches Arbeitsmittel in ORC-Prozessen. ORC-Prozesse kommen zur Anwendung, wenn Elektrizität aus geothermischen oder solaren Wärmequellen erzeugt oder Abwärme von industriellen Prozessen genutzt und diese Wärme in nutzbare Energie umgewandelt wird. Durch den Einsatz organischer Arbeitsmittel an Stelle von Wasserdampf wird es möglich, für spezielle Anwendungen jeweils optimale Fluide (Arbeitsmittel) auszuwählen. Neben reinen Kohlenwasserstoffen wie Isopentan (z. B. Geothermiekraftwerk Landau) kommen als Arbeitsmittel auch der HFKW-245fa, der HFKW-134a und andere fluorierte Treibhausgase zum Einsatz. Die Entscheidung für ein bestimmtes Fluid hängt von vielen Faktoren, wie z. B. dem Temperaturbereich der Wärmequelle, ab [Heberle et al. 2009; BINE 2007]. Bei der Entscheidung für ein Arbeitsmittel ist aber nicht nur sein Einfluss auf den Wirkungsgrad der Anlage, sondern auch das Treibhauspotenzial des Arbeitsmittels in die Bewertung einzubeziehen.

²⁰ In dieser Anwendung sind nach dem Stirling-Prinzip betriebene Kälteanlagen sowie Kaltgasprozesse als mögliche Alternative zu nennen.

²¹ Eine Ausnahme stellen Emissionen des HFKW-23 dar, welcher ein GWP₁₀₀ von 11.700 besitzt.

In Kapitel 3 verwendete Literatur

- Acalor - Acalor Technik Scheel KG (2009): Produktbeschreibung Acalor-Heizungswärmepumpe, (www.acalor.de/data/archive/files/Datenblaetter/3.pdf; 28. Januar 2009).
- Acalor - Acalor Technik Scheel KG (2009a): Persönliche Mitteilung Herr Daschke vom 23. Februar 2009.
- Adolph, Ulrich (1998): *Entwicklungsstand und Tendenzen der Klimatisierung von Schienenfahrzeugen*. In: Ki Luft- und Kältetechnik 1998 (3), Heidelberg: C. F. Müller, Hüthig GmbH.
- Aigner, Reinhard (2007): *Future HVAC developments- Synthetic and Natural Refrigerants for Rail HVAC Units and their Impact on the Annual Energy Consumption*. RTA (Rail Tech Arsenal) International Workshop, 31. Mai -1. Juni 2007, Wien, Österreich.
- AIHA - American Industrial Hygiene Association® (2010): *Current AIHA WEEL Values (2010)*. (http://www.aiha.org/foundations/GuidelineDevelopment/weel/Documents/WEEL_Values2010.pdf; 21.07. 2010).
- Anhörung (2003): Gespräche zu fluorierten Treibhausgasen auf der Basis des Eckpunktepapiers und der hierzu im BMU eingegangenen Stellungnahmen zu den Anwendungsbereichen „stationäre Kälte- und Klimatechnik“ (28./29. Januar 2003), „mobile Kälte- und Klimatechnik (einschl. Transportisolierung)“ (30. Januar 2003), „Verschäumung (einschließlich Montageschaum)“ (12. Februar 2003), „SF₆ in Schaltanlagen“ (13. Februar 2003), „Halbleiterindustrie“ (13. Februar 2003) und „Sprayanwendungen, Feuerlöschmittel, sonstige Anwendungen“ (14. Februar 2003), Bonn: Umweltministerium.
- ASERCOM - Association of European Refrigeration Compressor and Controls Manufacturers (2003): Mündliche Mitteilung Herr Jochen Winkler vom 28. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- ASUE - Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (2002): *Gaswärmepumpen*. Kaiserslautern: ASUE.
- ASUE - Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (2008): *Marktübersicht 2008 – Gaswärmepumpen, Gasklimageräte, Gasabsorptionskälteanlagen*. Berlin: ASUE, (http://asue.de/cms/upload/inhalte/gaswaermepumpe_und_kaeltetechnik/broschuere/marktuebersicht_2008.pdf; 22. Januar 2009).

- Axima - Axima Refrigeration GmbH, seit 2009: Cofely Refrigeration GmbH (2003a): Mündliche Mitteilung Herr Holger König vom 28. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- Axima - Axima Refrigeration GmbH, seit 2009: Cofely Refrigeration GmbH (2003b): Persönliche Mitteilung Herr Holger König vom 13. März 2003.
- Axima - Axima Refrigeration GmbH, seit 2009: Cofely Refrigeration GmbH (2003c): Internetinformation.
- Axima - Axima Refrigeration GmbH, seit 2009: Cofely Refrigeration GmbH (2003d): Mündliche Mitteilung Herr Eckart Prandner vom 29. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- Axima - Axima Refrigeration GmbH, seit 2009: Cofely Refrigeration GmbH (2008): Informationsbroschüre Quantum II (<http://www.cofely.de/de/presse/Download>; 18.01.2010).
- BAFA - Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (2009): Förderung von effizienten Wärmepumpen. (www.bafa.de/bafa/de/energie/erneuerbare_energien/waermepumpen/index.html 21. Januar 2009).
- BAM - Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (2010): *Ignition behaviour of HFO1234yf*. Final Test Report, 22. Juni 2010, Messungen im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 363 01 262 (http://www.umweltbundesamt.de/produkte/dokumente/test_report_hfo1234yf_2010_06.pdf; 27.08.2010).
- BASF - BASF AG Ludwigshafen (2003): Mündliche Mitteilung Herr Ebenhöch vom 28. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- Behnert, Thorsten; König, Holger (2003): *Entwicklung eines NH₃-Standard-Flüssigkeitskühlsatzes mit minimaler Füllmenge*. In: Die Kälte & Klimatechnik KK, 56 (6) 32-37, Stuttgart: Gentner.
- BGV - BGV D 4 (VBG 20) (1997): *Kälteanlagen, Wärmepumpen und Kühleinrichtungen*. 1. April 1987 in der Fassung vom 1. Oktober 1997, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften.
- BINE-Info - BINE Informationsdienst des Fachinformationszentrums Karlsruhe (2000): *CO₂ als Kältemittel für Wärmepumpe und Kältemaschine*. 2000 (10), Karlsruhe, (www.bine.info/hauptnavigation/themen; 19. September 2003).
- BINE-Info - BINE Informationsdienst des Fachinformationszentrums Karlsruhe (2007): *Geothermische Stromerzeugung in Landau*. 2007 (14), Karlsruhe.

- BiPRO - Beratungsgesellschaft für integrierte Problemlösungen (2008): *Study on the potential application of Art. 3 and 4(1) of Regulation (EC) No 842/2006 on certain fluorinated greenhouse gases to air conditioning and refrigeration systems contained in different transport modes*. Final Report 22.12.2008, Prepared for the European Commission, DG Environment, Brüssel: BiPRO GmbH 2008, (http://ec.europa.eu/clima/documentation/f-gas/docs/gas_transport.pdf; 23.06.2010)
- BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2009): Förderpreise: Klimaschutz mit Klimatechnik im Rahmen der Klimaschutzinitiative, (<http://www.bmu.de/klimaschutzinitiative/>; 14. Juli 2010)
- Bock - Bock Kältemaschinen GmbH (2003): Mündliche Mitteilung Herr Harald Kaiser vom 28. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- Brauneis, Christoph (2003): *Heizen und Kühlen mit Gaswärmepumpen. Interessiertes Kälteanlagenbauerhandwerk*. In: Kälte Klima Aktuell KKA, 2003 (2) 38-40, Gütersloh: Bertelsmann Springer Bauverlag.
- BReg - Bundesregierung (2009): Berichterstattung der Bundesrepublik Deutschland gemäß Artikel 5, 7 und 8 des Kyoto-Protokolls der UN-Klimarahmenkonvention zu fluorierten Treibhausgasen an das Sekretariat der Klimarahmenkonvention im Jahr 2009: *Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2007*. Climate Change 02/09, Dessau-Roßlau: UBA und *Inventartabellen im Common Reporting Format (CRF)*, (www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.ht; 14.8.08).
- BReg - Bundesregierung (2010): *Kältemittel in Klimaanlage der Deutschen Bahn AG*. Bundestags- Drucksache 17/2837, 2.09.2010.
- Brouwers, C. (2007): *Trends in Supermarket Technology within the EU*. International CO₂ol Food Conference, Berlin, 23. Mai 2007.
- BSH - Bosch Siemens Hausgeräte (2003): Mündliche Mitteilung Herr Arnold vom 28. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- Buderus - Bosch Thermotechnik GmbH (2009): Produktinformation im Internet (www.buderus.de; 24. Februar 2009).
- BVG - Berliner Verkehrsbetriebe (2010): *Die klimafreundliche Kühlung: Berliner Verkehrsbetriebe fahren mit umweltschonenden Klimaanlage*. Pressemitteilung vom 2. Juli 2010, (<http://www.bvg.de/index.php/de/103842/name/Pressemitteilungen/article/764642>; 5.07.2010).
- BWP - Bundesverband WärmePumpe (2002): Stellungnahme zum Eckpunktepapier [EckPapier 2002] vom 23. Oktober 2002, unveröffentlicht.

- BWP - Bundesverband Wärmepumpe (2009): *Boom bei Wärmepumpen*. Pressemitteilung des BWP vom 28. Januar 2009, (www.waermepumpe.de/fileadmin/Pressemitteilungen/2009-01-28_PI-Absatzzahlen_Final.pdf; 29. Januar 2009).
- BWP - Bundesverband Wärmepumpe (2010): *Marktanteil der Wärmepumpe im Wohnungsneubau steigt 2009 auf 25 %*. News des BWP vom 29. Juni 2010, (<http://www.waermepumpe.de/endverbraucher/aktuell/news/news-detail/article/41/kempfert-en.html>).
- Calor - Calor Gas Ltd (2002): Persönliche Mitteilungen Herr Paul Blacklock.
- Carrier - Carrier GmbH & Co.KG (2003): Mündliche Mitteilung Herr Hartmann vom 28. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- CCI (2008): *Neuheiten auf der Chillventa. VRV-Klima mit CO₂ – erster Prototyp*. In: CCI, 2008 (14) 17, Karlsruhe: Promotor Verlags- und Fördergesellschaft mbH.
- Chemie.DE - Information Service GmbH (2010): *Honeywell erhält europäisches Patent für Kühlmittel mit niedrigem Treibhauspotenzial*, Pressemitteilung chemie.de vom 6. Januar 2010 (<http://www.chemie.de/news/d/111381/>; 23.06.2010)
- ChemKlimschutzV (2008): *Verordnung zum Schutz des Klimas vor Veränderungen durch den Eintrag bestimmter fluorierter Treibhausgase (Chemikalien-Klimaschutzverordnung – ChemKlimaschutzV)*. Vom 2. Juli 2008, BGBl. I Nr. 27 S. 1139-1144.
- Chiu, Yuon; Cottrell, Stephen, A.; Tung, HsuehSung; Kopkalli, Haluk; Cerri, Gustavo (2010): *Process of co-producing HFC-1225ye and HFC-1234yf via 4-step reactions*. Honeywell, Europäisches Patentamt, Ankündigung der Patenterteilung am 11.06.2010, (<https://register.epoline.org/espacenet/regviewer?AP=09155177&CY=EP&LG=en&DB=REG>; 24.07.2010).
- Christensen, K. G. (1999): *Use of CO₂ as primary and secondary refrigerant in supermarket applications*. In: Proceedings 20th Int. Congress of Refrigeration, IIR/IIF, Sydney, Vol. III (paper 375).
- Clivet – Clivet GmbH (2009): Produktinformationen im Internet, (<http://web.clivet.it/pdf/BT04E031D--01.pdf>; 17. Februar 2009).
- Coca -Cola (2005): Coca-Cola setzt auf klimafreundliche Kältetechnik, (<http://www.presseportal.de/story.htx?nr=694043&firmaid=7974>; 26.5.2010).
- Coca-Cola - Chairman und CEO der Coca-Cola Company Nevill Isdell (2008): *The Virtuous Cycle: Kick-Starting a Climate-Friendly Future, Remarks by Neville Isdell*.

Gehalten am 27. Mai 2008 in Peking, China. (http://www.thecocacolacompany.com/presscenter/viewpoints_isdell_greenpeace.html; 01.8.2008).

Coca-Cola (2000): *Coca-Cola Unveils Latest Initiatives to Fight Global Climate Change*. Pressemitteilung von Coca-Cola vom 28. Juni 2000.

Cofely - Cofely Refrigeration GmbH (2009): *Industriekälte nach Maß - Effiziente und präzise Kälte für viele Anwendungen*. Firmenbroschüre.

COM - European Commission, DG Environment (2003): *How to Considerably Reduce Greenhouse Gas Emissions due to Mobile Air Conditioners*. Consultation Paper, Brussels, Belgien: COM.

Cube, von Hans Ludwig; Steimle, Fritz; Lotz, Helmut (1997): *Lehrbuch der Kältetechnik*. Heidelberg: C. F. Müller, Hüthig GmbH.

Daikin - Daikin Airconditioning Germany GmbH (2009): Pressemitteilung. (www.daikin.de/presse/2007_fachpresse/2008.jsp; 19. Februar 2009).

Daikin - Daikin Industries, Ltd. (2003): Mündliche Mitteilung Herr Zeller vom 29. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].

Danfoss - Danfoss GmbH (2003a): Mündliche Mitteilung Frau Ulrike Sieger-Koser vom 28. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].

Danfoss - Danfoss GmbH (2003b): Information auf der IKK, Hannover, 10. Oktober 2003.

Danfoss - Danfoss GmbH (2007): *CO₂ refrigerant for Industrial Refrigeration*. Broschüre von Danfoss RA Marketing.

Danfoss - Danfoss GmbH (2010): Internetinformation (www.danfoss.com/Germany/BusinessAreas/RefrigerationAndAirConditioning/Refrigerants/CO2+in+Industrial+Refrigeration+Applications.htm; 21.01.2010).

Daten zur Umwelt - Umweltzustand in Deutschland (2008): *Altfahrzeugaufkommen und -verwertung*. Dezember 2008, (<http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2304>; 29.06.2010).

DBU - Deutsche Bundesstiftung Umwelt (2003): *Umweltfreundlich kühlen mit Kohlendioxid*. DBU Aktuell 2003 (9), Osnabrück: DBU.

DBU - Deutsche Bundesstiftung Umwelt (2009): *Entwicklung einer CO₂-Transportkälteanlage*. (http://www.dbu.de/123artikel26848_341.html; 9.11.2009).

Delonghi (2009): Firmen- und Produktinformation im Internet. (www.delonghi.com; 9.2.2009).

- Dimplex - Glen Dimplex Deutschland GmbH (2009): Produktinformation zur Luft/Wasser-Wärmepumpe LA 26PS. (www.dimplex.de/nc/waermepumpe/luft-wasser/aussenaufstellung/hpl-26ps.html; 4. Februar 2009).
- DIN (1995a): *Verkaufskühlmöbel - Teil 9: Prüfung der elektrischen Energieaufnahme*. DIN EN 441-9, Ausgabe: Januar 1995, Deutsche Fassung EN 441-9, 1994, Berlin: Beuth.
- DIN (1995b): *Kälteanlagen und Wärmepumpen mit brennbaren Kältemitteln der Gruppe L3 - Sicherheitstechnische Anforderungen*. DIN 7003, Ausgabe: Dezember 1995, Berlin: Beuth.
- DIN (2006): *Verkaufskühlmöbel – Teil 2: Klassifizierung, Anforderungen und Prüfbedingungen*. DIN EN ISO 23953-2, Ausgabe: Februar 2006, Berlin: Beuth.
- DIN (2008): *Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen*. DIN EN 378 (Teile 1-4), Ausgabe: Juni 2008; Deutsche Fassung EN 378, 2008, Berlin: Beuth.
- Dixon, Liz (2010): *Results of Shrieve Evaluations of 1234yf Refrigerant on Mobile A/C Lubricant Performance and System Chemistry*. SAE – Automotive Refrigerant and System Efficiency Symposium, 13-15. Juli 2010, Scottsdale, Arizona, USA.
- DKV - Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein (2003): Mündliche Mitteilung Herr Jacobs vom 28. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- Du Pont (2009): *Material Safety Data Sheet 2,3,3,3-Tetrafluoro-1-propene*. Ausgabe 1. Dezember 2009.
- Earthcare - Earthcare Products Limited (2009): Persönliche Mitteilung Herr Nelson Cox vom 17. Dezember 2009.
- Earthcare - Earthcare Products Limited (2010): Referenzanlagen im Internet, (<http://www.earthcareproducts.co.uk/index-chillers.php>; 25.06.2010).
- Ebinger, Ingwer (2008): *Bewertung des Energieverbrauchs von Klimaanlage für Schienenfahrzeuge*. Deutsche Kälte-Klima-Tagung, November 2008, Ulm: DKV.
- EckpPapier - Eckpunktepapier (2002): *Umsetzung des Nationalen Klimaschutzprogramms im Bereich der Fluorierten Treibhausgase (H-FKW FKW SF₆) - F-GASE*. Vom 30. September 2002.
- EEDAL - Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting (2009): *Promotion of energy-efficient heat pump dryers*. Jürg Nipkow, Berlin: EEDAL, (http://www.eedal.eu/fileadmin/eedal2009/presentations/Washing_and_Drying/030_Nipkow.pdf; 14.7.2010).
- EEDAL - Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting (2009a): *Environmental Impacts and Costs of Different Ways to Dry Clothes*. Carl-Otto Gensch et al, Berlin:

EEDAL,

(http://www.eedal.eu/fileadmin/eedal2009/presentations/Washing_and_Drying/166_Gensch.pdf; 14.7.2010).

Elsheikh, Maher, Y.; Bonnet, Philippe (2009): *Catalytic Gas Phase Fluorination of 1230xa to 1234yf*. Application number: 09770855.6, 23.06.2009, Arkema Inc., USA, (<https://register.epoline.org/espacenet/application?number=EP09770855>; 24.07.2010).

EP - Europäisches Patent (2010): No. EP 1 716 216 B9: *Compositions containing fluorine Olefins - Zusammensetzungen mit fluorsubstituierten Olefinen*. Anmelder: Honeywell International Inc., Erfinder: Singh, Rajiv, R; Pham, Hang, T.; Wilson, David, P.; Thomas, Raymond, H.; korrigierte Fassung vom 10.03.2010, (<https://register.epoline.org/espacenet/application?number=EP05744161>; 21.09.2010)

EPA - US Environmental Protection Agency (2003): *Questions and Answers on Alternative Refrigerants*. (www.epa.gov/ozone/snap/refrigerants/qa.html#q12; 4.01.2010).

EPA - US Environmental Protection Agency (2008): *40 CFR Part 82 Alternatives for the Motor Vehicle Air Conditioning Sector Under the Significant New Alternatives Policy (SNAP) Program, Protection of the Stratospheric Ozone, Final rule*. EPA–HQ–OAR–2004–0488, FRL–8578–1, Federal Register, Vol. 73, No. 114, June 12, 2008, Rules and Regulations, S. 33304.

EuP Lot 16 - Preparatory studies for Ecodesign requirements of Energy-using-Products (EuP) – Lot 16 (2008): *Ecodesign of Laundry Dryers – Report task 6 – Draft for consultation*. (www.ecodryers.org; 5.7.2010).

eurammon - Initiative für natürliche Kältemittel (1998): *Energetischer Vergleich von Schraubenverdichtern in Flüssigkeitskühlsätzen für Klimakälteanwendungen mit Ammoniak und R 134a*. eurammon-Information Nr. 10, Frankfurt/Main: eurammon, (www.eurammon.com; 23.6.2003).

eurammon - Initiative für natürliche Kältemittel (1999): *Vergleich Ammoniak / Kälteträgeranlage vs. H-FCKW / FKW Direktverdampfung*. eurammon-Information Nr. 12, Frankfurt/Main: eurammon, (www.eurammon.com; 23.6.2003).

eurammon - Initiative für natürliche Kältemittel (2002): *Kohlendioxid – CO₂ – R 744 – (Kohlensäure) Geschichte eines interessanten Stoffes*. eurammon-Information Nr. 15, Frankfurt/Main: eurammon, (www.eurammon.com; 23.6.2003).

eurammon - Initiative für natürliche Kältemittel (2003): *Fallstudie Berlin-Ostbahnhof*, (www.eurammon.com; 11. Februar 2009).

- eurammon - Initiative für natürliche Kältemittel (2007): *Investing in the future- Use of natural refrigerants on board of ships eases the burden on the environment, Refrigeration world* , Oktober 2007, S. 16-17.
- EUROVENT/CECOMAF - European Committee of Air Handling, Air Conditioning and Refrigeration Equipment Manufacturers (1997): *Recommendation for energy consumption evaluation of remote refrigerated display cabinets*.
- Eurovent-Certification (2001): *Zertifizierungsprogramm für Verkaufskühlmöbel*.
- Eustice, Harry (2010): *A Vehicle Manufacturer's Perspective on Alternative Refrigerant Development*. General Motors, MAC UNEP Workshop 3.-4. Juni 2010, Nanjing, China.
- Expertenkreis (2007): 2. Treffen des Expertenkreises zum UBA Forschungsvorhaben „Vergleichende Bewertung der Klimarelevanz von Kälteanlagen und -geräten für den Supermarkt“ (s. Harnisch u. a. 2008). 09. Oktober 2007: BMU, Bonn.
- Fachgespräch (2003): Fachgespräch zum Forschungsprojekt Harnisch u. a. [2003], Anwendungsbeispiel „Supermarktkühlung“, im Umweltbundesamt Berlin, am 25. Juni 2003.
- Fachinstitut Gebäude-Klima (2003): Mündliche Mitteilung Herr Friedhelm Körner vom 29. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- FAZ - Frankfurter Allgemeine Zeitung (2010): *Wärmepumpe ohne Kompressor*. Ausgabe Nr. 63 vom 16. März 2010, Seite T6.
- FKW - Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH (1996): *Untersuchung eines Supermarktes mit Ammoniak-Kälteanlagen und Kälteträgerkreisläufen*. Studie im Auftrag der Linde AG.
- FKW - Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH (1998a): *Ersatz der FCKW R 11, R 13, R 502, R 13B1, R 113, R 114 und R 12B1 in bestehenden Kälte-, Klima- und Wärmepumpenanlagen in der Bundesrepublik Deutschland durch Kältemittel mit geringerem Ozonabbaupotential*. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 206 01 049, UBA-Texte 59/98, Berlin: UBA.
- FKW - Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH (1998b): *Ersatz des Kältemittels R 22 in bestehenden Kälte- und Klimaanlage*. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, UBA-Texte 34/98, Berlin: UBA.
- FKW - Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH (2000): Persönliche Mitteilung Herr Michael Schmitz vom 12. Juli 2000.

- FKW - Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH (2001): *Ersatz des Kältemittels R 22 in bestehenden Kälte- und Klimaanlageanlagen - Aktueller Stand -*. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, UBA-Texte 05/01, Berlin: UBA.
- FKW - Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH (2002): *CO₂ in Kaskadenanlagen für Supermarktanwendungen*. Hannover: FKW, (www.fkw-hannover.de/html/kaskadenanlagen.html; 17.11.2003).
- FKW - Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH (2009): Persönliche Mitteilung Herr Horst Kruse vom 15. Januar 2009.
- Forschungsrat – Forschungsrat Kältetechnik (2009): *Branchenbericht Deutscher Markt für Kältetechnik 2009. Bestand an Kältesystemen in Deutschland nach Einsatzgebieten*. Frankfurt am Main, 15.12.2009.
- Frey - Frey, Schöler & Scheuber Managementberatung GmbH (2003): *Markt für Wärmepumpen in Deutschland und NRW – Strukturen und Entwicklungsmöglichkeiten*. Studie im Auftrag der Energieagentur NRW, (http://www.geothermie-zentrum.de/fileadmin/media/geothermiezentrum/Downloads/Literatur_Waermepumpen/Marktstudie_Waermepumpen_in_Deutschland.pdf; 4.01.2010).
- FRIGOBLOCK - FRIGOBLOCK Grosskopf GmbH (2003): Mündliche Mitteilung Herr Peter-Volker Großkopf vom 30. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- FRIGOBLOCK - FRIGOBLOCK Grosskopf GmbH (2010): *Kältehybrid. Inverter-Technologie*, IAA Nutzfahrzeuge 2010, 23.-30. September 2010, Hannover.
- Frigopol - Frigopol Kälteanlagen GmbH (2009): Mündliche Mitteilung Herr Martin Frasch vom 11. Februar 2009.
- FrigorTec - FrigorTec GmbH (2007): *CRANEFRIGOR® – Kühlung von Krankabinen und Kranelektronik*. Produktinformationsbroschüre. (www.frigortec.com; 27.01.2010).
- Gebhardt, Holm (2000): *Kälteanlagenumrüstung von R 13B1 auf CO₂/Ammoniak: Kälteanlage des Tiefkühlagers Beauvais, Nestlé-Frankreich*. Vortrag auf der DKV-Tagung, 22.-24. November 2000, Bremen.
- Gebhardt, Holm (2002a): *Kälteversorgung einer Tiefkühlkostfabrik mittels CO₂/Ammoniak-Kaskadenkälteanlage*. In: DKV-Tagungsbericht 2002, 20.-22. November 2002, Magdeburg, Arbeitsabteilung II.2, Band II.2, S. 251ff., Stuttgart: DKV.
- Gebhardt, Holm (2002b): *Umrüstung einer industriellen Tieftemperaturkälteanlage von R 22 auf CO₂/NH₃*. R22-Ausstiegsprojekt bei Nestlé-England. In: Die Kälte & Klimatechnik KK, 55 (10) 102-112, Stuttgart: Gentner.

- Gebhardt, Holm (Nestlé Vevey) (1999): *Kältemittel - Strategie in der Nahrungsmittelindustrie (Nestlé)*. Vortrag auf der DKV-Tagung, 17.-19. November 1999, Berlin.
- GHS (2008): *Verordnung (EG) 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr.1907/2006* (<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:353:0001:1355:DE:PDF>, 27.08.2010).
- Grage, Th.; Pareidt, H. (2000): *Innovative Kälteversorgung öffentlich genutzter Gebäude in Niedersachsen Strategien der Kältebereitstellung unter ökologischen und ökonomischen Kriterien*. Studie im Auftrag vom Niedersächsischen Ministerium für Wirtschaft, Technologie und Verkehr, Bericht Nr. 562_4420, Hemmingen.
- Grage, Th.; Pareidt, H. (2000): *Innovative Kälteversorgung öffentlich genutzter Gebäude in Niedersachsen Strategien der Kältebereitstellung unter ökologischen und ökonomischen Kriterien*. Studie im Auftrag vom Niedersächsischen Ministerium für Wirtschaft, Technologie und Verkehr, Bericht Nr. 562_4420, Hemmingen.
- Gram 2010: Produktbroschüren von Herstellern, Unternehmensinformationen, pers. Mitteilung.
- Grasso - Grasso GmbH (2003a): Mündliche Mitteilung Herr Thomas Spänich vom 29. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- Grasso - Grasso GmbH (2003b): Persönliche Mitteilungen Herr Thomas Spänich im Zeitraum 21. Februar bis 21. November 2003.
- Grasso - Grasso GmbH (2009): Produktinformationen im Internet. (http://docnav.grasso-global.com/DocNav_Ger/Index_g.htm; 9. Februar 2009).
- Graz, Martin (2009): *Investigation on Additional Fuel Consumption for a R134a and R744 AC-System in a VW Touran*. VDA Alternative Refrigerant Wintermeeting, 11.-12. Februar 2009, Saalfelden, Österreich, . (<http://www.vda-wintermeeting.de/Presentations.24.0.html>; 23.07.2010).
- Grimm, Ulrich (2010): *Complex Interactions of Low GWP Refrigerants, A/C Oils, and Materials in MAC Circuits*. SAE – Automotive Refrigerant and System Efficiency Symposium, 13-15. Juli 2010, Scottsdale, Arizona, USA.
- GTZ - Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (2010): Projektdatenblatt.
- Haaf, Siegfried; Heinbokel, Bernd (2002): *Supermarktkälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln*. In: Die Kälte & Klimatechnik KK, 55 (9) 32-39, Stuttgart: Gentner.

- Haaf, Siegfried; Heinbokel, Bernd (2003): *Kälteanlagen für Supermärkte mit alternativen Kältemitteln*. In: KI Luft- und Kältetechnik, 2003 (11) 508-512, Heidelberg: C. F. Müller, Hühthig GmbH.
- Hafner, Armin; Jakobsen, Arne; Neksa, Petter; Pettersen, Jostein (2004): *Life Cycle Climate Performance (LCCP) of Mobile Air-Conditioning Systems with HFC-134a and R-744*. VDA Alternative Refrigerant Wintermeeting, 18.-19. Februar 2004, Saalfelden, Österreich.
- Hafner, Armin; Christensen, Øystein (2009): *Umkehrbare R744- (CO₂-) Klimaanlage für Schienenfahrzeuge*. Deutsche Kälte-Klima-Tagung, Berlin, November 2009.
- Hafner, Armin; Christensen, Øystein; Neksa, Petter (2010): *Reversible R744(CO₂) Heat Pumps applied in Public trains*. 9th IIR Gustav Lorentzen Conference, Sydney, Australia 2010.
- Harnisch, Jochen u. a. (2008): *Vergleichende Bewertung der Klimarelevanz von Kälteanlagen und -geräten für den Supermarkt*. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 206 44 300, Dessau-Roßlau:UBA.
- Harnisch, Jochen u. a. (2004): *Risiken und Nutzen von fluorierten Treibhausgasen in Techniken und Produkten – Bewertung technischer Fallbeispiele unter besonderer Berücksichtigung der stoffintrinsic Eigenschaften*. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 201 64 315, Berlin, Umweltbundesamt, Juni 2004.
- Harnisch, Jochen; Hendriks, Chris (2000): *Economic Evaluation of Emission Reductions of HFCs, PFCs and SF₆ in Europe*. Contribution to the study *Economic Evaluation of Sectoral Emission Reduction Objectives for Climate Change*. Studie im Auftrag der Europäischen Kommission, Generaldirektion Umwelt, Köln: Ecofys Energy and Environment.
- Hasse, Volkmar (GTZ) (2009): *R290 Air Conditioner*. Vortrag auf der 29. Konferenz der Arbeitsgruppe der Vertragsstaaten des Montreal-Protokoll, Juli 2009, Genf.
- Hautech - Hautech GmbH (2002): Stellungnahme zum Eckpunktepapier [EckpPapier 2002] vom 13. November 2002, unveröffentlicht.
- Hautech - Hautech GmbH (2003): Produktinformation, ausgehändigt auf der Messe „Solar Energy“, Berlin.
- HEA - Fachverband für Energie-Marketing und -Anwendung e.V. beim VDEW (2003): *Klimaschutzprogramm im Bereich der fluorierten Treibhausgase*. Gemeinsame Veranstaltung mit dem Bundesverband Wärmepumpen, 29. April 2003 in Berlin.

- Heberle, F.; Preißinger, M.; Brüggemann, D. (2009): *Konzepte zur effizienteren geothermischen Stromerzeugung auf Basis des Organic Rankine Cycle*. Beitrag "Der Geothermiekongress 2009" Bochum, Germany, 17-19 November 2009.
- Heckt, Roman (2004): *CO₂ Heat Pump- optimized for fuel economy - Assessment of Different Refrigerant Based Supplemental Heaters in Vehicle Testing*. VDA Winter Meeting, 18. Februar 2004, Saalfelden, Österreich. (<http://www.vda-wintermeeting.de>; 20.07.2010).
- Heinle, Dieter u. a. (2003): *Zuheizsysteme für effiziente Pkw-Motoren*. In: DKV-Tagungsbericht 2003, Bonn, Arbeitsabteilung III, 19.-21. November 2003, Stuttgart: DKV.
- Hesse, Ullrich u. a. (1992): *Ersatzstoffe für FCKW – Ersatzkältemittel und Ersatztechnologien in der Kältetechnik*. Ehningen bei Böbligen: expert.
- Holdack-Janssen, Hinrich (1996): *Zukünftige Kältemittel in Pkw-Klimaanlagen – CO₂ oder brennbare Stoffe*. In: Reichelt, Johannes (Hrsg.): *Fahrzeugklimatisierung mit natürlichen Kältemitteln*. Heidelberg: C.F. Müller.
- Honeywell (2003): Mündliche Mitteilung Herr Fink vom 28. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- Honeywell (2008): *Material Safety Data Sheet 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene, HFO-1234yf*. 10. November 2008.
- Huber, Karl (2003): *NH₃/DME = R 723*. In: Die Kälte & Klimatechnik KK, 56 (6) 38-45, Stuttgart: Gentner.
- Hurley, M.D., Wallington, T.J., Javadi, M.S., Nielsen, O.J. (2008): *Atmospheric Chemistry of CF₃CF=CH₂: Products and mechanisms of Cl atom and OH radical initiated oxidation*. Chemical Physics Letters 450, S. 263-267.
- Hydrocarbons21 (2010): *Philippines urge car owners to shift to ozone friendly refrigerants*; <http://www.hydrocarbons21.com/content/articles/2010-02-12-philippines-urge-car-owners-to-shift-to-ozone-friendly-refrigerants.php>; 12.08.2010).
- Hydrocarbons21 (2010): *ARBS going beyond R410a for AC*. In: <http://www.hydrocarbons21.com/content/articles/2010-04-21-arbs-2010-going-beyond-r410a-for-ac.php>; 12.08.2010).
- IAA Nutzfahrzeuge (2010): *Innovative trailer refrigeration unit using CO₂ refrigerant* (<http://www.r744.com/articles/2010-09-28-innovative-trailer-refrigeration-unit-using-co2-refrigerant.php>, 28.09.2010).
- IEC - IEC 60335-2-89 (2003): *Elektrische Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke – Sicherheit*. In: DIN-Mitteilungen 2003 (9) 15.

- IfT - Institut für Thermodynamik der Technischen Universität Braunschweig (2003): Internet-Information zum Projekt: *CO₂-Wärmepumpe zur Brauchwassererwärmung*.
- ILK - Institut für Luft- und Kältetechnik (2003a): Mündliche Mitteilung Herr Eberhard Wobst vom 29. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- ILK - Institut für Luft- und Kältetechnik (2003b): *Klima- und Prozess-Kälteanlagen mit Wasser als Kältemittel*. Seminar am 1.4.2003, Essen.
- ILK – Institut für Luft- und Kältetechnik (2010): Information des ILK (www.ilkdresden.de; 22.01.2010).
- Integral - Integral-Energietechnik GmbH (2000): Persönliche Mitteilung Herr Malter vom 3. Juli 2000.
- Integral - Integral-Energietechnik GmbH, Flensburg (2003): Firmeninformation. Jacob (2002): *Solar betriebene Diffusions-Absorptionskältemaschinen*. Fachhochschule Stuttgart, (www.fht-stuttgart.de; 14.7.2003).
- Ixetic (2010): *Höhere Reichweite für E- Fahrzeuge durch unser innovatives Heiz-/Kühl-Modul*. IAA Nutzfahrzeuge, 23.-30. September 2010, Hannover.
- Jakob, Uli (2009): *Solar Cooling Kits für die Gebäudeklimatisierung*. Vortrag auf der Fachtagung thermische Solarenergie zur Klimatisierung von Gebäuden, Hannover – IG BCE, 27. Januar 2009.
- Jungnickel, Heinz; Agsten, Rainer; Kraus, Wolf E. (1990): *Grundlagen der Kältetechnik*. Berlin: Verlag Technik.
- Kajihara, Hideo; Kazuya, Inoue; Kikuo, Yoshida;; Ryuichi, Nagaosa (2010): *Estimation of environmental concentrations and deposition fluxes of R-1234-YF and its decomposition products emitted from air conditioning equipment to atmosphere*. 2010 International Symposium on Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Technology, 17 – 19 February 2010, Tokyo, Japan.
- Kauffeld, Michael (2007): „Trends und Perspektiven für Supermarkt-Kälteanlagen“. KI Kälte _ Luft _ Klimatechnik, April 2008.
- Kauffeld, Michael; Christensen, Kim G. (1998): *REEFER 2000: Ein Container-Konzept mit CO₂ als Kältemittel*. In: KI Luft- und Kältetechnik, 34 (11) 535-539, Heidelberg: C. F. Müller, Hüthig GmbH.
- Kauffeld, Michael; Christensen, Kim G. (2001): *CO₂ und Propan im Supermarkt*. In: Die Kälte & Klimatechnik KK, 54 (1), Stuttgart: Gentner.
- Kaut/Sanyo (2008): *ECO-Wärmepumpe*. Produktinformation, Oktober 2008 (http://www.heizwaermepumpe.de/co2/dokumentation_waermepumpe/co2.pdf, 17.06.2010).

- KBA - Kraftfahrt-Bundesamt (2009): *Statistische Mitteilungen, Fahrzeugzulassungen; Bestand; Fahrzeugklassen und Aufbauarten am 1. Januar 2007*. (http://www.kbashop.de/wcsstore/KBA/Attachment/Kostenlose_Produnkte/b_fzklasse_n_2007.pdf; 28.10.2009).
- KI (2008 b): *Modernste Klimatechnik für „absolut angenehmes Einkaufserlebnis“*. In: KI Kälte -, Luft- und Klimatechnik, 2008 (7/8) 14-15, Heidelberg: Hüthig GmbH.
- KI (2008c): *Umweltfreundlich und Energiesparend*. In: KI Kälte-, Luft-, Klimatechnik, 2008 (7/8) 43, Heidelberg: Hüthig GmbH.
- KI (2008a): *Kaltwassersätze*. In: KI Kälte -, Luft- und Klimatechnik, 2008 (4) 36-39, Heidelberg: Hüthig GmbH.
- Kirsamer, Jörg (1999): Persönliche Mitteilung 5.3./5.7.1999. (Neoplan Gottlob Auwärter) Stuttgart.
- KK - Die Kälte & Klimatechnik (2000): *Anmerkungen des redaktionellen Bearbeiters zur Analyse des Autors* [Lindborg 2000]. In: KK - Die Kälte & Klimatechnik 53 (9) 53-54, Stuttgart: Gentner.
- KK - Die Kälte & Klimatechnik (2005): *„Erste CO₂-Kälteanlage für Normal- und Tiefkühlung in einem Schweizer Hypermarkt“*. In: KK - Die Kälte & Klimatechnik 58(2), 41, Stuttgart: Gentner.
- KK - Die Kälte & Klimatechnik (2006b): *CO₂-Kompressionskälteanlagen in der Industriekälte*. In: Die Kälte & Klimatechnik, KK 59 (7) 34-36, Stuttgart: Gentner.
- KK - Die Kälte & Klimatechnik (2008a): *Chillventa Messebericht*. In: Die Kälte & Klimatechnik KK, 61 (12) 19, Stuttgart: Gentner.
- KK - Die Kälte & Klimatechnik (2008b): *Viele kleine Neuerungen sind auch ein großer Fortschritt. Ausgewählte Fachvorträge von der Deutschen Kälte-Klima-Tagung 2007*. In: Die Kälte & Klimatechnik KK, 61 (1) 38-43, Stuttgart: Gentner.
- KK - Die Kälte & Klimatechnik (2009): *Wärmepumpen Top, Klimageräte Flop*. In: Die Kälte & Klimatechnik KK, 62 (1) 14, Stuttgart: Gentner.
- KK - Die Kälte & Klimatechnik (2009a): *Bundesumweltministerium unterstützt Energiesparende Kälteanlagen - Südbayerische Fleischwaren stellen um auf natürliches R 723*. In: Die Kälte & Klimatechnik KK, 62 (10) 26-28, Stuttgart: Gentner.
- KK - Die Kälte & Klimatechnik (2009b): *Märkte für die Kältetechnik: Lebensmittelverarbeitung*. In: Die Kälte & Klimatechnik KK, 62 (10) 22-23, Stuttgart: Gentner.

- KKW, HEA - Kälte-Klima-Wärmeanlagen GmbH / Fachverband für Energie-Marketing und -Anwendung e.V. beim VDEW (2003): Mündliche Mitteilung Herr René Seeliger vom 29. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- Klima:aktiv - Klima:aktiv Wärmepumpe, Österreichisches Forschungs- und Prüfzentrum Arsenal GmbH (2007): *Langzeituntersuchung der Wärmepumpenheizungsanlage Ohlsdorf*. (www.klimaaktiv.at/filemanager/download/35133/; 10.11.2009).
- KOM – Europäische Kommission (2006): *Verordnung (EG) Nr. 842/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über bestimmte fluorierte Treibhausgase*. ABl. EG Nr. L161/1 vom 14.6.2006.
- KOM - Europäische Kommission (2006a): *Richtlinie 2006/40/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Emissionen aus Klimaanlage in Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG des Rates*. ABl. EG Nr. L161/12 vom 14.6.2006.
- Konvekta - Konvekta AG (2002): Sonnekalb u. a.: *Entwicklung und Test einer Kohlendioxid-Transportkälteanlage mittlerer Leistungsklasse unter besonderer Berücksichtigung des Verdichterkonzeptes*. Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Braunschweig.
- Konvekta - Konvekta AG (2003): Mündliche Mitteilung Herr Michael Sonnekalb vom 30. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- Konvekta (2010): Persönliche Auskunft der Fa. KONVEKTA AG, Schwalmstadt im Mai und September 2010.
- Kosowski, Kai; Tegethoff, Wilhelm, Köhler, Jürgen (2008): *Wärmepumpe für hochwärmegeämmte Wohngebäude*. In: KI Kälte-, Luft- und Klimatechnik 2008 (1/2) 28-33, Heidelberg: S. Buckley, Hüthig GmbH.
- Kruse, Horst; Heidelck, Rudolf (2002): *Heizen mit Wärmepumpen*. BINE- Informationspaket, 3. Auflage, Köln: TÜV-Rheinland.
- Laue, Hans J. (1999): *Status und Trend der Wärmepumpennutzung in Deutschland*. IZW e.V. - Informationszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik, Vortrag vom 12. Oktober 1999.
- Laue, Hans J. (2000): *Die zunehmende Bedeutung der Wärmepumpe zur Energieeinsparung und Minderung der CO₂-Emissionen*. IZW e.V., Karlsruhe.
- Lidl (2010): *ECO2LOGISCH. Die neue Filialgeneration von Lidl. Hoher Standard: Lidl setzt künftig bei allen neuen Märkten auf Nachhaltigkeit*. (<http://www.lidl.de>; 14.7.2010).

- Liebherr-Transportation Systems GmbH & Co KG (2010): *Next Generation of Air Cycle Air Conditioning - Air Cycle HVAC Presentation*. InnoTrans, 23. September 2010, Berlin.
- Lim, Hong-Young; Jeon, Young-Ha; Park, Chang Ho; Jee, Yong Jun (2009): *Vehicle air conditioning system employing tube-fin-type evaporator using HFO 1234yf material refrigerant*. Halla Climate Control Corporation, Korea, Europäisches Patentamt, Anmeldenr. 09762669.1, Anmeldetag 10.06.2009, (<https://register.epoline.org/espacenet/regviewer?AP=09762669&CY=EP&LG=en&DB=REG>, 24.07.2010).
- Lindborg, Anders (2000): *Energieverbrauch bei direkter und indirekter Kühlung mit Ammoniak*. In: Die Kälte & Klimatechnik KK, 53 (9) 50-54, Stuttgart: Gentner.
- Lindborg, Anders (2003): Mündliche Mitteilung Herr Anders Lindborg vom 20. November 2003, Bonn.
- Linde - Linde AG (2003): Mündliche Mitteilung Herr Siegfried Haaf vom 29. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- Löffler, Michael (2008): *Zwischenspeicher für Wärmepumpen mit zyklischer Entleerung in ein Hauptsystem*. In: KI Kälte-, Luft- und Klimatechnik 2008 (12), 22-25, Heidelberg: S. Buckley, Hüthig GmbH.
- Low, Robert. E.; Schwennesen, Karsten (2009): *Minderung des Einflusses von Klimaanlage auf die Umwelt –Perspektiven von INEOS Fluor*. Deutsche Kälte- und Klima-Tagung des DKV, 19.-20. November 2009, Berlin: DKV.
- Low, Robert E: (2009) *Update on INEOS Fluor Refrigerant Development Program*. VDA Winter Meeting 2009, 11.-12. Februar 2009, Saalfelden, Österreich, (<http://www.vda-wintermeeting.de/Presentations.24.0.htm>; 2.07.2010).
- Luecken, Deborah; Waterland, Robert L.; Papasavva, Stella; Taddonio, Kristen; Hutzell, William T.; Rugh, John P.; Andersen, Stephen O. (2010): *Ozone and TFA Impacts in North America from Degradation of 2,3,3,3-Tetrafluoropropene (HFO-1234yf), A Potential Greenhouse Gas Replacement*, Environmental Science & Technology Vol. 44 (1) 343-348.
- Lund, Thomas (2003): *Introducing a New Ammonia/CO₂ Cascade Concept for Large Fishing Vessels*. Vortrag auf der DKV-Tagung, 19.-21. November 2003, Bonn: DKV.
- MacLaine-cross, Ian (2004): *Usage and Risk of Hydrocarbon Refrigerants in Motor Cars for Australia and the United States*. International Journal of Refrigeration, Volume 27, Issue 4, June 2004, S. 339-345.

- Mager, Robert (2003): *New Technology: CO₂ (R 744) as an Alternative Refrigerant*. Presentation at stakeholder conference on "Options to Reduce Greenhouse Gas Emissions due to Mobile Air Conditioning". Organised by the European Commission and the US Environmental Protection Agency on 10.-11. February 2003 in Brüssel, Belgien: COM (http://ec.europa.eu/environment/archives/mac2003/programme_presentations.htm; 4.01.2010).
- Mager, Robert (2005): *Adaption of HFC-152a for a MAC System in a Passenger Vehicle*. VDA Alternative Refrigerant Wintermeeting, 23.- 24. Februar 2005, Saalfelden, Österreich, (<http://www.vda-wintermeeting.de/Archiv.26.0.html>; 20.07.2010).
- March - March Consulting Group (1998): *Opportunities to Minimise Emissions of Hydrofluorocarbons (HFCs) from the European Union*. Final Report, UK.
- MARPOL - MARPOL-Übereinkommen (1997): *Internationales Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe*. 1973, mehrfach geändert und ergänzt, u. a. durch das Protokoll von 1997 zur Annahme der Anlage VI: Regeln zur Verhütung der Luftverunreinigung durch Seeschiffe, (http://www.imo.org/Conventions/contents.asp?doc_id=678&topic_id=258#29; 30.08.2010).
- Mayer, Helmut (1997): *Technischer Stand der Busklimatisierung*. In: Deutsche Kälte-Klima-Tagung 1997, Hamburg – Radisson SAS Hotel, 19.-21. November 1997, Kurzfassung der Vorträge, (www.fh-offenburg.de/mv/DKV1997.pdf; 4.01.2010).
- Mayer, Helmut (1998): *Technischer Stand der Busklimatisierung*. In: Ki Luft- und Kältetechnik 1998 (4) 190-192, Heidelberg: C. F. Müller, Hüthig GmbH.
- McDonald's - McDonald's Corporation (2003): *McDonald's Denmark Opens World's First HFC-Free Restaurant*. Pressemitteilung von McDonald's vom 16. Januar 2003, http://www.csrwire.com/press/press_release/25181-McDonald-s-Denmark-Opens-World-s-First-HFC-Free-Restaurant; 4.01.2010).
- Meurer, Christoph; Schwarz, Winfried (2002): *Ökologische Terrainsondierung der Kühltette Fisch*. Vortrag auf der DKV-Tagung, 20.-22. November 2002, Magdeburg: DKV.
- Montrealer Protokoll (2000): *The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer as either adjusted and/or amended in London 1990, Copenhagen 1992, Vienna 1995, Montreal 1997, Beijing 1999*. Nairobi: UNEP, (www.unep.org/ozone/pdf/Montreal-Protocol2000.pdf ; 4.01.2010).
- Morgenstern, Jens; Ebinger, Ingwer (2008): *Anforderungen an zukünftige Klimaanlage für Schienenfahrzeuge*. Der Eisenbahningenieur, Dezember 2008, Seite 24-31.

- Morgenstern, Stefan (2008): *R744 MAC Status and System Standardisation*. VDA Alternative Refrigerant Wintermeeting, 13.- 14. Februar 2008 Saalfelden, Österreich, (<http://www.vda-wintermeeting.de/Archiv.26.0.html>; 20.07.2010).
- Morhart, Alexander (2009): *Die Arbeitszahl zählt*. In: Sonne, Wind & Wärme, 2009 (1) 22-25, Bielefeld: Bielefeld Verlag GmbH & Co. KG.
- MS-L – MS Laborgeräte GmbH (2010): Internetinformation, (http://www.laborkuehlschrank.de/default.asp?info_id=show_feed&target=1190729057; 28.01.2010).
- Nair, Haridasan; Mukhopadhyay, Sudip; Van der Puy, Michael (2008): *Direkte Umwandlung eine HCFC 225ca/cb- Mischung in HFC 245cb und HFC 1234yf*. Europäisches Patentamt, Prüfungsantrag gestellt am 02.05.2008. (<https://register.epoline.org/espacenet/regviewer?AP=06849866&CY=EP&LG=en&DB=REG>; 24.07.2010).
- Nekså, Petter; Hafner, Armin; Wolf, Frank; Lien Kjerstin; Obrist Frank (2007): *R744 the Global Solutions Advantages & Possibilities*. VDA Alternative Refrigerant Wintermeeting, 14.-15. Februar 2007, Saalfelden, Österreich, (<http://www.vda-wintermeeting.de/Archiv.26.0.html>; 20.07.2010).
- Nielsen, O.J.; Javadi, M.S; Sulbaek Andersen,M.P ; Hurley, M.D.;T.J. Wallington, T.J.; Singh,R. (2007): *Atmospheric Chemistry of CF₃CF=CH₂: Kinetics and mechanisms of gas-phase reactions with Cl atoms, OH radicals, and O₃*, Chemical Physics Letters 439, S.18-22.
- Nonnenmann, Manfred (1995): *Klimarelevanz von Fahrzeugklimaanlagen (Climate Impacts of Automotive Air-Conditioners)*. Behr Automobiltechnik, in: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, 97. Jg., 95 (4).
- Öko-Recherche (2003): Mündliche Mitteilung Herr Winfried Schwarz vom 30. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- Palm, Björn (2008): *Ammonia as refrigerant in small-capacity systems*. In: IEA Heat Pump Centre Newsletter, 26 (4) 23-31, Borås, Schweden: SP Technical Research Institute of Sweden. (www.heatpumpcentre.org/default.asp; 23.2.2009).
- Papadimitrou, V.C. u.a. (2008): *CF₃CF=CH₂ and Z-CF₃CF=CHF: Temperature dependent OH rate coefficients and global warming potentials*. Phys. Chem. Chem. Phys. Vol 10, S. 808-820.
- Parsch, Willi (2007): *ixetic- Precision to move*. VDA Alternative Refrigerant Wintermeeting, 14.-15. Februar 2007, Saalfelden, Österreich, (<http://www.vda-wintermeeting.de/Archiv.26.0.html>; 20.07.2010).

- Parsch, Willi; Brunsch, Bernd (2002): *Der CO₂-Kompressor. Neue Technologie für kühle Köpfe und warme Füße*. 7. LuK Kolloquium, 11.-12. April 2002.
- Patente (2010): Patente zu HFKW-1234yf zu finden unter (<http://www.faqs.org/patents>; Suche nach Stichwort „1234yf“).
- Peilnsteiner, Jan; Truszkiewitz, Günter (2002): *Handbuch temperaturgeführte Logistik*. Hamburg: Behr.
- Petitjean, Christophe; Benouali, Jugurtha (2010): *R-1234yf Validation and A/C System Energy Efficiency Improvements*. SAE – Automotive Refrigerant and System Efficiency Symposium, 13-15. Juli 2010, Scottsdale, Arizona, USA.
- Presetschnik, Andreas (2008): *CO₂ als Kältemittel für Klimaanlage im Bereich Schienenfahrzeuge*. Experten- und Vernetzungsworkshop: ISB – Innovatives System Bahn, Experten- und Vernetzungsworkshop, Wien, Österreich, 15.-16. April 2008. (<http://www.bmvit.gv.at/innovation/verkehrstechnologie/isbworkshop/liebherr.pdf>; 3.09.2010).
- Presetschnik, Andreas (2010): Mündliche Auskunft zum aktuellen Stand der Erprobung von CO₂-Klimaanlagen für Schienenfahrzeuge bei der Fa. Liebherr am 13.09.2010.
- Presotto, Alexandre; Süffert, Carlos G.; Hillers, Frank (2001): *Einsatz von Ammoniak in Supermarkt-Kälteanlagen*. In: Die Kälte & Klimatechnik KK, 54 (10) 12-22, Stuttgart: Gentner.
- Presseportal (2009): *ALDI SÜD stattet neue Märkte in Deutschland mit CO₂OLtec(TM)-Kälteanlagen von Carrier aus*. (www.presseportal.de; 08.12.2009).
- R 744 (2009): *Advansor adds compSUPER Type B and compSUPER AC*. In: R744.com. (www.r744.com/article.view.php?Id=783; 17.06.2010).
- Rached, Wissam (2010): *Composition Including 2,3,3,3-Tetrafluorpropene, Method for Heating and/or Air Conditioneing a Vehicle*. Arkema France, Europäisches Patentamt, Anmeldenummer 09795461. (<https://register.epoline.org/espacenet/regviewer?AP=09795461&CY=EP&LG=en&DB=REG>; 23.07.2010).
- Reichelt, Johannes (2000): *Wo steht die Kältetechnik in Deutschland und weltweit?* KK - Die Kälte & Klimatechnik KK-53 (10).
- Reiner, G. (2003): *Kältemittelauswahl*. Sulzer Friothers AG, Systemengineering, Rothenburg/Winterthur. (www.fws.ch/dateien/Kaeltemittelauswahl.pdf, 20.8.2003).
- Rhodia - Rhodia Europe (2000): Mündliche Mitteilung Frau Andrea Voigt vom 28. September 2000.

- Riegel, Harald (2007): *Status of R744 Development*. VDA Alternative Refrigerant Wintermeeting, 14.- 15. Februar 2007, Saalfelden, Österreich, (<http://www.vda-wintermeeting.de/Archiv.26.0.html>; 20.07.2010).
- Rindsfüßer, Martin (2008) *Konzeptuntersuchung CO₂-Citysphere, Möglichkeiten der Verwendung von R744 in Stadtbusklimaanlagen*. Deutsche Kälte-Klima-Tagung, November, Ulm: DKV.
- Roth, Rüdiger; König, Holger (2002): *Wirtschaftlichkeitsanalyse für Industrie-Kälteanlagen mit CO₂ als Tieftemperaturkältemittel*. In: KI Luft- und Kältetechnik, 38 (7) 333ff., Heidelberg: C. F. Müller, Hüthig GmbH.
- SAE -SAE, EPA, MACS (2001): *The Importance of Motor Vehicle Air Conditioning in Climate Protection*. (www.epa.gov/appdstar/pdf/maccppfinal.pdf; 4.01.2010).
- SAE-Society of Automotive Engineers (2009) *SAE CRP (Cooperative Research Programs) 1234: Industry Evaluation of low global warming potential refrigerant HFO-1234yf*. 10. November 2009. (<http://www.sae.org/standardsdev/tsb/cooperative/crp1234-3.pdf>; 3.07.2010).
- Schnee- und Eistechnik - Schnee- und Eistechnik GmbH (2009): *SnowBOX – Schneeproduktionssystem bis +35 °C Außentemperatur*. Firmenbroschüre.
- Schölkopf, Wolfgang u. a. (2008): *Solare Klimatisierung – Techniken und Energiemanagement*. FVEE Themen 2008.
- Schwarz, Winfried (2001): *Emissionen des Kältemittels R 134a aus mobilen Klimaanlagen. Jährliche Emissionsraten von bis zu sieben Jahre alten Pkw-Klimaanlagen*. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 360 09 006, Berlin: UBA, (<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2082.pdf>; 21.06.2010).
- Schwarz, Winfried (2003a): *Emissionen und Emissionsprognose von H-FKW, FKW und SF₆ in Deutschland. Aktueller Stand und Entwicklung eines Systems zur jährlichen Ermittlung. Emissionsdaten bis zum Jahr 2001 und Emissionsprognosen für die Jahre 2005, 2010 und 2020*. erstellt im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 202 41 356, 31.07.2005. (<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3000.pdf>; 4.01.2010).
- Schwarz, Winfried (2003b): *Persönliche Mitteilungen Herr Winfried Schwarz im Zeitraum 5. September bis 24. November 2003*.
- Schwarz, Winfried (2004): *Emissionen, Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren von fluorierten Treibhausgasen (F-Gase) in Deutschland für die Jahre 1995-1998. Anpassung an die Anforderungen der internationalen Berichterstattung und Implementierung der Daten in das zentrale System Emissionen (ZSE)*. Studie im

Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 201 41 261/01, Frankfurt/Main: Öko-Recherche.

Schwarz, Winfried (2005): *Emissionen, Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren von fluorierten Treibhausgasen (F-Gasen) in Deutschland für die Jahre 1995-2002*. Forschungsvorhaben, erstellt im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 201 41 261/01, UBA-Texte 14/05. Berlin: UBA. (www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2902.pdf; 14.8.08).

Schwarz, Winfried (2007a): *Establishment of Leakage Rates of Mobile Air Conditioners in Heavy Duty Vehicles, Part 1, Trucks*, prepared for the European Commission, Öko-Recherche, 27.01.2007, (http://ec.europa.eu/clima/documentation/f-gas/docs/3_study_leakage_rates_trucks.pdf; 28.08.2010).

Schwarz, Winfried (2007b): *Establishment of Leakage Rates of Mobile Air Conditioners in Heavy Duty Vehicles, Part 2, Buses and Coaches*, prepared for the European Commission, Öko-Recherche, 31. Januar 2007. (http://ec.europa.eu/clima/documentation/f-gas/docs/4_study_leakage_rates_buses.pdf; 28.08.2010).

Schwarz, Winfried (2009): Persönliche Mitteilungen Herr Winfried Schwarz vom 4. Februar 2009.

Schwarz, Winfried (2009a): *Emissionen fluoriertener Treibhausgase in Deutschland 2006 und 2007 – Inventarermittlung 2006/2007 (F-Gase). Daten von HFKW, FKW und SF₆ für die nationale Berichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für die Berichtsjahre 2006 und 2007 sowie Prüfung der Datenermittlung über externe Datenbanken*. Förderkennzeichen 3707 42 300, Dessau-Rosslau: Umweltbundesamt Texte Nr. 22/2009. (http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3833).

Schwarz, Winfried (2010): *Emissionen fluoriertener Treibhausgase in Deutschland 2008*. Umweltbundesamt, Texte 41/2010.

Schwarz, Winfried (2010a). Persönliche Auskunft an UBA im Mai und Juni 2010.

Schwarz, Winfried (Öko-Recherche); Rhiemeier, Jan- Martin (Ecofys) (2007): *The Analysis of the Emissions of Fluorinated Greenhouse Gases from Refrigeration and Air Conditioning Equipment Used in the Transport Sector other than Road Transport and Options for Reducing these Emissions: Maritime, Rail, and Aircraft Sector*. prepared for the European Commission, 2. November 2007, (http://ec.europa.eu/clima/documentation/f-gas/docs/2_maritime_rail_aircraft.pdf; 28.08.2010).

- Schwarz, Winfried, Gschrey, Barbara (2010): *Erstellung von Projektionen zu den Emissionen von HFKW, FKW und SF₆ für Deutschland bis zum Jahr 2050*. Förderkennzeichen 3708 42 311, Dessau-Roßlau: UBA. (<http://www.umweltbundesamt.de/produkte/fckw/emissionen.htm>; 15.09.2010).
- Schwarz, Winfried; Leisewitz, André (1998): *R 12-Ersatz bei Altanlagen von 1996 bis Mitte 1998*. Ermittlung des Sachstandes bei der Umrüstung bestehender R 12-haltiger Kälte-, Klima- und Wärmepumpen-Anlagen. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes. Förderkennzeichen 360 09 003, Frankfurt/Main: Öko-Recherche.
- Schwarz, Winfried; Leisewitz, André (1999): *Emissionen und Minderungspotential von HFKW, FKW und SF₆ in Deutschland*. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 298 41 256, Frankfurt/Main: Öko-Recherche. (http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=2483; 26.03.10).
- Seeton, Christopher (2010): *Countdown to R1234yf. Industry Preparation Refrigerant and System Efficiency Symposium*, 13-15. Juli 2010, Scottsdale, Arizona, USA.
- Selmer, Kai (York Flensburg) (2001): *Ammoniak und CO₂ im Tiefkühlager*. Vortrag auf der DKV-Tagung, 22.-23. November 2001, Ulm.
- Siemens (2009): *Pictures of the Future – die Zeitschrift für Forschung und Innovation*, Frühjahr 2009: *Das Wunder im Waschkeller*, (http://www.siemens.com/innovation/pool/de/Publikationen/Zeitschriften_pof/pof_fruuehjahr_2009/pof-1-2009-d-doppel.pdf).
- Sienel, T.; Finckh, O. (2007): *CO₂-DX Systems for medium- and low-temperature refrigeration in supermarket applications*. IIR 22nd International Congress of Refrigeration, 21. – 26. August 2007, Beijing, China.
- Sonnekalb, Michael (2002): *Einsatz von Kohlendioxid als Kältemittel in Busklimaanlagen und Transportkälteanlagen, Messungen und Simulation*. Dissertation. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.
- Sonnekalb, Michael (2003): Persönliche Mitteilung vom 24. November 2003.
- Sonnekalb, Michael; Försterling, Sven; Tegethoff, Wilhelm (2009): *CO₂ Air Conditioning and Heating applied to city buses (COACH)*. VDA-Wintermeeting, Saalfelden, 12. Februar 2009. (http://www.vda-wintermeeting.de/fileadmin/downloads/presentations/KONVEKTA_M.Sonnekalb_VDA%20Winter%20Meeting%202009.pdf; 7.06.2010).
- Sorg, Walter (2009): *Entwicklungsperspektiven im Kältemittelbereich (2)*, Deutsche Kälte-Klima-Tagung des DKV, 19.-20. November 2009, Berlin.

- Sortech - SorTech AG (2009): Produktinformation im Internet. (www.sortech.com; 9.12.2009).
- Spatz, Marc W. (2009): *HFO-1234yf Technology Update – Part II*. VDA-Wintermeeting, 12. Februar 2009, Saalfelden, Österreich, (<http://www.vda-wintermeeting.de>; 22.07.2010).
- Stiebel Eltron - Stiebel Eltron GmbH & Co. KG (2003): Mündliche Mitteilung Herr Kai Schiefelbein vom 28. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003], (www.stiebel-eltron.de; 10.7.2003).
- Stiebel Eltron - Stiebel Eltron GmbH & Co. KG (2009): Produktinformation Brauchwasserwärmepumpe LWA 100, (www.stiebel-eltron.de/erneuerbare-energien/produkte/lueftung/lueftungsgeraete-mit-warmwasser-waermepumpe/lwa-100; 12.2.2009).
- Süß, Jürgen (2003): *Miniaturisierung von Verdichtern für transkritische CO₂-Anlagen*. In: KI Luft- und Kältetechnik, 39 (6), Heidelberg: C. F. Müller, Hüthig GmbH.
- Test (2008): *Die Klimamacher*. In: test, 2008 (6), 64-68, Berlin: Stiftung Warentest.
- Thermea - thermea Energiesysteme GmbH (2009): Informationen im Internet. (www.thermea.de/broschuere.php; 17.02.2009).
- Thermo King (2003a): Mündliche Mitteilung Herr Rüdiger Jehle vom 30. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- Thermo King (2003b): Firmen- und Produktinformation im Internet. (<http://www.thermoking.com/thermoking/cryogenics.asp>; 26.03.2010).
- Thermo King (2003c): Persönliche Mitteilung Herr Bernd Grünewald vom 12. September 2003.
- Tillner-Roth, R. (2008): *Zukunftsweisende Kältemittel – Lösungen für den LEH*. In: Kälte Klima Aktuell 27 (1) 26 – 28.
- Tuazon, Ernesto C.; Atkinson, Roger (1993): *Tropospheric Degradation Products of CH₂FCF₃ 3 (HFC-134a)*. Journal of Atmospheric Chemistry 16 (4), S. 301-312.
- TÜV Süd - Technischer Überwachungsverein Süddeutschland (2003a): Mündliche Mitteilung Herr Peter Wohlmuth vom 28. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- TÜV Süd - Technischer Überwachungsverein Süddeutschland (2003b): Mündliche Mitteilung Herr Bernhard Schrempf vom 30. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- UBA - Umweltbundesamt (1989): *Verzicht aus Verantwortung: Maßnahmen zur Rettung der Ozonschicht*. UBA-Bericht 7/89, Berlin: Erich-Schmidt.

- UBA - Umweltbundesamt (2008): *Elektrische Wärmepumpen – eine erneuerbare Energie? Wie ist die Umweltbilanz elektrischer Wärmepumpen im Vergleich zu anderen Heizungssystemen?* Dessau UBA. (<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3192.pdf>; 17.2.2009).
- UBA - Umweltbundesamt (2008), *Natürliches Kältemittel für Pkw-Klimaanlagen*. Presse-Information 043/2008, Dessau-Roßlau, 09. Juni 2008. (<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/d-pinfo08.htm>; 5.07.2010).
- UBA - Umweltbundesamt (2009): *Umweltfreundlichere Autoklimaanlagen müssen jetzt kommen*, Presse-Information 013/2009, Dessau-Roßlau, 05. März 2009, (<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/d-pinfo09.htm>; 5.07.2010).
- UBA - Umweltbundesamt (2010a): *Sicherheitsrisiken bei Pkw-Klimaanlagen nicht auszuschließen?*. Presse-Information 006/2010, Dessau-Roßlau, 12. Februar 2010. (<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/d-pinfo10.htm>; 5.07.2010).
- UBA - Umweltbundesamt (2010b): *Umweltbundesamt für Kohlendioxid in Klimaanlagen - Tetrafluorpropen ist klima- und umweltschädlicher*. Presse-Information 43/2010, Dessau-Roßlau, 26. August 2010. (http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/2010/pd10-043_umweltbundesamt_fuer_kohlendioxid_in_klimaanlagen.htm; 27.08.2010).
- UNEP - United Nations Environment Programme (2003): *Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee (TOC), 2002 Assessment*. Nairobi: Ozone Secretariat.
- UNEP - United Nations Environment Programme (2006): *Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee (RTOC), 2006 Assessment*, Nairobi: Ozone Secretariat, Januar 2007. (http://ozone.unep.org/teap/Reports/RTOC/rtoc_assessment_report06.pdf; 29.7.2008).
- UNEP - United Nations Environment Programme (2009): *Assessment of Alternatives to HCFCs and HFCs and update of the TEAP 2005 Supplement Report Data*. Report of the Technology and Economic Assessment Panel, Task Force Decision XX/8: Nairobi: Ozone Secretariat.
- UNEP - United Nations Environment Programme (2010): *TEAP 2010 Progress Report Volume 1: Assessment of HCFCs and environmentally sound alternatives*. Report of the Technology and Economic Assessment Panel, Task Force Decision XIX/8 and XXI/9: Nairobi: Ozone Secretariat, Mai 2010.
- UNEP - United Nations Environment Programme (2010) *TEAP 2010 Progress Report: Volume 1: Assessment of HCFCs and Environmentally Sound Alternatives, Scoping*

Study on Alternatives to HCFC refrigerants under high ambient Temperature conditions, UNEP, Technology and Economic Assessment Panel, Mai 2010.

Unilever (2010): R. van Gerwen, J. Krieg, *Refrigeration and Unilever*, New Food 2010, Issue 1, 42-45. (http://www.unilever.com/images/sd_nf110_42-45_tcm13-213566.pdf; 14.7.2010).

UZ 110 - Umweltzeichen (2002): *Umweltschonender Schiffsbetrieb*. Vergabegrundlage zum RAL-UZ 110. (http://www.blauer-engel.de/de/produkte_marken/uebersicht_vergabegrundlagen.php; 26.03.2010, UZ 110 in Überarbeitung).

UZ 141 - Umweltzeichen (2009) *Umweltfreundliches Schiffsdesign*. Vergabegrundlage zum RAL-UZ 141. (http://www.blauer-engel.de/de/produkte_marken/uebersicht_vergabegrundlagen.php; 26.03.2010).

Vaillant (2010) - *Zeolith-Gas-Wärmepumpe zeoTherm im System*. Produktinformation vom 19.07.2010, (<http://www.vaillant.de/Warum-Vaillant/Forschung-Entwicklung/Zeolith-Heizgeraet>).

VDA - Verband der Automobilindustrie (2004): *VDA Alternative Refrigerant Wintermeeting*. 18.-19. Februar 2004, Saalfelden, Österreich.

VDKL - Verband Deutscher Kühlhäuser und Kühllogistikunternehmen e.V. (2003): Mündliche Mitteilung Herr Jan Peilnsteiner vom 28. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].

VDKL - Verband Deutscher Kühlhäuser und Kühllogistikunternehmen e.V. (2009): *Jahresbericht 2008/2009*. Bonn.

VDKL - Verband Deutscher Kühlhäuser und Kühllogistikunternehmen e.V. (2009a): *Leitfaden für eine Verbesserung der Energieeffizienz in Kühlhäusern*. Bonn.

VDKL - Verband Deutscher Kühlhäuser und Kühllogistikunternehmen e.V. (2010): Persönliche Mitteilung Herr Peilnsteiner vom 03. Februar 2010.

VDMA - Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (2005): *Kältemaschinen und -anlagen - Dichtheit von Kälteanlagen und Wärmepumpen - Lecksuche / Dichtheitsprüfung - Teil 1: Grundsätze*. VDMA-Einheitsblatt 24243-1 vom August 2005. VDMA: Frankfurt/Main.

VDMA - Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (2009): *Energieeffizienz von Kälteanlagen Teil 3: Leitfaden für eine Verbesserung der Energieeffizienz in Kühlhäusern*. Entwurf zum VDMA-Einheitsblatt 24247-3 vom Dezember 2009, VDMA: Frankfurt/Main.

VDR - Verband Deutscher Reeder (2003): Mündliche Mitteilung Herr Schöler vom 30. Januar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].

- WAECO - WAECO International GmbH (2000): *Fahrzeugklimatisierung - Technische Grundlagen*. Emsdetten: WAECO.
- Wang, Haiyou; Tung, Hsueh Sung; Singh, Rajiv R; Shankland, Ian (2009): *Verfahren zur Herstellung von 2,3,3,3-Tetrafluorprope*. Patentanmeldung von Honeywell vom 31.07.2009 beim Europäischen Patentamt.
(<https://register.epoline.org/espacenet/regviewer?AP=09166994&CY=EP&LG=en&DB=REG>; 23.07.2010).
- Weisshaar GmbH & Co. KG (2009): *Krantemperiergeräte KTG*. Produktinformationsbroschüre.
- Wende GmbH (2008): Produktinformation zu Kranklimageräten. Witten. (www.wende-witten.de).
- Wertenbach, Jürgen (2005): *SAE Alternative Refrigerant Cooperative Research Project Phase I and II*. VDA Wintermeeting, 23.-24. Februar 2005, Saalfelden, Österreich.
- Wiemken, Udo (2009): *Solare Kühlung und Klimatisierung – Stand der Techniken und Perspektiven*. Vortrag auf der Fachtagung thermische Solarenergie zur Klimatisierung von Gebäuden, Hannover – IG BCE, 27. Januar 2009.
- Wiescholleck, Florian; Heckt, Roman (2007): *Improved Efficiency for Small Cars with R744*. VDA Alternative Refrigerant Wintermeeting, Saalfelden, Österreich, Februar 2007, (<http://www.vda-wintermeeting.de/Archiv.26.0.html>; 20.07.2010).
- Wieschollek, Florian (2009): *Compressor Testing Results & Findings with the usage of HFO -1234yf*, VDA. Alternative Refrigerant Winter Meeting, 11-12. Februar 2009, Saalfelden Österreich, (<http://www.vda-wintermeeting.de>; 21.07.2010).
- Wild, Ives: Dr.- Ing Ives Wild Ingenieurbüro GmbH (2008): Vortrag CoolLogistic Conference 01.-02. Juli 2008,
(<http://www.navigateconferences.com/downloads/CoolLogistics%20-%20Yves%20Wild.pdf>; 29.10.09).
- Witt – Monika Witt (2009): *Natürliche Kältemittel als Alternative*. Interview in: Die Kälte & Klimatechnik KK, 62 (5) 16-18, Stuttgart: Gentner.
- Wobst, Eberhard; Oberländer, Steffen, Nestler, Walter (2008): *CO₂-Wärmepumpen großer Leistung – unverzichtbar für eine nachhaltige Wärmeversorgung*. In: KI Kälte-, Luft- und Klimatechnik, 2008 (12) 18-21, Heidelberg: S. Buckley, Hühig GmbH.
- Wolf, Frank et al. (2007): *R744 system efficiency improvements through new developments*, JSAE Symposium Review of Automotive Air-Conditioning, 23.-25. Januar 2007, Tokio, Japan.

- Wolfer, Martin; Seitz, Esther; Seiler, Hansjörg (1999): *Ammoniak und Kohlenwasserstoffe als Kältemittel: Risikoanalyse, Produkthaftpflicht und Strafrecht*. Studie im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Energie,
(http://www.bfe.admin.ch/forschungwkk/02425/02724/02727/index.html?lang=de&dossier_id=04067; 4.01.2010).
- Wolkenhauer, Heino (2002): *Regenerative Systemlösungen bei der Klimatisierung von Gebäuden*. In: KI Luft- und Kältetechnik, 38 (9), Heidelberg: C. F. Müller, Hüthig GmbH.
- Wüst, Christian (2010): *Superzug auf Schleichfahrt*. Der Spiegel Nr. 23 (2010), S. 104-106.
- Yau, Jeffrey (2008): *HFO-1234yf-Low GWP Refrigerant Update*, Next Generation MAC Workshop, 23.-25. November, Shanghai, China.

4 HFKW als Treibmittel zur Herstellung von Schaumstoffen

„Schaumstoffe“ ist nach DIN 7726 die Bezeichnung für Werkstoffe, die über ihre ganze Masse verteilte offene oder geschlossene Zellen aufweisen und eine Rohdichte besitzen, die niedriger ist als die Rohdichte der Gerüstsubstanz [DIN 1982]. Als Gerüstsubstanz können sowohl organische Polymere (Schaumkunststoffe) als auch anorganische Materialien (Schaumbeton, Schaumglas) dienen. DIN 7726 klassifiziert die Schaumstoffe in Hartschaumstoffe, halbharte Schaumstoffe, Weichschaumstoffe, elastische und weichelastische Schaumstoffe in Abhängigkeit ihres Verformungswiderstandes bei Druckbelastung.

Im Weiteren näher betrachtet werden Schaumkunststoffe aus organischen Polymeren, die sich in Hartschäume, Weichschäume und Integralschäume aufteilen lassen. Hartschaumstoffe sind nach DIN 7726 Schaumstoffe, die einer Verformung unter Druckbelastung einen relativ hohen Widerstand entgegensetzen: die Druckspannung bei 10 % Stauchung (Druckfestigkeit nach DIN EN ISO 844 [DIN 2009c]) ist ≥ 80 kPa.

Die technisch wichtigsten Basis-Polymere für Hartschäume sind Polystyrole, Polyurethane und Polyisocyanurate; daneben haben auch Polyolefine, Formaldehyd-Harze und Polyvinylchlorid eine gewisse Bedeutung. Charakteristische Eigenschaften von Hartschäumen sind ein hohes Dämmvermögen, eine gute Feuchtigkeitsbeständigkeit und eine hohe mechanische Festigkeit.

Weichschaumstoffe weisen bei Druckbelastung einen relativ geringen Verformungswiderstand auf; die Druckspannung bei 10 % Stauchung nach DIN EN ISO 844 [DIN 2009c] ist ≤ 15 kPa. Polymer-Basis für Weichschäume sind in den meisten Anwendungen Polyurethane.

Integralschäume, auch als Strukturschaumstoffe bezeichnet, sind nach DIN 7726 Schaumstoffe, die zwar über den gesamten Querschnitt chemisch identisch sind, deren Dichte von außen nach innen aber kontinuierlich abnimmt. Sie sind gekennzeichnet durch einen weichen oder porösen Kern und eine nahezu massive Randzone. Auch für Integralschäume ist die Polymer-Basis zumeist Polyurethan.

Die Schaumstruktur der Schaumstoffe entsteht auf zwei unterschiedliche Weisen:

- Einsatz eines „chemischen“ Treibmittels, das aufgrund von chemischen Reaktionen bei der Polymerisation selbst entsteht. Ein Beispiel ist die Verschäumung von Polyurethan: wenn bei der Polyaddition Wasser oder Carbonsäuren zugegen sind, reagieren diese mit den Isocyanaten unter Abspaltung von CO_2 , das auftreibend und schaubildend wirkt.
- Einsatz eines „physikalischen“ Treibmittels: hierbei werden Stoffe oder Zubereitungen als Blähmittel zugesetzt, die während der Polymerisation entweder aus flüssiger Lösung verdampfen oder sich bei Erreichen einer bestimmten Temperatur unter Gasbildung (CO_2 , N_2) zersetzen. Als physikalische Treibmittel geeignet sind z. B. leichtflüchtige organische Verbindungen wie Pentan, aber auch FCKW, HFCKW oder HFKW.

Der Einsatz von physikalischen Treibmitteln ist mit einer Reihe von Vorzügen verbunden:

- Es gelangen keine zusätzlichen Komponenten in die Schaum-Matrix.
- Die verdampfenden Treibmittel sorgen für eine Kühlung der exothermen Polyadditionsreaktionen bei Schäumen auf Polyurethanbasis.
- Durch eine geeignete Auswahl kann das Treibmittel als Zellgas für eine Verbesserung der wärmedämmenden Eigenschaften des Schaums sorgen.

Aufgrund dieser Vorzüge ist das Verschäumen mit physikalischen Treibmitteln in vielen Anwendungen das dominierende Verfahren. Die nachfolgenden Ausführungen konzentrieren sich daher auf den Einsatz von physikalischen Treibmitteln.

Die Emissionen und Schätzungen zur Emissionsentwicklung von HFKW als Treibmittel für Schaumkunststoffe wurden im allgemeinen Teil ausführlich dargestellt (s. Teil A, Kap. 1.3 und Kap. 2). Die Verwendung von HFKW als Treibmittel verursacht heute etwa 17 % der HFKW-Gesamtemissionen in Deutschland (2008). Damit ist seit 2000 bzw. 2002 ein deutlicher Rückgang zu verzeichnen, der insbesondere auf den Reduktionen im Bereich der PUR-Montageschäume und XPS-Schäume beruht. Die HFKW-Emissionen aus der Herstellung und Verwendung von Schäumen entsprechen 1,02 Mio. t $\text{CO}_{2\text{eq}}$. Damit haben sie einen Anteil von 9 % an den HFKW-Gesamtemissionen in Deutschland (s. Tab. 2.1 und Tab. 2.2).

Den Bemühungen, den HFKW-Einsatz zu reduzieren, steht der Einsatz von 2-Chlorpropan als Treibmittel für Phenolharz-Hartschaumplatten gegenüber. Dieser Stoff schädigt die Ozonschicht, so dass sein Einsatz einen Rückschritt innerhalb des Ausstiegsprozesses aus der Verwendung von FCKW und HFCKW bedeutet. 2-Chlorpropan hat zwar nur ein schwaches Ozonabbaupotenzial (ODP) von 0,002 [UNEP 2006] und gehört nicht zu den geregelten ozonschichtschädigenden Stoffen. Wesentliche Vorteile hinsichtlich der

Dämmeigenschaften von mit 2-Chlorpropan geschäumten Produkten, die einen Einsatz dieses Stoffes rechtfertigen könnten, sind aber nicht erkennbar. Im Gegenteil, die Wärmeleitfähigkeit ist sogar höher als die von HFKW-haltigen Dämmplatten [UNEP 2006]. 2-Chlorpropan hat eine stark narkotisierende Wirkung, ist sehr leicht flüchtig und leicht entzündlich [IFA 2010]. Diese Eigenschaften erfordern umfangreiche Arbeitsschutzmaßnahmen bei der Herstellung von Schäumen. Beim Konfektionieren und Zuschneiden sowie während der Nutzungsphase entweicht das Treibmittel auch aus den geschlossenzelligen Platten. Spätestens bei der Entsorgung werden die verbliebenen Reste des problematischen Zellgases frei. Hinzu kommt die Gefahr der Freisetzung von reizenden, ätzenden Chlorgasen im Brandfall. Aus Gründen des Umwelt- und Gesundheitsschutz sollte auf den Einsatz von 2-Chlorpropan als Treibmittel verzichtet und natürlichen Treibmitteln wie CO₂ oder Kohlenwasserstoffen der Vorzug gegeben werden.

4.1 Hartschäume zur Wärmedämmung

Einen Überblick über den Dämmstoffmarkt im Hochbau in Deutschland geben die Abbildung 4.1 und die Tabelle 4.1. Dabei sei darauf hinzuweisen, dass der GDI (Gesamtverband Dämmstoffindustrie) aus kartellrechtlichen Gründen keine Daten mehr veröffentlicht, so dass die aktuellsten Zahlen aus dem Jahr 2005 stammen.

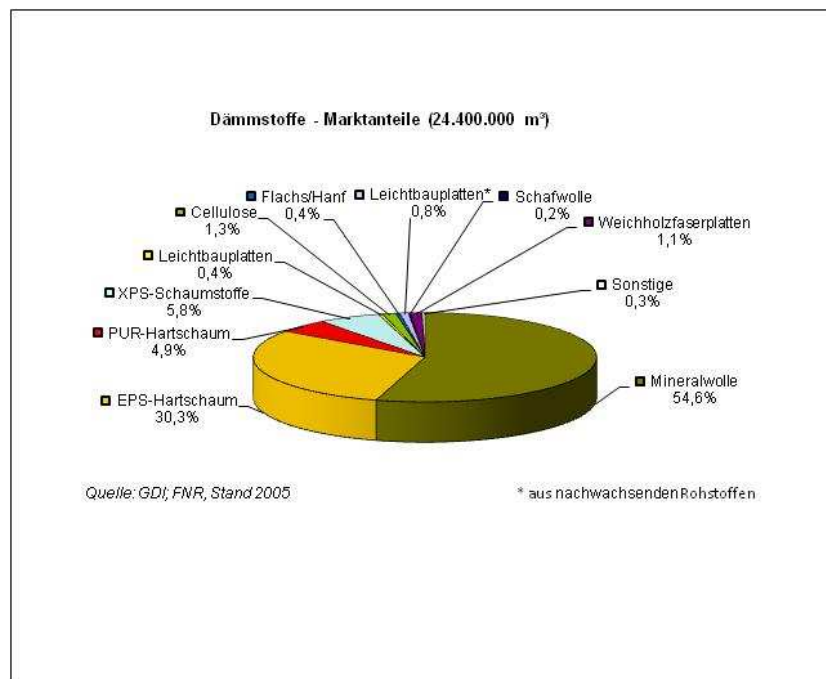


Abbildung 4.1: Dämmstoffmarkt im Hochbau in Deutschland [GDI 2006].

Zu Beginn der 90er Jahre hat der Absatz von Dämmstoffen im Bauwesen deutliche Zuwächse erfahren und erreichte im Jahr 1999 seinen Höhepunkt. Seit dem nahm er um etwa 31 % ab [GDI 2006]. Dieser Rückgang dürfte vor allem konjunkturell bedingt sein und

betrifft alle vom GDI betrachteten Dämmstoffgruppen. Einzig die XPS-Dämmstoffe (Hartschäume aus extrudiertem Polystyrol) verzeichneten zwischen 1999 und 2005 einen Zuwachs um 10 %.

Tabelle 4.1: GDI-Baumarktstatistik 1996 – 2005 [GDI 2006]

Produktgruppen (Angaben in 1.000 m ³)	1996	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
(1) Mineralwolldämmstoffe	18.980	21.300	19.980	16.770	15.840	15.572	14.574	13.320
(2) EPS-Hartschaumdämmstoffe	9.100	9.738	9.611	8.448	8.025	7.985	7.757	7.439
(3) PUR-Hartschaumdämmstoffe	1.365	1.588	1.572	1.484	1.389	1.428	1.398	1.198
(4) XPS-Hartschaumdämmstoffe	985	1.296	1.383	1.351	1.310	1.336	1.452	1.426
(5) Dämmende Leichtbauplatten	310	260	240	206	176	159	132	95
Zwischensumme	30.740	34.182	32.786	28.259	26.740	26.480	25.313	23.478
EPS-Hartschaumdämmstoffe*	-170	-140	-129	-114	-102	-93	-72	-50
Dämmstoffmarkt**	30.570	34.042	32.657	28.145	26.638	26.387	25.241	23.428

* Diese Mengen EPS-Hartschaumdämmstoffe sind in Mehrschichtbauplatten nach DIN 1101 verarbeitet, damit auch in Gruppe 5 dieser Statistik enthalten und werden daher von der Gesamtmenge abgezogen [DIN 2000].

** Diese Mengen der im GDI vertretenen Produktgruppen stellen etwa 96 % des Gesamtmarktes Hochbau in der Bundesrepublik Deutschland dar.

4.1.1 XPS-Hartschaum

Der Verbrauch von Extrudiertem Polystyrol (XPS), auch kurz Extruderschaum genannt, lag 2007 laut Bipro (2008) in Deutschland bei knapp 1,9 Mio. m³. Davon gingen mehr als 80 % in den Bereich des Hochbaus [Bipro 2008]. XPS-Hartschaum nimmt durch seine geschlossene Zellstruktur auch im direkten Wasserkontakt praktisch kein Wasser auf. Es ist verrottungsfest, sehr druckbelastbar, aber nicht UV-beständig. Die obere Grenze des Anwendungstemperaturbereiches liegt bei ca. 75°C.

XPS-Hartschaum wird in einem kontinuierlichen Extrusionsprozess hergestellt: treibmittelfreies Polystyrol-Granulat wird in einem Extruder aufgeschmolzen und unter Zugabe von Treibmittel über eine Breitschlitzdüse kontinuierlich ausgetragen. Der entstehende Schaumstoff ist homogen und geschlossenzellig. Der sich hinter der Breitschlitzdüse aufbauende Schaumstoffstrang ist in Dicken zwischen 20 mm und 200 mm herstellbar (mit Mehrlagenklebetechnik bis zu 320 mm). Nach dem Durchlaufen einer

Kühlzone wird der Schaumstoff mechanisch zu Platten und Blöcken mit unterschiedlicher Oberflächen- und Randausbildung weiterverarbeitet. So verbleibt die durch das Extrusionsverfahren entstehende glatte Schäumhaut auf den Platten oder wird zur besseren Haftvermittlung in Verbindung mit Beton, Mörteln, Bauklebern etc. bei speziellen Plattentypen mechanisch entfernt. Es werden auch Platten mit speziellen Oberflächenprägungen oder Rillen versehen.

Im Hochbau wird XPS-Hartschaum häufig für stark beanspruchte, erdberührte Bereiche in der Außendämmung eingesetzt: unter der Bodenplatte des Gebäudes und als Kellerdämmung gegen das Erdreich (sog. „Perimeterdämmung“). Weitere Einsatzgebiete sind das Umkehrdach, ein einschaliges, nicht belüftetes Flachdach oder ein flach geneigtes Dach. Als Besonderheit des Umkehrdachs liegt die Dämmschicht im Gegensatz zu konventionellen Warmdächern über der Dachabdichtung. Eine spezielle Anwendung ist die Wärmebrückendämmung, die zunehmend an Bedeutung gewinnt.

Neben den typischen Dämmstoff-Produkten für das Bauwesen werden XPS-Hartschäume für spezielle Anwendungen eingesetzt. Diese Spezialprodukte repräsentieren insgesamt weniger als 10 % des europäischen XPS-Dämmstoffmarktes, sind aber sehr vielfältig in ihren Anwendungen. Statistiken über diese Spezialprodukte (Anwendungsarten, Einsatzmengen) sind nicht bekannt [Anhörung 2003]. Sie lassen sich in folgende Bereiche einteilen:

- Paneele und Sandwich-Elemente (mit Verkleidungen aus Stahl, Aluminium oder Holz);
- Baumaterial im Nassbereich (zur Verkleidung mit Fliesen);
- Kühlfahrzeuge, Kühlcontainer, Kühlhäuser;
- Rohrschalen (für die Isolierung von Fernwärmerohren sind XPS-Hartschäume wegen ihrer Anwendungsgrenztemperatur von ca. 75°C nicht geeignet).

Bis etwa 1989/1990 wurde XPS-Hartschaum mit dem FCKW-12 als Treibmittel geschäumt [UBA 1989]. 1990 haben die deutschen Hersteller den FCKW-12 durch HFCKW ersetzt. Zum Einsatz kamen der HFCKW-142b oder eine Mischung aus dem HFCKW-142b und dem HFCKW-22 [Schwarz, Leisewitz 1999]. Durch das Verbot der HFCKW 10 Jahre später mussten auch diese FCKW-Ersatzstoffe als Treibmittel substituiert werden. Bis zu diesem Zeitpunkt wurden bei der Herstellung von XPS-Hartschaum keine HFCKW eingesetzt. Ein Teil der Produktion von XPS-Hartschaum erfolgte danach ganz ohne fluoridierte Treibmittel; diese Produkte finden vor allem im Hochbau Verwendung. Andere Produktionsverfahren nutzen den HFCKW-134a oder den HFCKW-152a als Treibmittel [Harnisch u. a. 2003]. Für das Jahr 2007 werden für Deutschland 893 t HFCKW-Emissionen aus XPS-Hartschäumen angegeben [Schwarz 2009b]. Damit ist die Herstellung von XPS-Hartschaumdämmstoffen der Schaumsektor mit den höchsten HFCKW-Emissionen. Die

eingesetzten Mengen an HFKW-134a haben sich seit 2001 nur leicht verringert, während sich die Verwendung von HFKW-152a bis 2007 mehr als halbiert hat. Dieser starke Rückgang wirkt sich allerdings nur geringfügig auf die klimarelevanten Emissionen aus (2001: 0,8 Mio. t CO_{2eq}, 2007: 0,6 Mio. t CO_{2eq}), da HFKW-152a ein verhältnismäßig geringes GWP (140) hat [Schwarz 2009b].

Die großen Hersteller in Deutschland (BASF und Dow Chemical Deutschland) vereinbarten bereits im Jahr 1996 in einer freiwilligen Selbstverpflichtung gegenüber dem Bundesumweltministerium, bis zum 30. Juni 1998 80 Prozent der für den deutschen Markt produzierten Wärmedämmplatten HFCKW-frei herzustellen und ihre Produktion bis zum 01. Januar 2000 vollständig auf HFCKW-freie Treibmittel umzustellen. Die BASF AG hat seit Anfang 1999 ihre gesamte Produktion für den Hochbaubereich von HFCKW auf halogenfreie Treibmittel (CO₂) umgestellt [BASF 2010]. Dagegen hat Dow Chemical Deutschland die Ausstiegsfristen nicht eingehalten und erst seit Ende 2000 auf ozonabbauende Treibmittel verzichtet. Alternativ setzt Dow Chemical neben CO₂ auch den HFKW-134a ein [DOW 2010]. Auch andere Hersteller bieten heute parallel zu HFKW-freien Produkten XPS-Dämmstoffe an, bei denen CO₂ versetzt mit dem HFKW-152a oder aber dem HFKW-134a als Treibmittel verwendet wird [Jackson 2010; URSA 2010].

Für die Spezialprodukte werden zumeist Treibmittel eingesetzt, die HFKW enthalten. Dafür kommen der HFKW-152a und der HFKW-134a in Frage, entweder als Einzelstoff oder in Mischungen, die auch CO₂ oder organische Treibmittel (Ethanol) enthalten können [Schwarz, Leisewitz 1999]:

- **HFKW-152a:** Der Vorteil des HFKW-152a liegt in der guten Löslichkeit in der Polystyrol-Schmelze, die zu einer sehr feinen und homogenen Zellstruktur des Schaums führt. Zudem bietet der HFKW-152a die Möglichkeit, bisher auf HFCKW als Treibmittel ausgelegte Anlagen mit relativ geringem Aufwand für das neue Treibmittel umzurüsten. Sein technischer Nachteil ist die schnelle Diffusion aus den Schaumzellen, die - nach unterschiedlichen Quellen - innerhalb weniger Wochen oder innerhalb von 2 Jahren zum vollständigen Austrag aus dem Schaum führt. Somit kann mit dem HFKW-152a langfristig keine Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit gegenüber CO₂-getriebenem XPS erzielt werden. Da der HFKW-152a entflammbar ist, fordert seine Verwendung entsprechende betriebliche Schutzmaßnahmen in der Produktion. Ein weiterer Nachteil sind die um ein Vielfaches höheren Kosten für das Treibmittel beim Einsatz des HFKW-152a gegenüber CO₂.
- **HFKW-134a:** Das Treibmittel hat im Vergleich zum HFKW-152a den Vorteil, nicht brennbar zu sein und wesentlich länger im Produkt zu verbleiben, da es ähnlich langsam wie der HFCKW-142b aus dem Hartschaum ausgast. Die Halbwertszeit für eine 100 mm dicke Platte liegt für den HFKW-134a bei 76 Jahren und für den

HFKW-142b bei 84 Jahren. Nach einem Verlust von 25 % des Zellgases im Produktionsjahr ergibt sich damit eine jährliche Emissionsrate von 0,66 % bei einer Plattenstärke von 100 mm. Ein großer Nachteil des HFKW-134a ist sein hohes Treibhauspotenzial. Anders als der HFKW-152a ist der HFKW-134a im Polystyrol auch nur schlecht löslich, so dass die Qualität des Schaums im Hinblick auf Zellstruktur und Homogenität eingeschränkt ist. Daher wird der HFKW-134a bei XPS-Hartschäumen zumeist in Kombination mit anderen Treibmitteln (HFKW-152a, CO₂, Ethanol) eingesetzt. Die Hersteller argumentieren vor allem mit einer Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit als vorrangigem Ziel des Einsatzes von HFKW-134a, die sich wegen der langsameren Diffusion des Treibmittels aus dem Schaum langfristig vorteilhaft auswirken soll.

Minderungsmöglichkeiten

Die heute in Deutschland produzierten XPS-Hartschaumstoffe sind zu 80 % mit CO₂ oder mit einer Kombination aus CO₂ und organischen Treibmitteln (ca. 2 bis 3 % Ethanol) geschäumt [Bipro 2008]. Im Unterschied zu PUR-Hartschaum entsteht im Falle von XPS das CO₂ nicht aus einer chemischen Reaktion, sondern muss ebenso wie die anderen Treibmittel von außen zugeführt werden. CO₂ ist relativ schwierig als Treibmittel einer Expansionsanlage zu handhaben und erfordert eine andere Technologie gegenüber den früher eingesetzten HFKW, da der Herstellungsprozess bezüglich des Drucks anders ausgelegt ist. Dabei können geringere Plattenstärken von bis zu 60 oder 70 mm mit geringem Aufwand in kleineren Anlagen hergestellt werden. Bei Plattenstärken von 80 mm und mehr ist der technologische Aufwand für die Umstellung der Anlagen höher. Den Kosten für den Umbau der Produktionsanlagen stehen jedoch - im Vergleich mit fluorierten Treibmitteln - deutlich geringere Kosten für CO₂ gegenüber. Dabei rechnen die XPS-Produzenten für den Anlagenumbau mit Kosten in der Größenordnung von 30 bis 50 % des Neubaus einer Anlage [Anhörung 2003].

In Kombination von CO₂ mit 2 bis 3 % eines organischen Treibmittels (Ethanol) ist die gesamte Produktpalette ohne Qualitätseinbußen produzierbar. Der größte Hersteller in Deutschland verfährt auf diese Weise [BASF 2010]. Andere Hersteller bieten neben HFKW-freien XPS-Produkten auch XPS-Dämmstoffe an, bei denen der HFKW-134a oder CO₂ versetzt mit dem HFKW-152a als Treibmittel verwendet wird [Dow 2010; Jackson 2010; URSA 2010]. Der HFKW-152a, der bei der Herstellung vollständig emittiert, dient hierbei der Erzeugung feinerer Zellstrukturen.

Vor der Einführung der neuen europäischen Produktnormen¹ - für XPS-Hartschaum ist dies die DIN EN 13164 [DIN 2001a], ersetzt durch DIN EN 13164 [DIN 2009a] - sah die

¹ Die europäischen Produktnormen sind in Deutschland seit dem 1.1.2004 gültig.

Normung für Bauprodukte bei Wärmedämmstoffen für den Hochbau die Angabe der rechnerischen Wärmeleitfähigkeit in Schritten von $0,005 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ vor. Dieser Bemessungswert wurde in Form der Wärmeleitfähigkeitsgruppe (WLG) angegeben (z. B. „WLG 035“). Seither ist vorgesehen, den Nennwert der Wärmeleitfähigkeit in Schritten von $0,001 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ oder besser $1 \text{ mW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ anzugeben.

Nach Aussagen von Herstellern beschränkt sich der Einsatz des HFKW-134a und HFKW-152a im Wesentlichen auf spezielle Anwendungsgebiete von XPS-Hartschaum wie den Einsatz in Kühlfahrzeugen und Kühlcontainern oder in Paneelen und Sandwich-Elementen [Anhörung 2003]. Nach wie vor werden aber mit HFKW geschäumte XPS-Platten von einigen Herstellern auch für Dachdämmung, Perimeterdämmung oder ähnliche Anwendungen angeboten [Dow 2010; Gefinex 2010; URSA 2010]. Aus technischer Sicht ist ein Ersatz durch Treibmittel ohne HFKW nicht nur bei den Anwendungen im Bauwesen, sondern auch bei den speziellen Anwendungen möglich. Einschränkungen bestehen nach heutigem Stand der Technik nur bei den niedrigsten Wärmeleitfähigkeiten ($< \text{WLG 035}$) in Verbindung mit höheren Plattenstärken von 80 mm und mehr [Anhörung 2003]. Eine Alternative stellen hier CO_2 -geschäumte Mehrschichtplatten dar, die mittels Mehrlagen-Klebertechnik eine Plattenstärke von bis zu 320 mm sowie einen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) von $0,15 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ erreichen [Bipro 2008]. Darüber hinaus ist für derartige Anwendungen der Einsatz von Vakuumdämmplatten aus mikroporöser Kieselsäure oder anderen Hartschäumen (z.B. HFKW-freier PUR-Hartschaum) möglich.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Entsorgung der mit dem HFKW-134a geschäumten Dämmstoffe. Um die umweltfreundliche Entsorgung der XPS-Hartschäume zu ermöglichen, müssten sie so eingebaut werden, dass sie getrennt ausgebaut und getrennt entsorgt werden können. Da ein geordneter Rückbau im Hochbau bisher nicht erfolgt und auch zukünftig nicht zu erwarten ist, muss mit der vollständigen und unkontrollierten Freisetzung auch des im Schaum verbliebenen HFKW-134a am Ende des Nutzungszeitraums ausgegangen werden [Schwarz, Leisewitz 1999; Bipro 2008].

Schlussfolgerungen

Die Verwendung von HFKW als Treibmittel in XPS-Hartschäumen für das Bauwesen ist nicht erforderlich. Mit CO_2 als Treibmittel oder durch Kombination von CO_2 mit 2 bis 3 % Ethanol kann die gesamte Produktpalette hergestellt werden. Im Ergebnis ist der vollständige Ausstieg aus der HFKW-Verwendung bei der Herstellung von XPS-Hartschäumen anzustreben.

Die vier Hersteller in Deutschland produzieren alle bereits heute mit CO_2 (zumindest einen wesentlichen Teil ihres Angebots), so dass das Argument der hohen Investitionskosten hier nicht ausschlaggebend sein kann.

XPS-Hartschaum für Wärmeleitfähigkeiten kleiner als WLG 035, der für ein kleines Marktsegment von speziellen Anwendungen produziert wird, kann nach heutigem Stand der Technik mit CO₂ als Treibmittel nicht hergestellt werden. In diesem Marktsegment ist eine Substitution der XPS-Hartschäume durch andere Produkte (wie z. B. HFKW-freier PUR-Hartschaum oder Vakuumdämmplatten aus mikroporöser Kieselsäure) denkbar.

4.1.2 PUR-Hartschaum

PUR-Hartschaum-Wärmedämmstoffe sind geschlossenzellige harte Schaumkunststoffe aus Polyurethan (PUR), die sich vor allem durch ihr gutes Wärmedämmvermögen auszeichnen. PUR-Hartschaum-Dämmstoffplatten, die industriell hergestellt werden, sind nach DIN EN 13165 [DIN 2009b] genormt und in Deutschland von der ÜGPU (Überwachungsgemeinschaft Polyurethan-Hartschaum e.V.) güteüberwacht. Der Bemessungswert für die Wärmeleitfähigkeit von PUR-Platten beträgt üblicherweise $\lambda(R) = 0,025; 0,028$ oder $0,030 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$. Ein weiteres Merkmal ist ihre hohe Druckfestigkeit.

PUR-Hartschaum ist ein Duroplast, das heißt, er schmilzt auch bei hoher Temperatur nicht. Die Anwendungsgrenztemperaturen liegen bei -30°C bis $+90^{\circ}\text{C}$. Spezielle Produkte können auch bei tieferen bzw. höheren Temperaturen eingesetzt werden. Kurzfristig kann PUR-Hartschaum auch $+250^{\circ}\text{C}$ „ertragen“, diese Temperatur tritt z. B. beim Verkleben mit Heißbitumen auf.

Im Bauwesen werden PUR-Hartschaum-Dämmstoffe als Dämmplatten vorzugsweise im Flachdach, im Steildach, als Deckendämmung, im Fußboden - auch in Kombination mit Fußbodenheizungen - und im Wandbereich eingesetzt. Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Dämmung von Niedrigenergie-Häusern.

PUR-Hartschäume werden unterschieden in

- Konstruktionsschaum (d. h. die technische Isolierung von Kühlmöbeln oder Warmwasserspeichern);
- Bandschaum (PUR-Hartschaum-Verbundelemente mit flexiblen Deckschichten aus Aluminium, Folie, Papier oder auch aus Glasvlies);
- Blockschaum (kontinuierlich hergestellter PUR-Hartschaum, der zu Platten geschnitten wird, oder diskontinuierlich hergestellter PUR-Hartschaum, der in Blöcken für verschiedene technische Anwendungen, aber auch im Bauwesen eingesetzt wird);
- Sandwichelemente, überwiegend mit Deckschichten aus Stahl;

- Ortschaum (Spritz- oder Gießschaum, der z. B. für die Isolierung von Dächern eingesetzt wird);
- Rohrdämmungen (z. B. für Fernwärme).

Polyurethane entstehen nach dem Polyisocyanat-Polyadditionsverfahren: PUR-Hartschäume werden mit Hilfe von Katalysatoren und Treibmitteln durch die chemische Reaktion von Polyisocyanaten mit Polyolen und/oder durch Trimerisierung von Polyisocyanaten erzeugt. In Gegenwart spezieller Katalysatoren können Isocyanate auch miteinander reagieren. Dabei bilden sich neben den PUR- auch Polyisocyanurat (PIR)-Strukturen in der Matrix, die ein verbessertes flammschutztechnisches Verhalten zeigen [Kapps, Buschkamp 2004; Buschkamp 2001]. Unter dem im Weiteren verwendeten Begriff „PUR“ werden alle Polyurethan-Hartschäume einschließlich der PIR-modifizierten Produkte zusammengefasst.

Das Aufschäumen von PUR-Hartschaum kann ausschließlich durch prozessbedingtes CO₂ erfolgen. Aus der Reaktion von Wasser, das in kleinen Mengen in der Polyolformulierung enthalten ist, mit Isocyanat entsteht CO₂, das als „chemisches“ Treibmittel genutzt wird. Da das CO₂ im Allgemeinen sehr schnell aus den von ihm geformten Schaumzellen diffundiert, trägt es nicht zum Dämmvermögen bei. In Anwendungen, bei denen es auf hohe Wärmedämmung (niedrige Lambda (λ)-Werte) ankommt, wird dem bei der Schäumung gebildeten chemischen Treibmittel CO₂ ein „physikalisches“ Treibmittel zugegeben, das in den Schaumzellen verbleiben soll. Früher wurde hierfür FCKW-11 als Treibmittel eingesetzt. Nachdem der Einsatz vollhalogenierter FCKW seit dem 01. Januar 1995 gemäß der *FCKW-Halon-Verbots-Verordnung* [FCKW-Verordnung 1991] verboten ist, wird in Deutschland überwiegend der halogenfreie Kohlenwasserstoff Pentan für die Herstellung von PUR-Hartschaum eingesetzt. Ein Umstieg von FCKW auf den HFCKW-141b, der in der EU sowie in Japan seit Januar 2004 und in den USA bereits seit Januar 2003 als Schaumtreibmittel ebenfalls verboten ist [Hammond Suddards Edge 2002], erfolgte nicht. Stattdessen kommen seit 2002 neben Pentan die fluorierten Treibmittel HFKW-365mfc sowie HFKW-227ea und seit 2004 HFKW-245fa zur Anwendung, die zu diesen Zeitpunkten technisch konkurrenzfähig und kommerziell verfügbar waren [UNEP 2003]. Allerdings ist ihr Einsatz zugunsten von Pentan rückläufig [Bipro 2008]. HFKW-134a, das als Nachfolger für das HFCKW-141b diente, wird seit 2004 nicht mehr in PUR-Hartschäumen verwendet [Bipro 2008; NIR 2010]. Pentan verbleibt wie FCKW und HFCKW in den Schaumzellen und trägt dadurch zur Wärmedämmung bei. Nach der Substitution des FCKW-11 konnte die Wärmeleitfähigkeitsstufe 020, d. h. $\lambda(R) = 0,020 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, für PUR-Hartschäume - unabhängig vom verwendeten Treibmittel - nicht wieder erreicht werden.

Die Herstellung von PUR-Schäumen ist prozessbedingt mit hohen Treibmittelemissionen verbunden. Demgegenüber sind die laufenden Jahresemissionen aus dem fertigen Produkt während der Nutzungsphase vergleichsweise gering. In der Tabelle 4.2 sind die

Emissionswerte für die HFKW-134a (Verwendung zur Fertigung von PUR-Hartschäumen bis 2004) und HFKW-245fa/-365mfc, wie sie im Nationalen Inventarbericht zur Emissionsberichterstattung (NIR) zugrunde gelegt werden, zusammengestellt.

Tabelle 4.2: Emissionsfaktoren von PUR-Hartschäumen [NIR 2010]

Emissionsfaktoren von PUR-Hartschäumen			
	Lebens- dauer	Verluste im ersten Jahr (Anlagen-Emissionen)	Jährlicher Verlust (Nutzungsverlust)
	[Jahre]	[%]	[%]
HFKW-134a-Anwendungen	50	10	0,5
HFKW-245fa/-365mfc-Anwendungen	50	15	1

Die Verluste von HFKW-134a in der Nutzungsphase (Bestandsemissionen) werden mit 0,5 % jährlich angenommen. Bei der Entsorgung nach 50-jähriger Nutzungsdauer sind rechnerisch noch 65 % des Treibmittels im Schaum enthalten. Dies gilt entsprechend auch für die Anwendungen des HFKW-245fa oder des HFKW-365mfc. Wie Tabelle 4.2 zeigt, beträgt bei ihnen der Treibmittelverlust im Herstellungsjahr (Anlagenemissionen) abhängig von der Art der Anwendung im Mittel 15 % und der jährliche Nutzungsverlust aus dem Bestand im Mittel 1 %. Bei der Entsorgung am Ende der Lebensdauer sind demnach noch 35 % des Treibmittels im Schaum vorhanden [NIR 2010; Schwarz 2009b].

In Europa bestehen unterschiedliche nationale Bauvorschriften, Normen und Zulassungen für die Planung und den Bau von Gebäuden. Mit Beginn des Europäischen Binnenmarktes wurden die Bemühungen intensiviert, die Normen und Zulassungen für das Bauwesen zu harmonisieren; mit dem Ziel, das CE-Zeichen für Baustoffe und Bauprodukte zu vergeben [Walter 2004].

Die zentrale Eigenschaft eines Wärmedämmmaterials ist seine Wärmeleitfähigkeit (Wärmedurchgangswiderstand). Die Dämmwirkung des Hartschaums ist bei gegebener Dicke umso höher, je niedriger die Wärmeleitfähigkeit λ des in den Schaumzellen eingeschlossenen Treib- und Zellgases ist. Die λ -Werte der Treibmittel-Gase als solche steigen zwar in der Reihenfolge FCKW-11 (8,5 mW/(m*K)), HFCKW-141b (10,1 mW/(m*K)), c(cyclo)-Pentan (12,4 mW/(m*K)) und n-Pentan (14 mW/(m*K)) in Stufen von etwa 1,5 mW/(m*K) an. Die λ -Werte der fertigen Schäume - die rechnerischen Wärmeleitfähigkeiten - werden jedoch nicht nur durch jene λ -Werte der physikalischen Treibmittel, sondern noch durch viele weitere Faktoren beeinflusst. Wärmedämmstoffe sind langlebige Produkte, für deren Gebrauchsdauer ein Zeitraum von 25 bis 50 Jahren anzusetzen ist. Daher ist für die Angabe der Wärmeleitfähigkeit ein realistischer

Langzeitwert notwendig, der die Alterungseinflüsse berücksichtigt [Walter 2004]. Die Norm DIN EN 13165 [DIN 2009b] für PUR-Hartschaumstoffe enthält unter anderem Angaben über die Prüfverfahren für die Wärmeleitfähigkeit. Für die Berücksichtigung der Alterungseinflüsse auf die Wärmeleitfähigkeit sind zwei Möglichkeiten vorgesehen:

- Festgelegte Zuschläge zum gemessenen Anfangswert der Wärmeleitfähigkeit. Diese Zuschläge sind für bekannte und umfassend untersuchte Produkte definiert. Ihre Verwendung ist an die Einhaltung entsprechender Bedingungen geknüpft.
- Messung des „gealterten“ Wertes für die Wärmeleitfähigkeit nach einem Schnellverfahren (Lagerung bei $70 \pm 2^\circ\text{C}$ für 175 ± 5 Tage sowie Erhöhung dieses Wertes um einen vorgegebenen Sicherheitszuschlag).

Die Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffprodukte wird als Nenn- oder Bemessungswert angegeben. Der Nennwert (λ_D) wird aus dem Anfangsmesswert unter Berücksichtigung der statistischen Streuung der Messwerte und des Alterungszuschlages ermittelt und einer Stufe zugeordnet. Als Stufen sind $1 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ -Schritte vorgesehen. Der Bemessungswert enthält zudem Sicherheitszuschläge und beschreibt die wärmetechnischen Eigenschaften des Dämmstoffes über die gesamte Nutzungsphase [Endres, Kleser 2008].

Typische experimentell bestimmte Werte für die rechnerische Wärmeleitfähigkeit eines diffusionsdicht kaschierten PUR-Hartschaums sind $21 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ bei dem seit 2004 in der EU unzulässigen HFCKW-141b, $23 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ bei c-Pentan und $24 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ bei n-Pentan als physikalischem Treibmittel.

Gemäß den Angaben des Herstellers liegt der λ -Wert des Treibmittels HFKW-365mfc als Gas ($10,6 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$) zwischen den Werten für den HFCKW-141b und für c-Pentan. Entsprechendes gilt auch für den HFKW-245fa. Mit diesen Treibmitteln hergestellter PUR-Hartschaum hat dann eine berechnete Wärmeleitfähigkeit λ von etwa $22 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ [Bipro 2008]. Diese Unterschiede zwischen Pentan und den HFKW sind letztendlich vernachlässigbar gering, insbesondere da das Langzeitverhalten der Wärmeleitfähigkeit neben dem verwendeten Treibmittel von zahlreichen anderen Einflüssen (Rohdichte, Temperatur, Messzeitpunkt, Einfluss von Wasser und Feuchte) abhängig ist [Endres, Kleser 2008].

Die Verwendung von Pentan erfordert explosionsgeschützte Verarbeitungsanlagen und andere technische Änderungen der Prozesstechnik gegenüber fluorierten Treibmitteln. Nach Einschätzung der Hersteller von PUR-Hartschaum sind mit der Umstellung auf Pentan hohe Investitionen verbunden. Bei größeren Durchsätzen amortisieren sich diese aber Dank des niedrigen Treibmittelpreises sehr schnell. Der Fachverband Schaumkunststoffe schätzt, dass im Bereich Wärmedämmung die Grenze etwa bei 100 Kubikmeter Schaumstoff pro Arbeitstag liegt, ab der ein Einstieg in die Pentantechnologie ohne Subventionen und aus eigener Kraft ökonomisch vorteilhaft für den Anlagenbetreiber ist [Anhörung 2003].

Für die verschiedenen Anwendungen von PUR-Hartschäumen ergeben sich unterschiedliche Konsequenzen, die neben den technischen oft auch ökonomische Gründe haben. Daher ist es notwendig, die einzelnen Anwendungen getrennt voneinander zu betrachten.

Bandschaum, Dämmplatten für die Anwendung im Hochbau

Seit dem Verbot von FCKW als Treibmittel sind Dämmplatten mit WLS 020 nicht mehr erhältlich. PUR-Dämmplatten für den Hochbau werden heute ganz überwiegend mit n-Pentan geschäumt; der Marktanteil dieser Produkte in Deutschland beträgt etwa 95 % [Bipro 2008]. Die Wahl des Treibmittels hat vor allem ökonomische Gründe; daher ist eine Entwicklung hin zum Einsatz von neuen HFKW nicht zu erwarten, da diese HFKW erheblich teurer als die bisher eingesetzten Treibmittel sind.

Für Spezialanwendungen (hohe Brandschutzanforderungen bei der Herstellung oder bei der Verwendung und besonders hohe Anforderungen an die Wärmeleitfähigkeit sowie geringes Gewicht bzw. geringe Plattenstärke), bei denen bis Ende 2003 noch HFCKW eingesetzt wurden, kommen noch immer die HFKW-365mfc und HFKW-245fa zum Einsatz. Aus ökonomischen Gründen werden für diese Anwendungen auch Treibmittel-Mischungen unter Verwendung von CO₂ eingesetzt, die allerdings ebenfalls HFKW (zumeist den HFKW-365mfc) enthalten. Das Argument der besseren Wärmedämmleistung ist für den zukünftigen Einsatz von HFKW als Treibmittel jedoch keine stichhaltige Begründung, da bei deren Einsatz keine relevanten Vorteile gegenüber Pentan zu erzielen sind.

Ohne den Einsatz des HFCKW-141b kann von reinen PUR-Dämmplatten, also von Hartschaum ohne metallische Deckschicht, die Baustoffklasse B1 nach DIN 4102-1 [DIN 1998] für höchste Anforderungen an den Brandschutz nicht mehr erreicht werden. Auch der Einsatz von Treibmitteln auf der Basis des HFKW-365mfc ermöglicht nicht die Herstellung von PUR-Hartschaum der Baustoffklasse B1 [Anhörung 2003].

Aus technischer Sicht ist der Einsatz von HFKW in PUR-Dämmplatten nicht erforderlich. Die Umstellung auf halogenfreie Treibmittel ist fast vollständig erfolgt. Zudem weist eine mit Pentan geschäumte PUR-Dämmplatte eine wesentlich bessere Treibhausgasbilanz gegenüber einer mit HFKW geschäumten PUR-Dämmplatte auf. Dies gilt - unter konservativen Annahmen - sowohl für den Fall, dass die Stärke der Dämmschicht für die Pentan-geschäumte Dämmplatte erhöht wird, als auch unter der Annahme, dass bei konstanter Stärke der Dämmschicht ein geringfügig erhöhter Heizenergiebedarf für die mit Pentan geschäumte Dämmplatte aufgewendet wird [Harnisch u. a. 2003].

Ein zukünftiger Einsatz von HFKW bedeutet daher einen großen Rückschlag für den Klimaschutz, der durch geeignete Maßnahmen verhindert werden sollte.

Konstruktionsschaum (Isolierung von Kühlmöbeln, Warmwasserspeichern usw.) und Rohrdämmung

Bei der Herstellung von PUR- Konstruktionsschaumstoffen wird gänzlich auf den Einsatz von HFKW als Treibmittel verzichtet. Stattdessen wird für Warmwasserspeicher CO₂ und für Haushaltskältegeräte Pentan verwendet. Eine erneute Umstellung der Produktion auf HFKW ist aus Kostengründen wenig wahrscheinlich.

Für den Wärmeschutz großer Rohre (Fernwärme) werden ebenfalls PUR-Hartschaumstoffe eingesetzt. Das wichtigste Kriterium für diese Anwendung ist die Wärmebeständigkeit des Schaums. Die Wärmeleitfähigkeiten von vorisolierten Rohren, die mit Pentan geschäumt werden, sind mit denen von HFCKW-141b-geschäumten vergleichbar [Welte & Godthardt 2004]. Höhere Anforderungen an die Wärmedämmleistung können in der Regel durch ein Erhöhen der Dämmschichtdicke erreicht werden. Als Treibmittel werden in Deutschland zu 95 % Pentan und zu 5 % CO₂ verwendet [Bipro 2008].

Für die Herstellung von Dämmstoffen für Rohre außerhalb des Bereichs der Fern- und Nahwärme (Heizungen, Sanitärbereich, Anlagen- und Pipelinebau) kommt vorrangig CO₂ zur Anwendung. Hierbei werden zwar etwas schlechtere Dämmwerte erreicht, dafür ist der Herstellungsprozess wesentlich günstiger als beim Einsatz von HFKW, da CO₂ prozessbedingt entsteht und nicht extra hinzugefügt werden muss. Neben CO₂ wird geringfügig auch Pentan als Treibmittel verwendet. Ein Einsatz von HFKW erfolgt nach Expertenaussagen [Bipro 2008] im Bereich der Rohrschalendämmung zu etwa 1 %. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn erhöhte Anforderungen an die Stabilität und Druckfestigkeit sowie den Brandschutz (Baustoffklasse 1 unter Vermeidung von erhöhtem Flammenschutzmittel-Einsatz) gestellt oder aber niedrige Wärmeleitfähigkeiten bei gleichzeitig begrenztem Raumangebot gefordert werden. Hierzu ist allerdings festzustellen, dass hinsichtlich der Druckfestigkeit keine Unterschiede zwischen CO₂, Cyclopentan und dem bis 2004 eingesetzten HFCKW-141b bestehen. Gleiches gilt für Cyclopentan und HFCKW-141b bezüglich der Wärmeleitfähigkeit [Welte & Godthardt 2004]. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass bei diesen Anwendungen aus technischer Sicht auch keine Gründe für den Einsatz von HFKW sprechen, die seit dem Verbot von HFCKW-141b als dessen Ersatz dienen.

Sandwichelemente, Verbundelemente

Die **kontinuierliche Fertigung** von ober- und unterseitig mit unflexiblen, metallischen Deckschichten beschichteten PUR-Dämmplatten wird von wenigen großen Herstellern dominiert. In Deutschland werden nahezu vollständig Pentan sowie in geringfügigen Mengen CO₂ zum Treiben der Schaumstoffe eingesetzt. Die Wärmedämmleistung von Pentan ist vergleichbar mit der von den in Frage kommenden HFKW (HFKW -245fa oder Mischungen, die neben dem HFKW-365mfc auch den HFKW-227ea enthalten können). Um

eine Verbesserung der brandtechnischen Eigenschaften zu erreichen, werden aktuell verstärkt PIR-Systeme hergestellt. Bei der Produktion von für den Export bestimmten Sandwich- bzw. Verbundelementen werden allerdings noch HFKW eingesetzt, um die teilweise sehr hohen Brandschutzanforderungen (z.B. in Frankreich, Großbritannien) kostengünstig erfüllen zu können [Bipro 2008].

Die **diskontinuierliche Produktion** von PUR-Dämmplatten mit metallischer Deckschicht ist eine Einzelfertigung, die zumeist in kleinen Betrieben oder Anlagen stattfindet. Zum Schäumen der Sandwichelemente wird hauptsächlich Pentan, aber auch CO₂ oder Butan verwendet. In etwa 30 % der diskontinuierlich produzierten Dämmplatten (etwa 50.000 m³) werden HFKW-245fa, HFKW-365mfc und HFKW-227ea als Treibmittel eingesetzt [Bipro 2008]. Der Einsatz von Pentan als Treibmittel bei diesem Verfahren ist aus technischer Sicht problemlos möglich. Der größte Hersteller in Deutschland hat seine Produktion vollständig auf Pentan umgestellt. Gegen eine Umstellung stehen vor allem wirtschaftliche Argumente, da beim Einsatz von Pentan - gerade im Bereich der diskontinuierlichen Produktion - verstärkt Vorkehrungen zum Schutz vor Explosionen getroffen werden müssen. Diese Umrüstungen sind mit hohen Investitionskosten verbunden, die insbesondere kleinere Betriebe ökonomisch nicht für vertretbar halten. Dem gegenüber stehen ein erheblich geringerer Verbrauch sowie vergleichsweise niedrige Treibmittelkosten bei der Verwendung von Pentan.

Insgesamt ergibt sich aus technischer Sicht keine Notwendigkeit, für die kontinuierliche oder die diskontinuierliche Herstellung von PUR-Dämmplatten mit metallischer Deckschicht HFKW statt Pentan als Treibmittel einzusetzen.

Blockschaum

Die Blockschaumherstellung wird meist in einem kontinuierlichen Verfahren durchgeführt. Die diskontinuierliche Produktion ist technisch möglich, aber von untergeordneter Bedeutung und wird in Deutschland nicht angewandt. Das Ziel ist jedoch nicht der Schaumblock an sich, sondern die Weiterverarbeitung zu komplexeren Formen oder Strukturen wie Formteilen oder Rohrschalen, die aus dem Block herausgeschnitten werden. Auch Platten mit einer Stärke von mehr als 180-200 mm werden aus Blockschaum hergestellt [Anhörung 2003].

Die wirtschaftliche Bedeutung der Blockschaumherstellung ist wesentlich geringer als die der Bandschaumproduktion. Zudem ist sie mit höheren Emissionen verbunden, weil durch die Schneidevorgänge auch viele Schaumstoffzellen zerstört und die enthaltenen Treibmittel freigesetzt werden.

Grundsätzlich ist der Einsatz von Pentan für Blockschaum Stand der Technik. Probleme bereitet jedoch das Erreichen höchster Brandschutzanforderungen bei gleichzeitig geringer Wärmeleitfähigkeit und geringer Plattenstärke. Zwar können auch mit CO₂ hohe

Brandschutzanforderungen erfüllt werden, die Wärmeleitfähigkeiten sind jedoch mit $0,04 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ vergleichsweise hoch. Daher wird für diesen Zweck hauptsächlich HFKW-365mfc ($0,022 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) in Verbindung mit CO_2 eingesetzt. Der Anteil der HFKW-haltigen Blockschaumstoffe liegt unter 5 % [Bipro 2008]. Für Anwendungen, bei denen besonders hohe Brandschutzanforderungen gelten, ist jedoch auch der Einsatz von Produkt-Alternativen wie z.B. Schaumglas möglich.

PUR-Ortschaum

Polyurethan-Ortschaum wird unmittelbar am Einsatzort durch Spritzen oder durch Gießen erzeugt und unterliegt dabei vielen Einflüssen. Beim Aufbringen von Ortschaum auf Flachdächer, Gebäudemauern und Lagertanks sind unter anderem die starken Schwankungen von Temperatur und Luftfeuchte zu berücksichtigen, die großen Einfluss auf die Qualität des Schaums haben.

Der Vorteil von Ortschaum ist, dass mit diesem Verfahren auch Oberflächen mit komplizierten Strukturen mit einer relativ gleichmäßigen Schaumstoffschicht überzogen werden können. Außerdem müssen keine großen Volumen von Schaumstoff, sondern lediglich die Rohstoffe und die Schäummaschine transportiert werden. Die Hauptanwendungsbereiche für Ortschaum sind die Hohlraum ausschäumung sowie die flächige Dämmung von Bauteilen und Profilen. Im Hochbau wird er vor allem für die Isolierung oder Sanierung von Flachdächern im Gebäudebestand eingesetzt. Ortschaum kann je nach Verfahren in Ortspritzschaum (Spritzschaum und Dachspritzschaum) oder Gießschaum unterteilt werden.

Die Anteile der als Treibmittel eingesetzten HFKW unterscheiden sich bei den Spritz- und Gießschäumen. Von den gespritzten Schäumen werden die Spritzschäume zu 100 % und die Dachspritzschäume zu 95 % mit HFKW geschäumt. Für die restlichen 5 % wird alternativ CO_2 verwendet. Bei den Gießschäumen beträgt der Anteil, der mit CO_2 geschäumt wird mehr als 95 %. Ansonsten kommen Mischungen von HFKW (als Stützgas) und CO_2 zur Anwendung. Die für die Schäumung von Ortschäumen relevanten HFKW sind HFKW-365mfc in Mischung mit HFKW-227ea und HFKW-245fa [Bipro 2008].

Das HFKW-freie Treibmittel Pentan ist aufgrund seiner hohen Entzündlichkeit keine Alternative. Beim Auftragen von Ortschäumen handelt es sich um offene Anwendungen, weshalb hierfür aus Sicherheitsgründen schwer entflammbare flüssige Treibmittel verlangt werden [Schwarz, Leisewitz 1999]. Insbesondere bei Innenverschäumungen ist Pentan ungeeignet, da sich in den Räumen schnell explosive Konzentrationen aufbauen können. Dieses Problem besteht jedoch bei CO_2 nicht, so dass hiermit ein HFKW-freies Treibmittel zur Verfügung steht [Bipro 2008].

Die Anwendung von Ortspritzschäumen unterliegt in hohem Maße dem Einfluss der Witterung. Da HFKW-geschäumte Spritzschäume diesbezüglich weniger empfindlich sind

und somit geringer zur Schrumpfung neigen, wird ihnen generell der Vorzug gegenüber CO₂-getriebenen Spritzschäumen gegeben. Diesen Schrumpfprozessen kann jedoch durch den Einsatz größerer Mengen CO₂-getriebener Schäume entgegengewirkt werden. Mit technischen Maßnahmen ist es möglich, Prozessschwankungen und die damit verbundenen Probleme einzuschränken, so dass ein Einsatz von HFKW unnötig wird.

Bei der Verwendung von CO₂ als Treibmittel erhöht sich die Gefahr eines Kernbrandes durch Wärmestau aufgrund der höheren Rohdichte sowie der vermehrten Schaummengen, die zum Erreichen einer besseren Wärmedämmung nötig sind. Laut Expertenaussagen sind Kernbrände bei sorgfältiger Arbeit allerdings vermeidbar [Bipro 2008].

Andere Isolierungen oder Wärmedämmstoffe stellen ebenfalls Alternativen dar (z.B. HFKW-freie PUR-Dämmplatten, Schaumglas). Bei Neubauten ist ihr Einsatz unproblematisch, bei bestehenden Gebäuden oder bei Flachdachsanierungen ist der Einsatz anderer Dämmsysteme jedoch häufig mit einem größeren Arbeitsaufwand verbunden.

Eine für PUR-Ortschaum vorgelegte Ökobilanz zeigt keinen eindeutigen Vorteil von HFKW-haltigen Treibmitteln [UBA 2002]. Insgesamt gesehen ist der Einsatz von PUR-Ortschaum mit HFKW-haltigen Treibmitteln verzichtbar, da alternative Produkte oder Verfahren bekannt und in der Praxis erprobt sind.

Kühlcontainer

Auf Grundlage der EG-Verordnung Nr. 2037/2000 [EG-Verordnung 2000] war die Einfuhr von Kühlcontainern in die EU seit dem 1. Januar 2004 verboten, wenn die verwendeten Dämmstoffe mit dem HFCKW-141b geschäumt und nach dem 31.12.2003 hergestellt worden sind [Wild 2008]. Seit Inkrafttreten der Verordnung (EG) Nr. 1005/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. September 2009 über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen [EG-Verordnung 2009] (Neufassung der Verordnung (EG) Nr. 2037/2000) ist die Einfuhr von mit HFCKW-141b geschäumten Kühlcontainern in die EU generell verboten.

Inzwischen werden Kühlcontainer ausschließlich in China hergestellt. Hier unterliegt der HFCKW-141b jedoch bis 2013 keiner Kontrolle und ein vollständiger Ausstieg ist erst für 2030 vorgesehen [Wild 2008; WorldCargo News 2010]. Seit Ende 2009 beginnt man aber auch in China damit, eine Technologie einzusetzen, die Cyclopentan als Treibmittel verwendet. Somit ist es nun möglich, Kühlcontainer aus China zu beziehen, die frei von dem HFCKW-141b sind [WorldCargo News 2010].

Schlussfolgerungen

Insgesamt gesehen ist der Einsatz von HFKW als Treibmittel für PUR-Hartschäume nicht notwendig. Mit Pentan oder prozessbedingtem CO₂ stehen aus technischer Sicht geeignete Alternativen als Treibmittel zur Verfügung, deren Einsatz für die überwiegende Mehrzahl der Anwendungen zu gleichwertigen Ergebnissen führt. Für die wenigen Ausnahmen, bei denen der Einsatz von HFKW eine technische Begründung hat, sind alternative Produkte erhältlich, die gut eingeführt und in der Praxis erprobt sind. Eine mögliche Alternative stellt ein neuartiges Dämmsystem für die Innendämmung von Außenwänden dar. Dieses besteht aus einer Kombination aus Steinwolle und Aerogel und erreicht den Herstellerangaben zufolge eine Wärmeleitfähigkeit von 0,019 W/(m*K) bei einer Dämmstoffdicke von 40 mm [Rockwool 2010].

4.2 PUR-Weichschäume

Weichschäume unterscheiden sich von den Hartschaumstoffen dadurch, dass sie sich bei Druckbelastung leicht verformen lassen. Polymer-Basis für Weichschäume sind in den meisten Anwendungsfällen Polyurethane. Weichschäume haben ein sehr breites Anwendungsspektrum: es reicht von Kissen und Matratzen über Schaumpolster im Möbelsektor oder für den Automobilbau bis hin zu Spielwaren, Sportartikeln, Schall-Absorbern oder Verpackungsmaterialien. Weichschäume sind offenzellige Schaumstoffe mit homogener Struktur, guten Rückstelleigenschaften und auch guten akustischen Dämpfungseigenschaften.

Bereits seit 1990 wurden Verfahren entwickelt und erprobt, die eine Herstellung von PUR-Weichschäumen ohne den Einsatz von FCKW ermöglichen. Beispielhaft hierfür ist das VPF-Verfahren (**V**ariable-**P**ressure-**F**oaming-Verfahren), dessen Entwicklung durch das Investprogramm des Bundesumweltministeriums zur Verminderung von Umweltbelastungen gefördert wurde. Bei diesem Schäumverfahren wird in einer vollkommen geschlossenen Produktionsanlage der atmosphärische Druck so weit gesenkt, dass das bei der Reaktion von Isocyanat und Wasser entstehende CO₂ als Treibmittel ausreicht, um PUR-Weichschäume mit Raumgewichten ab 11 kg/m³ (von 10 kg/m³ bis 70 kg/m³ Rohdichte) herstellen zu können. Ein Einsatz weiterer physikalischer Treibmittel ist nicht erforderlich. Die Produktion unter definiert atmosphärischen Bedingungen erlaubt es zudem, den Rohstoffeinsatz zu optimieren und die Qualität der Produkte zu verbessern. In der Demonstrationsanlage konnte der Abluftstrom, der bei normalen Schäumverfahren zwischen 80.000 m³/h und 100.000 m³/h betrug, auf 6.000 m³/h verringert werden.

Schlussfolgerungen

In der Diskussion um HFKW als Treibmittel spielen PUR-Weichschäume keine Rolle: Sie werden mit prozessbedingtem CO₂ aus der Reaktion mit Wasser getrieben. Bereits seit dem Verzicht auf FCKW werden in Deutschland keine halogenierten Treibmittel für Weichschäume mehr eingesetzt, und es bestehen auch keine technischen Gründe oder andere Überlegungen für den Einsatz von HFKW.

4.3 PUR-Integralschäume

Integralschäume oder Strukturschaumstoffe sind nach DIN 7726 [DIN 1982] Schaumstoffe, die zwar über den gesamten Querschnitt chemisch identisch sind, deren Dichte von außen nach innen aber kontinuierlich abnimmt. Typisch für Integralschäume sind ein weicher Kern und eine nahezu massive Randzone mit einer kompakten geschlossenen Außenhaut.

Die Herstellung von PUR-Integralschäumen erfolgt durch eine Formverschäumung, die unter dem Namen RIM (**R**eaction **I**njection **M**oulding) bekannt geworden ist. Bei dieser wird das zu verschäumende Reaktionsgemisch unter Hochdruck vermischt und in flüssiger Form in kalte Formen eingebracht, die es nach Beendigung der Verschäumungsreaktion vollständig ausfüllt. Die chemische Reaktion findet also im Werkzeug statt. Das beim Verschäumungsprozess eingestellte Temperaturgefälle vom Formeninneren zur Formenwand bewirkt eine unterschiedliche Ausdehnung des verdampfenden Treibmittels über den Formenquerschnitt und damit die Dichteunterschiede, die zu der beschriebenen Struktur von Integralschäumen führen. Dabei lässt sich durch die Wahl der Reaktionsbedingungen ein weiterer Bereich von Härtegraden abdecken (Hart-Integralschäume, halbharte Integralschäume, flexible Integralschäume).

Weiterentwicklungen oder Spezialverfahren des RIM sind das RRIM (**R**einforced **R**eaction **I**njection **M**oulding) und das SRIM (**S**tructural **R**eaction **I**njection **M**oulding). Beim RRIM werden die Flüssigkomponenten mit Feststoffen (z. B. Glaskugeln oder künstlichen Mineralfasern) vermengt. Beim SRIM werden Verstärkungsmatten (z. B. aus Glasfasern) in das Formwerkzeug eingelegt, die dann zum Verbundwerkstoff ausgehärtet werden. Diese im Materialgefüge eingebetteten Verstärkungen verbessern die mechanischen Eigenschaften der Kunststoffteile.

Auch Integralschäume werden vielfältig angewandt:

- Möbelherstellung (Sitz- und Formpolster)
- Fahrzeugindustrie (Sitz- und Formpolster; Armlehnen, Kopf- und Fußstützen; Schutzpolster; Schaltknäufe, Armaturenbretter usw.,
- Schuhe und Sportartikel (Sohlen, Dämpfungselemente, Schutzpolster),

- Koffer und Werkzeugeinsätze,
- Elektrogeräte (insbesondere Hart-Integralschäume),
- Formteile in vielen weiteren Anwendungen.

Bei den PUR-Integralschaumstoffen liegt der Fokus weniger auf der Dämmeigenschaft als auf dem Treibverhalten des Treibmittels. Für einen guten Schaumdichteverlauf sind Treibmittel mit einem geringen Dampfdruck ideal. Daher kommen hierfür die fluorierten Treibmittel HFKW-365mfc (auch in Mischung mit HFKW-227ea), HFKW-134a sowie HFKW-245fa zur Anwendung. Die gewünschten Eigenschaften (Bruchsicherheit, Stabilität, lange Haltbarkeit) können jedoch auch mit Pentan erreicht werden. Eine weitere Alternative ist das prozessbedingte Treibmittel CO₂.

Minderungsmöglichkeiten

Nach dem Verbot des Einsatzes von FCKW werden für (Hart- und Halbhart-) Integralschäume neben Pentan und dem prozessintegrierten Treibmittel CO₂ heute die fluorierten Treibmittel HFKW-365mfc (auch in Mischung mit HFKW-227ea), HFKW-245fa sowie HFKW-134a als Treibmittel eingesetzt. Technisch lassen sich mit Pentan oder CO₂ alle geforderten Qualitäten von Integralschäumen herstellen; die notwendige Technologie ist verfügbar [Anhörung 2003]. In Österreich ist bereits seit Juli 2003 der Einsatz von fluorierten Treibmitteln zur Produktion von Integralschäumen verboten [Bipro 2008].

Schlussfolgerungen

Der Einsatz von HFKW zur Herstellung von Hart-Integralschäumen oder Halbhart-Integralschäumen ist aus technischer Sicht nicht notwendig.

Für den Pentan-Einsatz besteht eine Investitionsbarriere und keine technische Barriere: die Sicherheitsanforderungen an die Produktion mit Pentan sind in den vielen kleinen und mittleren Betrieben, die Integralschäume herstellen und verarbeiten, aus wirtschaftlichen Gründen nicht ohne Probleme umzusetzen. Wenn aus wirtschaftlichen Gründen Pentan nicht eingesetzt werden kann oder soll, steht als Treibmittel-Alternative das Verfahren mit prozessbedingtem CO₂ aus der Reaktion mit Wasser zur Verfügung.

4.4 Montageschaum

PUR-Montageschaum wird von Handwerkern und Heimwerkern für viele Anwendungen vor allem beim Innenausbau von Gebäuden genutzt. Zu den wichtigsten Anwendungsgebieten zählen:

- das Ausfüllen von Fugen zwischen Tür- und Fensterrahmen,
- das Ausfüllen verschiedener Hohlräume und
- das Abdichten von Rollladenkästen [Schwarz, Leisewitz 1996].

Der Großteil der verwendeten Montageschäume ist einkomponentig. Die Verarbeitung erfolgt entweder mit einer einfachen Aerosoldose oder mit einer auf die Dose aufgesetzten Montagepistole. Daraus ergeben sich zwar keine Unterschiede in den Anwendungsmöglichkeiten, jedoch erlauben die Pistolenschäume ein genaueres Arbeiten. Das Austreiben von einkomponentigem Schaum aus der Dose erfordert ein physikalisches Treibmittel. Dieses trägt aber nicht zur isolierenden Wirkung des PUR-Schaums bei. Dieses Treibmittel emittiert zum größten Teil während der Applikation, ein geringer Teil verbleibt für maximal ein Jahr im Schaum [Schwarz, Leisewitz 1999; Harnisch, Schwarz 2003].

Alternativ können zweikomponentige Schäume verwendet werden, die kein extra Treibmittel benötigen, sondern durch die Mischung der beiden Komponenten und die dadurch hervorgerufene chemische Reaktion ausgetrieben werden. Sie kommen aber nur in Frage, wenn der gesamte Doseninhalt bei einer Anwendung zügig verbraucht werden kann. Bereits nach wenigen Minuten erfolgt sonst die Aushärtung des Schaums in der Dose. Grundsätzlich ist die Substitution von Montageschäumen auch durch andere Materialien und Techniken möglich. Dies wird wegen der Ausrichtung dieses Berichts auf die Treibmittelproblematik nicht betrachtet.

Der Markt für PUR-Schaum-Dosen ist konjunkturabhängig und wird stark von Import und Export bestimmt. Von den etwa 20 Millionen im Jahr 2002 deutschlandweit verkauften Dosen wurden 13 bis 14 Millionen importiert, obwohl die inländische Produktion 33 Millionen betrug [AKPU 2003a].

Verbrauchte PUR-Schaumdosen können seit 1993 über die P.D.R. („Produkte Durch Recycling“)² in Thurnau dem Recycling zugeführt werden. Seit ihrer Gründung hat die P.D.R. ein flächendeckendes Sammel- und Rückholsystem aufgebaut. Die Rückholung erfolgt ohne zusätzliche Kosten, da diese bereits im Kaufpreis der Dosen enthalten sind [PDR 2003].

² Ehemals: „Polyurethan Dosen Recycling“.

Seit der vollständigen Abwendung von chlorhaltigen Treibmitteln werden in Deutschland Gemische aus - leicht entzündlichen - Kohlenwasserstoffen (Propan, Butan, Dimethylether) und - nicht oder schwer brennbaren - HFKW (134a oder 152a) eingesetzt.

Die HFKW-Emissionen aus Montageschäumen betrugen im Jahr 2007 etwa 470 t. Damit sind die Emissionen aus dieser Anwendung gegenüber dem Jahr 2002 mit 720 t um 65 % zurückgegangen. Der Anteil an den HFKW-Gesamtemissionen betrug etwa 6,7 % [NIR 2009].

Minderungsmöglichkeiten

Ab 1993 wurde der Anteil an leichtentzündlichen Treibmitteln pro 750-ml-Dose mittels einer freiwilligen Vereinbarung mittel- und westeuropäischer Abfüller auf 50 g pro 750-ml-Dose beschränkt (50-g-Regel). Im Jahr 2002 wurde dies zu einer 100-g-Regel erweitert [AKPU 2003b]. Insgesamt enthalten die Schaumdosen 16 bis 18 Gewichts-% Treibmittel.

Seit dem 4. Juli 2008 ist nach Anhang II der Verordnung (EG) 842/2006 über bestimmte fluorierte Treibhausgase (F-GaseV) das Inverkehrbringen von Einkomponentenschäumen in der EU verboten [EG-Verordnung 2006]. Da diese Schäume (Montageschaum) als „Zubereitungen“ gelten, darf der Gesamtwert des Treibhauspotenzials (GWP) bis zu 150 betragen. Aus diesem Grund ist es weiterhin zulässig, dass das verwendete Treibmittel für Montageschaum nicht nur vollständig aus dem HFKW-152a (GWP 140) besteht, sondern auch bis zu 11,5 Masseprozent HFKW-134a (GWP 1300) enthält, sofern die anderen Gase kein nennenswertes Treibhauspotenzial besitzen. Weiterhin sind Ausnahmen zulässig, falls diese zur Einhaltung nationaler Sicherheitsnormen (zum Beispiel des Brandschutzes) erforderlich sind. Für Deutschland trifft ein solcher Ausnahmefall nur auf den Steinkohlenbergbau unter Tage zu [Schwarz 2009a]. Der deutliche Rückgang der HFKW-Emissionen aus Montageschaum kann als Ergebnis dieser Verordnung angesehen werden.

In Deutschland muss Montageschaum die Anforderungen der Baustoffklasse B2 nach DIN 4102-1 erfüllen, d. h. im Baubereich eingesetzte Materialien müssen „normalentflammbar“ sein [DIN 1998]. Dies ergibt sich aus den Mindestanforderungen nach der Musterbauordnung (MBO) oder den Landesbauordnungen (LBOs) an Materialien, die dauerhaft in baulichen Anlagen verwendet werden [DIBt 2003]. Für die Prüfung zur Einstufung in die Baustoffklasse B2 werden die Proben mindestens 14 Tage bei Normalklima gelagert, bevor sie einer Flammenprüfung unterzogen werden. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn bei keiner von fünf Proben die Flamme innerhalb von 20 s eine 150 mm-Marke erreicht (Beflammungsdauer: 15 s). Bei der Prüfung zur Einordnung in die Baustoffklasse B1 („schwerentflammbar“) wird der Brand eines Gegenstandes in einem Raum simuliert. Dabei müssen die Brandausbreitung gering und Wärmeabgabe begrenzt sein (DIN 4102-1 [DIN 1998]). Diese und weitere höhere Brandklassen werden aber im Allgemeinen von Montageschäumen wegen des Ausgangsmaterials Polyurethan nicht

erreicht [DIBt 2003]. In die Klasse B3 werden alle brennbaren Baustoffe eingeordnet, die weder die Anforderungen für B1 noch B2 erfüllen (DIN 4102-1 [DIN 1998]).

DIN 4102-1 klassifiziert die Brennbarkeit des angewendeten Produktes - in diesem Fall also des ausgehärteten Schaums - nach zwei Wochen [DIN 1998]. Bezogen auf die Lebensdauer des Schaums, die theoretisch der des Gebäudes entspricht, kann die erhöhte Brandsicherheit durch den Einsatz von HFKW aber als gering eingestuft werden, da die Treibmittel nach maximal einem Jahr restlos aus dem ausgehärteten Schaum emittiert sind.

Die heute auf dem Deutschen Markt angebotenen Allzweckschäume sind generell frei von HFKW und erfüllen die Anforderungen der Baustoffklasse B2 [Schwarz 2009a]. Lediglich die relativ neuen Schaumspezifikationen Brandschutz-, Winter- und Megaschaum, welche bis zu 20 % der produzierten Dosen bei einzelnen Herstellern ausmachen, enthalten teilweise das Treibmittel HFKW-134a. Brandschutz- und Winterschaum haben in Deutschland einen Marktanteil von jeweils 1 %, Megaschaum einen Anteil von 18 %. Vor allem Brandschutzschaum verlangt aufgrund des hohen Gehaltes an Flammenschutzmitteln zur Erfüllung der Baustoffklasse B1 nach besonderen Treibmitteleigenschaften. Diese Baustoffklasse ist jedoch nach MBO und den LBOs nicht erforderlich, auf den Einsatz von HFKW-haltigen Brandschutzschaum sollte daher aus Klimaschutzgründen verzichtet werden.

Winterschaum ist nicht mehr von den bisherigen Mindesttemperaturen (+5 °C) abhängig, sondern kann noch bei -5 bis -10 °C verarbeitet werden. Megaschaum bedeutet, dass bei unverändert großer Dose bis zu 60 und mehr Liter Schaum statt maximal 45 Liter möglich sind bzw. mit kleinerer Dose das gleiche Schaumvolumen wie vorher erzielt werden kann. Dies vermindert für den Anwender die Zahl der Dosenwechsel bei der Verarbeitung bzw. erlaubt ihm das Arbeiten an schwer zugänglichen Stellen mit kleineren Dosen. Trotz der hier erläuterten höheren Anforderungen an das Treibmittel in Spezialschäumen bieten fünf der sieben Anbieter von Brandschutz- und Megaschaum in Deutschland nach eigenen Angaben diese Schäume ganz ohne HFKW an [Schwarz 2009a].

Für den *Do-it-Yourself*-Bereich hat die Mindesttemperatur für die Verarbeitung in der Regel keine Bedeutung. Die meisten Anwendungen erfolgen hier in Innenräumen oder bei höheren Außentemperaturen. Lediglich für den professionellen Bereich, wo eine Lagerung der Dosen im Bauwagen (auch im Winter) und eine Verarbeitung bei niedrigen Außentemperaturen erfolgen, spielt dieser Aspekt überhaupt eine Rolle [Henkel 2003].

Schlussfolgerungen

Die Verwendung von HFKW als Treibmittel in Montageschäumen ist unnötig. Der angebotene HFKW-freie Allzweck-, Brandschutz- und Megaschaum ist für jeden Anwendungsbereich vollkommen ausreichend, nur im Ausnahmefall Steinkohlenbergbau sind andere Spezialschäume mit HFKW erforderlich. Weiterhin besteht die Möglichkeit, zweikomponentige Schäume zu verwenden.

In Kapitel 4 verwendete Literatur

- AKPU - Arbeitskreis Polyurethanschäume (2003a): Persönliche Mitteilung Herr A. K. van der Rhee vom 2. Juli 2003.
- AKPU - Arbeitskreis Polyurethanschäume (2003b): Persönliche Mitteilungen Herr Peter Geboes im Juni 2003.
- Anhörung (2003): Gespräche zu fluorierten Treibhausgasen auf der Basis des Eckpunktepapiers und der hierzu im BMU eingegangenen Stellungnahmen zu den Anwendungsbereichen „stationäre Kälte- und Klimatechnik“ (28./29. Januar 2003), „mobile Kälte- und Klimatechnik (einschl. Transportisolierung)“ (30. Januar 2003), „Verschäumung (einschließlich Montageschaum)“ (12. Februar 2003), „SF₆ in Schaltanlagen“ (13. Februar 2003), „Halbleiterindustrie“ (13. Februar 2003) und „Sprayanwendungen, Feuerlöschmittel, sonstige Anwendungen“ (14. Februar 2003), Umweltministerium, Bonn.
- BASF - BASF SE Ludwigshafen (2010): Technische Informationen und allgemeine bauaufsichtliche Zulassung zu Styrodur C (XPS-Hartschaumstoffplatten). (www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de_DE/portal/show/content/products/foam/s/styrodur; 25.01.2010).
- BIPRO (2008): Stand des Einsatzes von halogenfreien Treibmitteln in Schäumen vor dem Hintergrund des Art. 10 (2) d) der Verordnung (EG) 842/2006. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 363 01 188, unveröffentlicht, Dessau-Roßlau: UBA.
- Buschkamp, Siegfried (2001): *Polyurethan (PUR)-Hartschaumstoff. Herstellung - Eigenschaften - Anwendungen*. Bayer AG, Leverkusen, Geschäftsbereich Polyurethane - Insulation, Technische Information Nr. 17/2001.
- DIBt - Deutsches Institut für Bautechnik (2003): Persönliche Mitteilung Herr Jan Speer im Juli 2003.
- DIN (1982): *Schaumstoffe; Begriffe und Einteilung*. DIN 7726, Ausgabe: Mai 1982, Berlin: Beuth.

- DIN (1998): *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen.* DIN 4102-1, Ausgabe: Mai 1998, Berlin: Beuth.
- DIN (2000): *Holzwohle-Leichtbauplatten und Mehrschicht-Leichtbauplatten als Dämmstoffe für das Bauwesen - Anforderungen, Prüfung.* DIN 1101, Ausgabe: Juni 2000, Berlin: Beuth.
- DIN (2001a): *Wärmedämmstoffe für Gebäude; Werkmäßig hergestellte Produkte aus extrudiertem Polystyrolschaum (XPS), Spezifikation.* DIN EN 13164, Ausgabe: Oktober 2001 (ersetzt durch DIN EN 13164: 2009), Berlin: Beuth.
- DIN (2002a): *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte.* DIN V 4108-4, Ausgabe: Februar 2002, Berlin: Beuth.
- DIN (2002b): *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden; Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe. Teil 10: Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe.* DIN V 4108-10, Ausgabe: Februar 2002, Berlin: Beuth.
- DIN (2009a): *Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus extrudiertem Polystyrolschaum (XPS), Spezifikation.* DIN EN 13164, Ausgabe: Februar 2009, Berlin: Beuth.
- DIN (2009b): *Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Polyurethan-Hartschaum (PUR), Spezifikation.* DIN EN 13165, Ausgabe: Februar 2009, Berlin: Beuth.
- DIN (2009c): *Harte Schaumstoffe – Bestimmung der Druckeigenschaften.* DIN EN ISO 844, Ausgabe: Oktober 2009, Berlin: Beuth.
- DOW - DOW Chemical Company (2010): Technische Daten und allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für Styrofoam, Roofmate, Floormate, Perimate, Wallmate. (<http://building.dow.com/europe/de/prod/tech/index.htm>; 25.01.2010).
- EckpPapier - Eckpunktepapier (2002): *Umsetzung des Nationalen Klimaschutzprogramms im Bereich der Fluorierten Treibhausgase (H-FKW FKW SF₆) - F-GASE.* Vom 30. September 2002.
(www.bmu.de/de/1024/js/download/b_eckpunktepapier_f_gase; 23.09.2003).
- EG-Verordnung (2000): *Verordnung (EG) Nr. 2037/2000 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. Juni 2000 über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen.* Amtsblatt der EG, L244 S. 1-24, zuletzt geändert durch *Verordnung (EG) Nr. 1804/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. September 2003*, Amtsblatt der EG, L265 S. 1-4.

- EG-Verordnung (2006): *Verordnung (EG) Nr. 842/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über bestimmte fluorierte Treibhausgase*. Amtsblatt der EG L161 S. 1-11.
- EG-Verordnung (2009): *Verordnung (EG) Nr. 1005/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. September 2009 über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen*. Amtsblatt der EG, L286 S. 1-30.
- Endres, Edmund; Kleser, Joachim. (2008): *Wärmedämmstoffe aus Polyurethan-Hartschaum. Herstellung – Anwendung – Eigenschaften*. IVPU Industrieverband Polyurethan-Hartschaum e.V. [Hrsg.], Stuttgart.
- FCKW-Verordnung (1991): *FCKW-Halon-Verbots-Verordnung - Verordnung zum Verbot von bestimmten die Ozonschicht abbauenden Halogenkohlenwasserstoffen*. Vom 6. Mai 1991, BGBl. I S. 1090-1092, zuletzt geändert am 29. Oktober 2001, BGBl. I S. 2785.
- GDI - GDI-Statistik (2006): Gesamtverband Dämmstoffindustrie, Baumarktstatistik 1996 - 2005.
- Jackon (2010): Technische Daten und allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für „Jackodur“. (www.jackon-insulation.com/index.php?id=540&no_cache=1; 25.01.2010).
- Hammond Suddards Edge (2002): *DRMI HCFC-Project: Country Reports*. London, Great Britain: Hammond Suddards Edge, Commercial & IP Department.
- Hanno - Hanno-Werk GmbH (2003): Technische Merkblätter. (www.hanno.at; 20.05.2003).
- Harnisch, Jochen u. a. (2003): *Risiken und Nutzen von fluorierten Treibhausgasen in Techniken und Produkten unter besonderer Berücksichtigung der stoffintrinsic Eigenschaften*. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 201 64 315, noch nicht veröffentlichter Entwurf, Köln/Nürnberg: Ecofys GmbH.
- Harnisch, Jochen; Schwarz, Winfried (2003): *Final Report on the Costs and the Impact on Emissions of Potential Regulatory Framework for Reducing Emissions of Hydrofluorocarbons, Perfluorocarbons and Sulphur Hexafluoride*. Studie im Auftrag der Europäischen Kommission (GD Umwelt), Nürnberg: Ecofys GmbH, Öko-Recherche.
- Henkel - Henkel KGaA (2003): Mitteilungen Herr Werner Haller im Juni und September 2003.
- IFA - Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (2010): GESTIS-Stoffdatenbank (Gefahrstoffinformationssystem). (<http://biade.itrust.de/biade/lpext.dll?f=templates&fn=main-hit-h.htm&2.0>; 18.01.2010).

- IVPU - Industrieverband Polyurethan-Hartschaum e.V. (2004): *Harmonisierung der Dämmstoffnormen in Europa – Auswirkungen auf den deutschen Markt*. (www.ivpu.de/harmonisierung.htm; 20.01.2004).
- Kapps, Manfred; Buschkamp, Siegfried (2004): *Herstellung von Polyurethan (PUR)-Hartschaumstoff*. Bayer MaterialScience AG, Leverkusen, Insulation, Technische Information Nr. 6/2004.
- Meinl - Meinl GmbH (2003a): Persönliche Mitteilung Herr Wilhelm Meinl vom 18. Juni 2003.
- Meinl - Meinl GmbH (2003b): Artikelblätter der Wilhelm Meinl GmbH.
- NIR - Nationaler Inventarbericht Deutschland (2009): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2009. (http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/4771.php).
- NIR - Nationaler Inventarbericht Deutschland (2010): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2010. (http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/4771.php).
- PDR - Produkte durch Recycling (2003): Homepage P.D.R. (www.pdr.de; 16.07.2003).
- Rockwool (2010): Innendämmsystem Aerorock® ID. (www.aerowolle.de).
- Schwarz, Winfried (2003): *Emissionen und Emissionsprognose von H-FKW, FKW und SF₆ in Deutschland. Aktueller Stand und Entwicklung eines Systems zur jährlichen Ermittlung. Emissionsdaten bis zum Jahr 2001 und Emissionsprognosen für die Jahre 2005, 2010 und 2020*. 1. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben, erstellt im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 202 41 356. Berlin: UBA, (www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/treibhausgase.htm; 30.12.03).
- Schwarz, Winfried (2004): *Emissionen, Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren von fluorierten Treibhausgasen (F-Gase) in Deutschland für die Jahre 1995-1998. Anpassung an die Anforderungen der internationalen Berichterstattung und Implementierung der Daten in das zentrale System Emissionen (ZSE)*. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 201 41 261/01, unveröffentlicht, Frankfurt/Main: Öko-Recherche.
- Schwarz, Winfried (2009a): *HFKW-haltige Treibgase in PUR-Montageschaum. Bewertung der Emissionsreduktionspotenziale von Montageschäumen im Hinblick auf eine Konkretisierung der Regelungen nach § 9(1) der Verordnung (EG) 842/2006*. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 363 01 196, Frankfurt/Main: Öko-Recherche.

- Schwarz, Winfried (2009b): *Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland 2006 und 2007. Inventarermittlung 2006/2007 (F-Gase). Daten von HFKW, FKW und SF₆ für die nationale Berichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für die Berichtsjahre 2006 und 2007 sowie Prüfung der Datenermittlung über externe Datenbanken.* Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 202 42 300, Frankfurt/Main: Öko-Recherche.
- Schwarz, Winfried; Leisewitz, André (1996): *Aktuelle und künftige Emissionen treibhauswirksamer fluorierter Verbindungen in Deutschland.* Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 106 01 074/01, Frankfurt/Main: Öko-Recherche.
- Schwarz, Winfried; Leisewitz, André (1999): *Emissionen und Minderungspotential von HFKW, FKW und SF₆ in Deutschland.* Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 298 41 256, Frankfurt/Main: Öko-Recherche. (www.umweltbundesamt.de/luft/emissionen/f-und-e/abgeschlossen/index.htm; 30.12.2003).
- UBA - Umweltbundesamt (1989): *Verzicht aus Verantwortung: Maßnahmen zur Rettung der Ozonschicht.* UBA-Berichte 7/89, Berlin: Erich-Schmidt.
- UBA - Umweltbundesamt (2002): *Stellungnahme zu den Ökobilanzen „Stromversorgung unter Nutzung der SF₆-Technologie“ und „HFC-365mfc as blowing and insulation agent in polyurethane rigid foams for thermal insulation“ der Solvay Fluor und Derivate GmbH.* Berlin: UBA.
- UNEP - United Nations Environment Programme (1998): *Flexible and Rigid Foams Technical Options Report.* Nairobi: UNEP/Ozone Secretariat.
- UNEP - United Nations Environment Programme (2003): *2002 Report of the Flexible and Rigid Foams Technical Options Committee - 2002 Assessment.* Nairobi: UNEP/Ozone Secretariat.
- UNEP - United Nations Environment Programme (2006): *Report of the Rigid and Flexible Foams Technical Options Committee - 2006 Assessment.* Nairobi: UNEP/Ozone Secretariat.
- URSA - URSA Deutschland GmbH (2010): Technische Daten und allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für „URSA FOAM“, (http://www.ursa.de/_files/DB_XPS_Alle.pdf; 25.01.2010).
- Walter, Robert. (2004): *Stand der europäischen Normung für PUR-Hartschaumstoffe im Bauwesen.* Bayer MaterialScience AG Leverkusen, Insulation, Technische Information Nr. 08/2004.

- Welte, Rainer; Godthardt, Lutz-P. (2004): *Polyurethan (PUR)-Hartschaumstoff zur Dämmung von Rohrleitungen*. Bayer MaterialScience AG Leverkusen, Insulation, Technische Information Nr. 07/2004.
- Wild, Yves. (2008): *Ban on the use of ozone depleting blowing agents*. Vortrag am 2.7.2008 auf der CooLogistic Conference, 1.-2.7.2008, London.
- WorldCargo News (2010): *Green wind of change blows at MCIQ*. Band 17, Nr. 3, 2010, S. 37.

5 HFKW als Treibgas in technischen und anderen Aerosolen

Bis zur Entdeckung der Ozonschicht zerstörenden Wirkung von FCKW und den daraus gezogenen Konsequenzen war die Aerosolbranche Hauptverbraucher dieser Stoffgruppe. FCKW fanden Anwendung in medizinischen Sprays (Dosieraerosolen) oder Sprays für technische und nicht-technische Anwendungen. Zu den Sprays für technische Anwendungen gehören auch Montageschäume, die in Kapitel 4.4 behandelt werden. Sprays für vorrangig nicht-technische Anwendungen wurden im Jahr 1999 zu 75 % im Bereich Kosmetik oder im Haushalt eingesetzt [Schwarz, Leisewitz 1999]. Heute werden hier als Treibgase fast ausschließlich Propan, Butan oder Dimethylether, zu geringen Anteilen auch HFKW, eingesetzt. Außerdem sind treibgasfreie Produkte wie beispielsweise Pumpsprays auf dem Markt.

Außer in medizinischen Sprays finden bzw. fanden HFKW Anwendung in Kältesprays, Druckluftsprays, Insektizidsprays (Kammerjäger), Schmiermittelsprays, Haarsprays, Abwehrsprays (Pfeffersprays), Gefäßfüllern/Druckausgleichsbehältern von Heizungen, Rohr-Vereisern, Signalhörnern, „Novelties“ (Luftschlangensprays, Schneesprays etc.) und Abflussreinigern [IG Sprühtechnik 2003].

Als Treibgas in Aerosolen werden in Deutschland jährlich etwa 400 t HFKW abgefüllt. Zwei Drittel gingen im Jahr 2007 in medizinische Aerosole [CRF 2009]. Insgesamt gingen im Jahr 2003 etwa 2,2 % der HFKW-134a-Verwendungsmengen Europas in nicht-medizinische Sprays [IG Sprühtechnik 2003].

In der Anwendung als Treibgas sind die Emissionen der Verwendung gleichzusetzen („offene Anwendung“). Wegen des in großem Umfang stattfindenden Ex- und Imports der Produkte emittieren die Treibgase jedoch nicht zwangsläufig im Herstellungsland der Produkte. In Abbildung 5.1 ist die Aufteilung der HFKW-Emissionen auf die verschiedenen Anwendungsbereiche für das Jahr 2002 wiedergegeben. Insgesamt waren Aerosole im Jahr 2007 nach der stationären und mobilen Kälte und den Schäumen die drittgrößte HFKW-Emissionsquelle in Deutschland [NIR 2009]. Wegen des relativ spät vollzogenen FCKW-Ausstiegs sind die aus medizinischen Sprays resultierenden Emissionen seit 1995 erst langsam, aber kontinuierlich gestiegen. Bei den medizinischen Sprays geht das Umweltbundesamt bis zum Jahr 2010 und darüber hinaus von einem weiteren Anstieg der HFKW-Emissionen aus [Schwarz 2003a]).

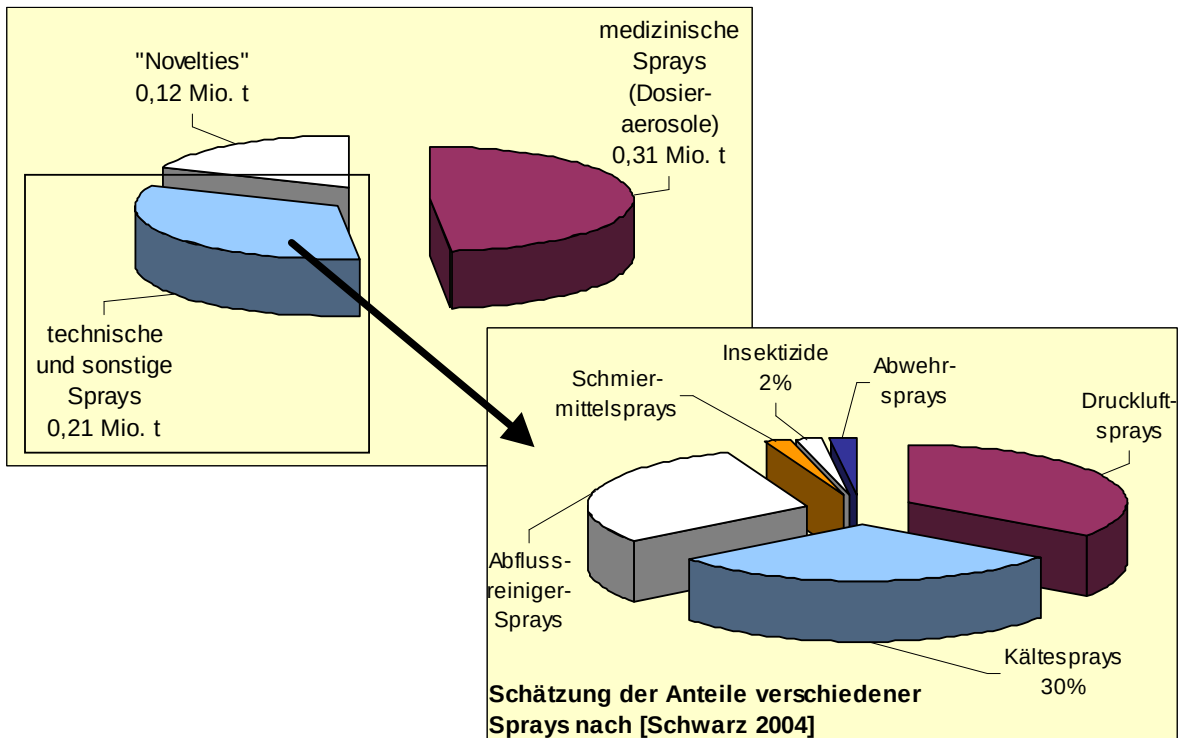


Abbildung 5.1: HFKW-Emissionen aus der Anwendung als Treibgas in verschiedenen Sprays/Aerosolen im Jahr 2002 in Deutschland in Mio. t CO₂-Äquivalente. Daten aus: [Schwarz 2004; BReg 2004].

Grundsätzlich sind die Kosten für Kohlenwasserstoffe (oder für andere halogenfreie Treibgase) geringer als für HFKW. Damit kommt es beim Ersatz von HFKW zu Kosteneinsparungen. Dies führte in vielen Bereichen - trotz der einmalig erforderlichen Investition für Explosionsschutzmaßnahmen am Produktionsstandort - zum breiten Einsatz von Kohlenwasserstoffen, insbesondere als Treibgas.

In allen für diesen Anwendungsbereich vorliegenden Kostenbetrachtungen kommen die Autoren durchweg zu negativen CO₂-Vermeidungskosten, also zu Kosteneinsparungen, für den Fall einer HFKW-Substitution. Als eine Quelle kann Harnisch und Schwarz [2003] genannt werden. Da diese Aussage für alle nachfolgend dargestellten Produkte gilt, wird in den folgenden Kapiteln keine separate Kostenbetrachtung vorgenommen. Einzige Ausnahme stellen Produkte dar, in denen HFKW nicht vollständig durch halogenfreie Treibgase wie Kohlenwasserstoffe ersetzt werden können, z. B. medizinische Sprays.

5.1 *Technische Sprays*

Dem Begriff technische Sprays werden hier Kälte- und Druckluftsprays, Schmiermittelsprays und Rohr-Vereiser (Pipe-Freezer) zugeordnet. In Einzelfällen werden hier der HFKW-134a oder - seltener - der HFKW-152a eingesetzt. Bezüglich der Emissionen wird auf Abbildung 5.1 verwiesen.

5.1.1 **Kälte- und Druckluftsprays**

Druckluftsprays werden bei Servicetätigkeiten an elektronischen Geräten wie Fotokopierern, Rundfunk- und Fernsehgeräten sowie sonstigen Anlagen mit sensibler Elektronik [IG Sprühtechnik 2003] wie auch Schaltschränken zum Wegblasen von Staub eingesetzt [Schwarz, Leisewitz 1999]. Diese Druckluftsprays enthalten keine komprimierte Luft, sondern häufig noch einen komprimierten HFKW [Zürich 2006].

Kältesprays werden zur Prüfung (Fehlerlokalisierung) an elektronischen Anlagen/Bauteilen verwendet [IG Sprühtechnik 2003]. Durch kurzfristiges lokales Abkühlen von Bauteilen unter Spannung lassen sich fehlerhafte Stellen (etwa in einem Fernsehgerät) einfacher identifizieren als im ausgeschalteten Zustand [Schwarz, Leisewitz 1999]. In diesen Bereichen wird wegen seiner schweren Brennbarkeit der HFKW-134a eingesetzt. Diese Produkte werden meist von Fachleuten, und damit im professionellen Bereich, verwendet [IG Sprühtechnik 2003].

Kältesprays werden auch außerhalb der Elektronikindustrie eingesetzt. Neben medizinischen Anwendungen kommen sie bei der Entfernung von Kaugummis, z. B. in Bussen und Kinos von den Sitzen, zum Einsatz [IG Sprühtechnik 2003]. Weitere Anwendungsbereiche sind das Testen von Temperaturfühlern und das kurzzeitige Abkühlen von Bauteilen vor dem Verlöten oder Montieren.

Sogenannte Kältesprays werden international auch für die Wartung von Kälteanlagen angeboten. Ihre Verwendung ist in Europa verboten, wenn sie für die Wartung, Instandhaltung oder Befüllung von Kälteanlagen, Klimaanlage, Wärmepumpen, Brandschutzsystemen oder Hochspannungsschaltanlagen verwendet werden. Dieses Verbot gilt für die Wartung von mobilen Klimaanlage auch dann, wenn das fluorierte Treibhausgas teilweise zum Austreiben eines anderen Stoffes aus dem Behälter dient.

Minderungsmöglichkeiten

Bei der Verwendung von brennbaren Stoffen wie Propan oder Butan ist die Möglichkeit gegeben, dass es durch die an solchen Geräten entstehenden Zündfunken zu einer Verpuffung/Explosion kommt [IG Sprühtechnik 2003; Meeh 1998]. Allerdings bietet die Industrie auch Produkte mit brennbaren Gasen an. Über ernste Unfälle mit Propan/Butan-Kältesprays ist nichts bekannt [Meeh 1998]. Auch für das Testen von Temperaturfühlern

und das Abkühlen von Bauteilen vor dem Verlöten oder Montieren bieten viele Hersteller inzwischen Kältesprays mit Propan und Butan an [z. B. Tes 2010, Wek 2010].

In Druckluftsprays ist auch der Einsatz anderer unbrennbarer, komprimierter Gase als HFKW möglich. In anderen Anwendungen, in denen komprimierte, aber nicht verflüssigte Gase als Treibgase eingesetzt werden, kann dies zu einer Verschlechterung der Austragungsqualität führen. Zur Staubentfernung ist dies nicht von Bedeutung. Als Gase kommen somit außer brennbaren Kohlenwasserstoffen z. B. auch Luft, CO₂ oder Stickstoff in Betracht.

5.1.2 Sonstige technische Sprays

Weitere Verwendung findet der HFKW-134a in sogenannten Pipe-Freezern (Rohr-Vereisern). Mit diesen Produkten werden Leitungsabschnitte heruntergefroren, um an partiellen Stellen Montagearbeiten durchführen zu können. Es handelt sich im Vergleich zu den o. g. Kältesprays nicht um Prüfinstrumente. HFKW werden hier aus Kostengründen als Kältemittel in einer offenen Anwendung eingesetzt [TUNAP 2003].

Zur Vereisung von Anlagenteilen können auch andere Gase, z. B. CO₂ (Trockeneis), eingesetzt werden. Entsprechende transportable Systeme werden auf dem Markt angeboten [UBA 2003b]. Auch Kälteklammern kommen zum Einsatz.

Ein weiteres Einsatzgebiet für HFKW in Sprays sind spezielle Schmiermittel, bei denen hohe Qualitätsanforderungen an die Ausbringung gestellt werden. Da diese Anwendungen meist bei hohen Umgebungstemperaturen stattfinden, wird die absolute Unbrennbarkeit des Produktes gefordert [IG Sprühtechnik 2003]. Da andere Treibgase aus Sicherheits- oder technischen Gründen nicht eingesetzt werden können, müsste zum Ersatz von HFKW auf andere Austragungstechniken zurückgegriffen werden. Diese stehen nach Aussage der IG Sprühtechnik [2003] heute nicht zur Verfügung und müssten somit erst entwickelt werden.

Schlussfolgerungen

In den meisten Fällen stehen für technische Sprays andere Techniken als der Einsatz von HFKW zur Erzeugung von Druckluft oder Kälte zur Verfügung. Besonders bei der Rohrvereisung stehen transportable Anlagen mit CO₂ und Kälteanlagen zur Verfügung. Ein Verzicht auf HFKW ist daher weitgehend möglich; Ausnahmen sollten im Einzelfall nachgewiesen werden.

5.2 Medizinische Sprays

Innerhalb medizinischer Anwendungen werden HFKW im Wesentlichen in Dosieraerosolen (Asthma-Sprays, MDIs) eingesetzt. In den meisten anderen medizinischen Sprays (Fußsprays, Hautsprays etc.) kommen HFKW hingegen nicht zum Einsatz. Die im Kapitel 5.1.1 dargestellten Kältesprays werden zu ca. 5-10 % auch im medizinischen Bereich

genutzt, zum Beispiel in der Zahnmedizin zur Vitalitätsprüfung von Zähnen [IG Sprühtechnik 2003].

Dosieraerosole dienen der Behandlung von Atemwegserkrankungen wie Asthma und COPD (chronic obstructive pulmonary disease). Zur feinverteilten Ausbringung des enthaltenen Wirkstoffes werden bei Dosieraerosolen Treibgase eingesetzt. Bis 1996 waren dies ausschließlich FCKW. Bis zum Jahr 1998 emittierten in Deutschland jährlich etwa 400 t FCKW aus dieser Anwendung [Schwarz, Leisewitz 1999].

Im Rahmen der Ausnahmeregelung für wesentliche Verwendungszwecke standen in Europa für Dosieraerosole gemäß der *EG-Verordnung Nr. 2037/2000* [EG-Verordnung 2000] immer noch FCKW zur Verfügung. In Deutschland hat das Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM) seit dem 01.01.2006 keine Ausnahmegenehmigungen nach § 2 Abs. 2 der *FCKW-Halon-Verbots-Verordnung* [FCKW-Verordnung 1991] für die Verwendung von FCKW in Arzneimitteln mehr erteilt [BfArM 2005]. Damit war Deutschland das erste Land, welches ganz auf FCKW in diesem Bereich verzichtet hat.

Therapeutika für Asthma und COPD werden in fünf Präparateklassen, die Gruppen A bis E, aufgeteilt. Für die Präparateklassen A und B (z.B. Budesonid, Beclomethason, Dexamethason, Flunisolid, Fluticason und Triamcinolon), die etwa 80 % dieser Arzneimittel ausmachen, ist der FCKW-Ausstieg in Deutschland seit Ende 2002 erreicht. Für die Präparateklassen C (Wirkstoff Nedocromil) bis E (z. B. Kombinationspräparate) gab es hingegen bis zu diesem Zeitpunkt noch keinen ausreichenden Ersatz [BfArM 2003]. Inzwischen stehen auch für diese Arzneimittel therapeutische Alternativen zur Verfügung.

Die Reformulierung der zahlreichen Arzneistoffe mit HFKW statt FCKW ist ein forschungs- und kostenaufwändiger Prozess. In Deutschland kam das erste Dosieraerosol mit HFKW als Treibgas im Jahr 1996 auf den Markt, in den Jahren 1997 und 1998 folgten je zwei, im Jahr 1999 eines. Alle enthielten den HFKW-134a [Schwarz, Leisewitz 1999]. Auch heute nutzen deutsche Hersteller ausschließlich diesen HFKW. International sind auch Dosieraerosole mit dem HFKW-227ea auf dem Markt, wobei der HFKW-134a bei den medizinischen Aerosolen favorisiert wird [IG Sprühtechnik 2003]. Bezüglich der Emissionen wird auf Abbildung 5.1 verwiesen.

Minderungsmöglichkeiten

Die Entwicklung von Alternativen mit halogenfreien Kohlenwasserstoffen als Treibgas, hier sind u. a. Propan oder iso-Butan zu nennen, wurde ebenfalls erwogen [Langen 1999]. Soweit bekannt, wird dies jedoch nicht länger verfolgt.

Eine treibgasfreie Alternative in der Asthma- und COPD-Therapie stellen Pulverinhalatoren (DPIs) dar. Während diese in den Skandinavischen Ländern bereits vor einigen Jahren einen Marktanteil von etwa 80 % hatten [March 2000], lag dieser im Jahr 2003 in Deutschland bei etwa 25 %. Heute stellen fast alle Hersteller von Dosieraerosolen auch Pulverinhalatoren

her. Die Pulverinhalation ist jedoch nicht für alle Patientengruppen geeignet [BfArM 2003]. So werden für die Therapie von Kleinkindern und älteren Menschen Dosieraerosole bevorzugt. Teilweise ist die Umstellung der Patienten von einem System auf das andere problematisch [IG Sprühtechnik 2003].

Mit einer Treibgasumstellung sind grundsätzlich hohe Kosten verbunden. Neben der aufwändigen Forschungs- und Entwicklungsarbeit sind zahlreiche Tests für die Zulassung des „neuen Arzneimittels“ erforderlich. Gleiches gilt auch für die Entwicklung von treibgasfreien Systemen (DPIs). Es sind einige Schätzungen zu Kosten und zu spezifischen CO₂-Vermeidungskosten vorgenommen worden. Beispielfhaft kann die Studie von March [2000] genannt werden. March [2000] schätzt die spezifischen Vermeidungskosten in der EU auf mehr als 500 € je Tonne CO₂. Durchschnittlich sind Kosten von 400 bis 500 € je Tonne CO₂ geschätzt, die aber in ihrer Höhe nicht unumstritten sind [ECCP 2000; ECCP 2001]. In diesen Kosten sind die höheren Kosten für das Arzneimittel (DPIs sind meist teurer als MDIs) und das Patiententraining (Umstellung) durch einen Arzt enthalten. Für Deutschland gibt March [2000] einen Kostenanstieg gegenüber MDIs von 38 % an. Eine Beurteilung der Kostenschätzungen ist schwierig. Zum einen, weil die Situation in den einzelnen Ländern extrem unterschiedlich ist. Aber auch vor dem Hintergrund, dass heute - im Gegensatz zum Jahr 2000 - fast alle Hersteller neben MDIs auch DPIs vermarkten.

Eine weitere Möglichkeit der Emissionsminderung stellt das Recycling der MDIs nach ihrem Gebrauch dar. Hierzu wäre zunächst ein Sammelsystem aufzubauen, z. B. in Apotheken. Vermieden werden kann aber nur die Emission des noch im MDI enthaltenen Treibgasrests. Im Rahmen der Maßnahmendiskussion auf europäischer Ebene ist diese Möglichkeit als „kosten-effektiv“ bewertet worden [ECCP 2001].

Schlussfolgerungen

Die Substitution von HFKW in Dosieraerosolen durch halogenfreie Treibgase wird derzeit von Herstellern nicht mehr verfolgt. Eine vollständige Umstellung aller Patienten auf Pulverinhalatoren (DPIs) ist nicht möglich. Auch sind DPIs etwas teurer.

Dennoch zeigen Daten aus anderen Ländern, dass ein größerer DPI-Anteil bei gleichzeitig guter Patientenversorgung möglich ist. Durch Information von Ärzten und Patienten könnte dazu beigetragen werden, dass auch in Deutschland mehr Patienten auf DPIs umgestellt oder von Beginn an mit DPIs versorgt werden.

5.3 Sonstige Sprays

Sonstige Sprays oder auch nicht-technische Sprays sind jene Sprays, die keiner der beiden zuvor dargestellten Produktgruppen zugeordnet werden können. Den Schwerpunkt bilden in dieser Produktgruppe die Haushalts- und Kosmetiksprays sowie sogenannte „Novelties“,

meist Party-Artikel wie beispielsweise Luftschlangensprays, aber auch künstlicher Schnee in Spraydosen. Bezüglich der Emissionen wird auf Abbildung 5.1 verwiesen.

5.3.1 Haushalts- und Kosmetiksprays

Zu den typischen im Haushalt und im Kosmetikbereich zu findenden Aerosolanwendungen zählen Deodorants in Sprayform, Haarsprays, Insektizidsprays, Schuhsprays etc.

Die in diesen Bereich fallenden Produkte waren klassische Einsatzgebiete für FCKW. Aber bereits im Jahr 1987 haben sich die deutschen Aerosolabfüller gegenüber der Bundesregierung verpflichtet, die verwendeten FCKW-Mengen stark zu reduzieren [UBA 1989]. Seit dem Jahr 1991 war die Verwendung von FCKW dann durch die *FCKW-Halon-Verbots-Verordnung* [FCKW-Verordnung 1991] verboten. Wegen des somit in Deutschland früh vollzogenen Ausstiegs aus der Verwendung von FCKW haben die Aerosolhersteller zunächst nicht auf die erst später entwickelten HFKW zurückgreifen können.

Daher ist der Einsatz von HFKW nur in Ausnahmefällen bekannt. So sind Abflussreiniger ein in den Konsumer-Bereich gehendes Produkt mit dem HFKW-134a. Sofern im Bereich Abflussreiniger auf ein Treibgas zurückgegriffen wird, muss ein unbrennbares, nicht giftiges Gas eingesetzt werden, da das Treibgas in die Kanalisationssysteme gelangen und dort zu explosiven oder giftigen Gasgemischen führen könnte [IG Sprühtechnik 2003].

Minderungsmöglichkeiten

In dem hier dargestellten Anwendungsbereich der Haushalts- und Kosmetikartikel haben Hersteller an Stelle der FCKW-haltigen Produkte zunächst Produkte mit halogenfreien Treibgasen (Kohlenwasserstoffe) oder Produkte mit alternativen Austragungstechniken (Pumpsprays, Deo-Roller etc.) entwickelt und auf den Markt gebracht. Treibgasfreie Systeme zum Sprühen (Pumpsprays) konnten sich bei den Kunden nicht durchsetzen. Heute sind brennbare Stoffe in diesen Produkten etabliert. Neben Kohlenwasserstoffen wurde zunächst auch Luft als Treibgas diskutiert [Koch 1991].

Damit stellt sich die Frage von Minderungsmöglichkeiten heute nur noch in sehr wenigen, Fällen. Bei Abflussreinigern ist die Notwendigkeit des Einsatzes treibgashaltiger Produkte nicht gegeben. HFKW dienen in dieser Anwendung nicht dem Ausbringen von Chemikalien, sondern wirken einzig durch den ihrerseits aufgebauten Druck. Die Wirkung ist somit eine rein mechanische. Neben chemischen Alternativen, die aus anderen Gründen problematisch sein können, stehen jedoch andere mechanische Lösungen in vielfältiger Form zur Verfügung.

Wie dargestellt, enthalten alle gängigen Haarsprays, Deodorants etc. heute gar keine oder halogenfreie Kohlenwasserstoffe als Treibgase. Damit ist die technische und wirtschaftliche Möglichkeit des Einsatzes weit weniger klimawirksamer Treibgase nachgewiesen.

Schlussfolgerungen

Der Einsatz von HFKW ist in Haushalts- und Kosmetiksprays nicht erforderlich.

5.3.2 Dekorationssprays und Partyartikel

Zu dieser Produktgruppe zählen z. B. Kunstschneesprays, Farbsprays mit Glimmer- oder Metalleffekten, künstliche Spinnweben, Schnee, Horntöne für Vergnügungen sowie Luftschlangensprays.

HFKW, vor allem der HFKW-134a, waren wegen ihrer Unbrennbarkeit vielfach eingesetzte Treibgase in diesem Produktbereich. Durch den Einsatz von HFKW konnte in der Produktion auf Explosionsschutzmaßnahmen verzichtet werden. Auch entfielen Sicherheitshinweise auf den Produkten.

Seit dem 04. Juli 2009 ist das Inverkehrbringen sogenannter „neuartiger Aerosole“ mit fluorierten Treibhausgasen durch die Verordnung (EG) 842/2006 [KOM 2006] verboten, wenn diese nach dem 04. Juli 2009 hergestellt wurden.

Im Eintrag 40 des Anhangs XVII der REACH- Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 ist auch der Einsatz von brennbaren Treibgasen in Produkten für Dekorations- und Unterhaltungszwecke, die in den Konsumer-Bereich gehen, untersagt. Dieses Abgabeverbot an den privaten Endverbraucher gilt nicht, wenn der Hersteller nachgewiesen hat, dass trotz enthaltener entzündlicher Bestandteile keine Entzündungsgefahr besteht [VIS 2008].

Da viele Produkte für Dekorationszwecke sowohl in den privaten Bereich gehen, als auch zu kommerziellen Zwecken gebraucht werden, ist die Regelung aus Sicht der Hersteller schwierig umzusetzen. So müsste zwischen Lacksprays zur Dekoration mit metallischen Glanzeffekten und Sprühlacken (Metallicglanz) für Kfz-Reparaturzwecke unterschieden werden [IG Sprühtechnik 2003; Harnisch, Schwarz 2003]. Letztere werden in sehr großen Stückzahlen vermarktet und enthalten brennbare Kohlenwasserstoffe als Treibgas. Hinzu kommt, dass die Einschränkung nur wenige Länder in Europa betrifft. In den USA, die in der Regel stringente Regelungen beim Einsatz von brennbaren Stoffen haben, ist der Einsatz von brennbaren Treibgasen in diesen Produkten zugelassen [Harnisch, Schwarz 2003].

Minderungsmöglichkeiten

Wie auch bei anderen Sprays führt der Einsatz brennbarer Treibgase (Kohlenwasserstoffe) wegen der hohen Preise für HFKW zu einer Kostensenkung [Harnisch, Schwarz 2003].

Schlussfolgerungen

Der Einsatz von HFKW in Dekorationssprays ist nicht erforderlich. Produkte mit Kohlenwasserstoffen sind auf dem Markt etabliert. Derzeit stehen europäische Richtlinien dem Einsatz von Kohlenwasserstoffen für Privatpersonen teilweise entgegen.

Da bei den hier als Party-Artikel bezeichneten Produkten weder die vollständige Austragung noch andere Qualitäten erforderlich sind (siehe Kapitel 5.3.4 und 5.3.5), sollte der Einsatz halogenfreier, nicht-brennbarer Gase oder alternativer Austragungstechniken möglich sein. Auch die klassische Papierluftschlange ist eine naheliegende Alternative.

5.3.3 Schallgeräte (Signalhörner)

Schallgeräte wie Signalhörner werden vor allem in der Schifffahrt, aber auch in anderen Bereichen zu Sicherheitszwecken benötigt. Während Schallgeräte auf einem Boot oder Schiff zum Anzeigen von Manövern, als Nebel- und Notsignale etc. gesetzlich vorgeschrieben sind, werden sie auch zweckentfremdet gebraucht, beispielsweise zu Sportveranstaltungen oder auf Partys [UBA 2003a; Goodmark 2003]. In Deutschland ist der Gebrauch von Signalhörnern in Stadien aus Schallschutz- und Sicherheitsgründen schon länger untersagt [Harnisch, Schwarz 2003]. Auch Signalhörner für Partyzwecken gehören zu den „neuartigen Aerosolen“ und sind europaweit seit dem 04. Juli 2009 durch die Verordnung (EG) 842/2006 verboten.

Bei Schallgeräten unterscheidet man je nach Antrieb und Art zwischen verschiedenen Geräten. Bei Fahrzeugen mit Maschinenbetrieb, ausgenommen Kleinfahrzeuge¹, sind nach § 4.01 der Binnenschiffahrtsstraßen-Ordnung (BinSchStrO) [1998] mechanisch betriebene Schallgeräte vorgeschrieben. Technische Anforderungen sind in der BinSchStrO und in der Binnenschiffahrtsuntersuchungsordnung (BinSchUO) [1988] festgelegt. Zu den technischen Anforderungen zählen der Schalldruckpegel und die Grundfrequenz. Bei den Kleinfahrzeugen wird nochmals zwischen Fahrzeugen kleiner 20 m und kleiner 12 m unterschieden.

In der Berufsschifffahrt werden wegen der vorhandenen Stromversorgung und den genannten Anforderungen elektronische Schallgeräte (Elektro-Kompressorsignalhörner und automatische Signalhörner) verwendet [BSH 2003; Befragung Fachhandel 2003]. In der Freizeitschifffahrt finden, da meist keine eigene Stromversorgung vorhanden ist, Glocken u. Ä. oder druckgasgetriebene Signalhörner Anwendung [Befragung Fachhandel 2003].

¹ Kleinfahrzeuge sind in §1.01 der BinSchStrO definiert als Fahrzeuge, deren Schiffskörper weniger als 20 m aufweist. Ausnahmen sind zu beachten. Es wird auf die BinSchStrO verwiesen.

Die auf Fahrzeugen > 12 m vorgeschriebenen Schallgeräte müssen baumustergeprüft sein [BinSchUO 1998; BSH 2003]. Dies sind Glocken u. Ä. und gasgetriebene Schallgeräte (Signalhörner) nicht. Fahrzeuge < 12 m sind nicht ausrüstungspflichtig [BSH 2003].

Während druckgasgetriebene Schallgeräte (z. B. Signalhörner) bereits ab etwa 6 Euro erhältlich sind, liegen die Preise für elektronische Schallgeräte oberhalb von 30 Euro [Befragung Fachhandel 2003].

Da Fahrzeuge < 12 m (Freizeitschiffahrt) nicht ausrüstungspflichtig sind, werden hier wegen ihres relativ geringen Preises bevorzugt Glocken u. Ä. oder druckgasgetriebene Schallgeräte eingesetzt. Eine Möglichkeit ist die Verwendung von Gas-Signalhörnern. Diese werden mit einem Flüssiggas betrieben und sind an eine austauschbare Gaskartusche angeschlossen. [Befragung Fachhandel 2003].

In den meisten Fällen ist das im Produkt enthaltene Gas nicht spezifiziert. In der Folge ist die Zusammensetzung in den meisten Fällen weder den Vertreibern noch den Nutzern dieser Signalhörner bekannt. Damit ist eine Unterscheidung zwischen HFKW-haltigen und HFKW-freien Produkten meist nicht möglich. Die Angaben auf dem Produkt beschränken sich meist auf „FCKW-frei“, „enthält umweltneutrales Gas“ oder „enthält nicht brennbares Gas“. In der Regel handelt es sich um den HFKW-134a [UBA 2003a]. Einige Hersteller halten den Einsatz des HFKW-134a zur Gewährleistung der Funktion für notwendig [IG Sprühtechnik 2003; Harnisch, Schwarz 2003].

Minderungsmöglichkeiten

Die Verwendung von Gas-Signalhörnern ist auf Fahrzeugen < 12 m zwar zulässig, aber nicht vorgeschrieben. Meistens werden - schon aus optischen Gründen - andere Schallgeräte, z. B. Schiffsglocken, eingesetzt. Es kann auch vollständig auf Geräte verzichtet werden. Gemäß BinSchStrO ist auch das Schlagen von Metall auf Metall (z. B. Metallstab auf Reling) zugelassen.

Nach Aussagen von Vertreibern der für die druckgasgetriebenen Signalhörner erforderlichen Gaskartuschen gibt es auch Produkte ohne HFKW auf dem Markt [Befragung Fachhandel 2003].

Mittels einer deutlichen Kennzeichnung der Produkte sollten Vertreiber und Nutzer in die Lage versetzt, die Umweltrelevanz der Treibgase zu erkennen und zwischen den verschiedenen Produkten zu wählen. Die bisherigen, das Druckgas betreffenden Kennzeichnungen suggerieren dem Kunden ein umweltgerechtes Produkt.

Schlussfolgerungen

In Schallgeräten kann auf den Einsatz von HFKW verzichtet werden.

Auf Fahrzeugen > 12 m ist die Verwendung von Gas-Signalhörnern nicht zugelassen. Auf Fahrzeugen < 12 m ist ihre Verwendung zwar möglich, aber nicht vorgeschrieben. Andere Schallgeräte können eingesetzt werden und sind üblich.

Die Verwendung von HFKW in Gas-Signalhörnern ist nicht erforderlich. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass Gas-Signalhörner hauptsächlich zweckentfremdet eingesetzt werden (Partys, Großveranstaltungen), wo sie inzwischen verboten sind.

5.3.4 Pfeffersprays

In Abwehrsprays (Pfeffersprays), wie sie von Polizei, Bundesgrenzschutz und KFOR-Truppen eingesetzt werden, wird ebenfalls der HFKW-134a eingesetzt. Technische Richtlinien fordern für diesen Bereich die absolute Unbrennbarkeit dieser Produkte. Auch muss eine definierte Sprühweite erreicht werden und die Einsatzbereitschaft des Produktes muss zu jedem Zeitpunkt (solange noch Wirkstoff in der Dose ist) gewährleistet sein. Beides kann nach Aussage der Hersteller derzeit technisch nur durch HFKW (134a) gewährleistet werden. Der HFKW-134a stellt als Treibgas eine Druckreserve und einen ausreichenden Druck sicher. Dies kann durch andere nicht brennbare Gase, wie Stickstoff, nicht erreicht werden [IG Sprühtechnik 2003].

5.3.5 Insektizide, Pflanzenschutzmittel etc.

Im Handel sind Insektizidsprays (zugelassen als Pflanzenschutzmittel) erhältlich, die als Vorratsschutzmittel eingesetzt werden. Hauptanwendungsbereich ist die Lebensmittelindustrie. Weiterhin werden HFKW-haltige Insektizidsprays von Kammerjägern z. B. zur Ausgasung von Räumen eingesetzt. Hierbei handelt es sich um sogenannte Dauersprüher (Selbstvernebelungsautomatismus), die in die Räume gestellt werden. Des Weiteren werden Insektizidsprays in sensiblen Bereichen wie z. B. in Flugzeugen eingesetzt, um das Einschleppen von Malaria oder anderen Krankheiten zu verhindern. Keine Verwendung finden HFKW in Insektizidsprays für den Hausgebrauch [IG Sprühtechnik 2003].

Die mit HFKW getriebenen Produkte sind auf der Kostenseite um den Faktor 5-8 teurer als HFKW-freie Produkte. Nach Auffassung der Hersteller und Vertreiber ist somit sichergestellt, dass diese Produkte nur in Anwendungen zum Einsatz kommen, in denen HFKW aus Sicherheitsgründen erforderlich sind [IG Sprühtechnik 2003].

Als Ersatz für HFKW wäre zwar CO₂ denkbar. Jedoch werden mittels CO₂ nicht die erforderliche Ausbringungsqualität und feine Verteilung des Wirkstoffes im Raum erreicht [Anhörung 2003].

Kohlenwasserstoffe werden wegen ihrer Brennbarkeit bisher nicht eingesetzt. Auch die Formulierung der Wirkstoffe (einschließlich Lösemittel) wird in Sprayaerosolen so gewählt, dass diese nach Möglichkeit nicht brennbar sind [Anhörung 2003].

In Kapitel 5 verwendete Literatur

Anhörung (2003): Gespräche zu fluorierten Treibhausgasen auf der Basis des Eckpunktepapiers und der hierzu im BMU eingegangenen Stellungnahmen zu den Anwendungsbereichen „stationäre Kälte- und Klimatechnik“ (28./29. Januar 2003), „mobile Kälte- und Klimatechnik (einschl. Transportisolierung)“ (30. Januar 2003), „Verschäumung (einschließlich Montageschaum)“ (12. Februar 2003), „SF₆ in Schaltanlagen“ (13. Februar 2003), „Halbleiterindustrie“ (13. Februar 2003) und „Sprayanwendungen, Feuerlöschmittel, sonstige Anwendungen“ (14. Februar 2003), Umweltministerium, Bonn.

Befragung Fachhandel (2003): Informationen/Mitteilungen vom Fachhandel im Zeitraum Juli/August 2003.

BfArM - Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (2003): Mündliche Mitteilung Frau Deicke vom 12. Februar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].

BfArM - Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (2005): *Bekanntmachung über die Zulassung und Registrierung sowie die Verlängerung der Zulassung von Arzneimitteln - Ausnahmen vom Verbot bestimmter die Ozonschicht abbauender Halogenkohlenwasserstoffe nach der FCKW-Halon-Verbots-Verordnung*. Vom 29. September 2005, Bonn: BfArM.

Binnenschiffverkehrsstraßen-Ordnung (BinSchStrO) (1998): *Verordnung zur Einführung der Binnenschiffverkehrsstraßen-Ordnung*. Vom 8. Oktober 1998 (BGBl. I S. 3148 und Anlageband sowie S. 3317 und BGBl. I 1999 S. 159), geändert durch Verordnung vom 26. Juni 2000 (BGBl. I S. 1018), durch Verordnung vom 28. Februar 2001 (BGBl. I S. 335), durch Verordnung vom 18. Dezember 2002 (BGBl. I S. 4569, 4574) und durch Verordnung vom 18. Dezember 2002 (BGBl. I S. 4580); *Anlage zur Verordnung zur Einführung der Binnenschiffverkehrsstraßen-Ordnung (BinSchStrO)*. (www.elwis.de; 15.9.2003).

Binnenschiffs-Untersuchungsordnung (BinSchUO) (1988): *Verordnung über die Schiffssicherheit in der Binnenschifffahrt*. Vom 17. März 1988, BGBl. I S. 237ff.

BReg - Bundesregierung (2004): *Berichterstattung der Bundesrepublik Deutschland gemäß Artikel 5, 7 und 8 des Kyoto-Protokolls der UN-Klimarahmenkonvention zu*

fluorierten Treibhausgasen an das Sekretariat der Klimarahmenkonvention im Jahr 2004.

(http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/3473.php).

BSH - Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrografie (2003): Persönliche Mitteilung Herr Brühl vom 16. September 2003.

CRF 2009: Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen, <http://www.umweltbundesamt.de/emissionen/publikationen.htm>

ECCP - European Climate Change Programme (2000): Arbeitsgruppentreffen der Arbeitsgruppe „Fluorierte Gase“ am 19. September 2000 zum Thema: Light Industrial Applications“, Brüssel.

ECCP - European Climate Change Programme (2001): *Final Report on the Working Group Industry, Work Item Fluorinated Gases*. Erarbeitet von Harnisch, Jochen und Gluckman, Ray im Auftrag der Europäischen Kommission, Brüssel.

EG-Verordnung (2000): *Verordnung (EG) Nr. 2037/2000 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. Juni 2000 über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen*. Amtsblatt der EG, L244 S. 1-24, zuletzt geändert durch *Verordnung (EG) Nr. 1804/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. September 2003*, Amtsblatt der EG, L265 S. 1-4.

EG-Verordnung (2009): *Verordnung (EG) Nr. 1005/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. September 2009 über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen*. Amtsblatt der EG, L286 S. 1-30.

FCKW-Verordnung (1991): *FCKW-Halon-Verbots-Verordnung - Verordnung zum Verbot von bestimmten die Ozonschicht abbauenden Halogenkohlenwasserstoffen*. Vom 6. Mai 1991, BGBl. I S. 1090-1092, zuletzt geändert am 29. Oktober 2001, BGBl. I S. 2785.

Goodmark (2003): Herstellerinformation. (www.goodmarkgroup.com; 9.9.2003).

Harnisch, Jochen; Schwarz, Winfried (2003): *Final Report on the Costs and the Impact on Emissions of Potential Regulatory Framework for Reducing Emissions of Hydrofluorocarbons, Perfluorocarbons and Sulphur Hexafluoride*. Studie im Auftrag der Europäischen Kommission (GD Umwelt), Nürnberg: Ecofys GmbH, Öko-Recherche.

IG Sprühtechnik (2003): Mündliche Mitteilung Herr Bröcker vom 12. Februar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].

- Koch, Robert (1991): *Treibgas Luft - Mit Handarbeit ist genügend Druck zur Erzeugung eines feinen Sprühnebels zu erzeugen*. In: Umweltschutz (Wien): Das Manager-Magazin für Ökologie und Wirtschaft, 1991 (2) 42-43.
- KOM - Europäische Kommission (2006): *Verordnung (EG) Nr. 842/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über bestimmte fluorierte Treibhausgase*. ABl. EG Nr. L161/1 vom 14.6.2006. (<http://www.umweltbundesamt.de/produkte/fckw/international.htm>)
- Langen, Ute (1999): *Die Anwendung der FCKW-Halon-Verbots-Verordnung auf Arzneimittel*. Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte, In: Bundesgesundheitsbl – Gesundheitsforsch – Gesundheitsschutz, Berlin: Springer.
- March - Enviro March (2000): *Study on the use of HFCs for metered dose inhalers in the European Union*. Final Report.
- Meeh (1998): *Sichere Kältesprays*. In: rfe Radio, Fernsehen, Elektronik, 1998 (5) 49.
- Richtlinie 76/769/EWG (1976): *Richtlinie 76/769/EWG des Rates vom 27. Juli 1976 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten für Beschränkungen des Inverkehrbringens und der Verwendung gewisser gefährlicher Stoffe und Zubereitungen*. ABl. EG L 262 vom 27.9.1976 S. 201.
- Richtlinie 94/48/EG (1994): *Richtlinie 94/48/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Dezember 1994 zur dreizehnten Änderung der Richtlinie 76/769/EWG zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten für Beschränkungen des Inverkehrbringens und der Verwendung gewisser gefährlicher Stoffe und Zubereitungen*. ABl. EG Nr. L 331 vom 21.12.1994, S. 7. (<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31994L0048:DE:NOT>).
- Schwarz, Winfried (2003a): *Emissionen und Emissionsprognose von H-FKW, FKW und SF₆ in Deutschland. Aktueller Stand und Entwicklung eines Systems zur jährlichen Ermittlung. Emissionsdaten bis zum Jahr 2001 und Emissionsprognosen für die Jahre 2005, 2010 und 2020*. 1. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben, erstellt im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 202 41 356, Berlin: UBA. (http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3000).
- Schwarz, Winfried (2004): *Emissionen, Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren von fluorierten Treibhausgasen (F-Gase) in Deutschland für die Jahre 1995-1998. Anpassung an die Anforderungen der internationalen Berichterstattung und Implementierung der Daten in das zentrale System Emissionen (ZSE)*. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 201 41 261/01, Frankfurt/Main: Öko-Recherche. (<http://www.umweltbundesamt.de/produkte/fckw/emissionen.htm>).

- Schwarz, Winfried; Leisewitz, André (1999): *Emissionen und Minderungspotential von HFKW, FKW und SF₆ in Deutschland*. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 298 41 256, Frankfurt/Main: Öko-Recherche. (<http://www.umweltbundesamt.de/produkte/fckw/emissionen.htm>).
- Tes - Tesanol Kältespray (2010): http://www.teslanol.com/deutsch/pdf/sicherheit/26033_Teslanol_t71_200ml_D.pdf; 15.06.2010..
- TUNAP - TUNAP Ind. (2003) Mündliche Mitteilung Herr Stockert vom 12. Februar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- UBA - Umweltbundesamt (1989): *Verzicht aus Verantwortung: Maßnahmen zur Rettung der Ozonschicht*. UBA-Berichte 7/89, Berlin: Erich-Schmidt.
- UBA - Umweltbundesamt (2003a): Internetrecherche (s. [Goodmark 2003] und www.ebay.de August und September 2003) und Vertreiberbefragung zu Gas-Signalhörnern im Zeitraum August und September 2003.
- UBA - Umweltbundesamt (2003b): Internetrecherche zu Rohr-Vereisungssystemen.
- VIS 2008: Verbraucherinformationssystem Bayern. (<http://www.vis.bayern.de/technik/produktgruppen/haushaltswaren/partyzubehoer.htm>).
- Wek - Wek Kältespray (2010): http://cgi.ebay.de/3x-400ml-Wekem-Kaeltespray-Eisspray-Vereisung-WS300_W0QQitemZ260480268493QQcategoryZ83628QQcmdZViewItem, 15.06.2010.
- Zürich 2006: „R134a in Druckgaspackungen – Bericht über die interkantonale Schwerpunktkampagne zur Marktüberwachung 2005/6“

6 HFKW als Feuerlöschmittel

In den siebziger und achtziger Jahren wurden zunehmend Halone (Fluorchlorbromkohlenwasserstoffe) als Feuerlöschmittel eingesetzt. Die Brandbekämpfung und Sicherung von Anlagen und Objekten mit Halon bot eine Reihe von Vorteilen wie:

- gute Löschwirkung,
- für den Menschen toxikologisch weitgehend unbedenkliche löschwirksame Konzentrationen (Löschen von brennender Kleidung von Personen war daher möglich),
- keine Auslösezeiten erforderlich,
- keine elektrische Leitfähigkeit des Löschmediums,
- rückstandsfreies Löschmittel.

Dem standen allerdings neben der Ozon- und Klimawirksamkeit auch anwendungstechnische Nachteile gegenüber:

- Bildung von aggressiven und toxischen Zersetzungsprodukten im Brandfall,
- keine Löschung von glutbildenden Bränden,
- sehr kurze Vorwarnzeiten erforderlich, um Glutbildung zu vermeiden.

Die hohen Ozonabbaupotenziale dieser Stoffgruppe führten in Deutschland im Jahr 1992 gemäß *FCKW-Halon-Verbots-Verordnung* [FCKW-Verordnung 1991] zu einem Herstellungs- und Verwendungsverbot als Feuerlöschmittel. Mit Ausnahme weniger, sogenannter „kritischer Verwendungszwecke“¹ konnten Halone in den meisten Anwendungen in kurzer Zeit ersetzt werden. Heute werden nur noch die militärische und zivile Luftfahrt und sehr wenige weitere Anwendungen als kritisch bewertet. Eine vollständige Auflistung aller kritischen Verwendungszwecke enthält die *Verordnung (EG) Nr. 1005/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. September 2009 über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen* [EG-Verordnung 2009]. Der Einsatz von Halonen in anderen als den kritischen Bereichen ist innerhalb der EU seit spätestens 1. Januar 2004 verboten.

¹ Im englischen gebräuchlicher Begriff: „critical use“.

Die Schifffahrt (Altbestand) zählt teilweise ebenfalls zu den kritischen Verwendungszwecken. Seit dem 1. Januar 2004 sind Halone aber nur noch in militärischen Wasserfahrzeugen zum Schutz von Mannschafts- und Maschinenräumen zugelassen sowie auf kommerziell genutzten Frachtern zur Inertisierung normalerweise besetzter Räume [EG-Verordnung 2000, EG-Verordnung 2009, EG-Verordnung 2010]. Nach Pleß und Seliger [2003] geht aus Veröffentlichungen hervor, dass auch für Halone auf bestehenden Schiffen Alternativen verfügbar sind, deren Einsatz jedoch aus Kostengründen oft nicht realisiert wird.

Neben den im Abschnitt *Minderungsmöglichkeiten* beschriebenen umweltgerechteren Löschmitteln sind international auch eine Reihe von HFKW und FKW als Feuerlöschmittel erprobt worden. In Europa sind vollfluorierte Kohlenwasserstoffe für den Einsatz in Brandschutzsystemen und in Handfeuerlöschern seit dem 4. Juli 2007 verboten [EG-Verordnung 2006]. HFKW werden in vielen Ländern verwendet. Sie besitzen ein zum Teil erhebliches Treibhauspotenzial. Außerdem entstehen im Brandfall toxische Zersetzungsprodukte. Neben den HFKW haben Hersteller noch andere halogenhaltige Verbindungen, zum Beispiel das Fluorketon Nonafluor-4-(Trifluormethyl)-3-Pentanon, auch bekannt als Novec1230 oder FK 5-1-12, als Feuerlöschmittel entwickelt.

Ortsfeste Feuerlöschanlagen

Für ortsfeste Löschanlagen werden an die Löschanlage/das Löschmittel folgende Anforderungen gestellt [Pleß, Seliger 2003]:

- Wirkung als echtes Volumenlöschmittel in allen Bereichen des umbauten Raumes,
- minimale Löschkonzentration im umbauten Volumen,
- minimaler Platzbedarf für die Lagerung des Löschmittels,
- geringer Druckausgleich während der Flutung des Raumes mit Löschmittel,
- Zuleitung des Löschmittels auch über längere Entfernungen,
- keine chemischen Nebenwirkungen durch reizende, ätzende oder als Lösemittel wirkende Gase oder Dämpfe,
- keine Korrosionswirkungen während des Brandfalles und im Nachhinein,
- keine akut toxischen Wirkungen,
- keine langzeittoxischen Wirkungen,
- keine Wirkungen auf die Umwelt, sowohl durch die Verbindung selbst, als auch durch ihre Zersetzungsprodukte im Brandfall oder im Rahmen der natürlichen Zersetzung,

- geringe Arbeitsdrücke für die Lagerung des Löschmittelvorrates und der Gesamtanlage,
- Dichtheit der verwendeten Dichtungsmaterialien und Materialverbindungen,
- geringe Löschmittelkosten.

International werden eine ganze Reihe fluorierter Kohlenwasserstoffe sowie verschiedene Mischungen mit HFKW diskutiert [HTOC 2007]. Die in Tabelle 6.1 genannten fluorierten Kohlenwasserstoffe werden in Deutschland für ortsfeste Feuerlöschanlagen eingesetzt. Genau wie andere Löschmittel können auch fluorierte Kohlenwasserstoffe nicht alle der genannten Anforderungen erfüllen.

Tabelle 6.1: HFKW in ortsfesten Feuerlöschanlagen in Deutschland

Abkürzung	Name	GWP ₁₀₀ [WMO 2006]
HFKW-227ea	1,1,1,2,3,3,3-Heptafluorpropan	3.220
HFKW-236fa	1,1,1,3,3,3-Hexafluorpropan	9.810
HFKW-23	Trifluormethan	14.760

Beim Einsatz chemischer (fluorierter) Löschmittel ist zu beachten, dass diese während des Löschvorganges zersetzt werden, um reaktive Verbindungen für die negative Katalyse der Verbrennungsreaktion zu bilden. Dabei können eine Reihe akut toxischer Verbindungen entstehen. Im Falle eines ausbleibenden Löscherfolges und dem sich in der Folge entwickelnden Brand wird ein hoher Anteil der insgesamt eingesetzten HFKW zu Fluorwasserstoff und Carbonylfluorid zersetzt. In diesem Fall würde ein Löschen mit mobilen Kräften der Feuerwehr (Innenangriff) wegen der hohen Konzentration an Zersetzungsprodukten deutlich erschwert oder sogar nicht möglich sein [Pleß, Seliger 2003].

Handfeuerlöscher und mobile Löschgeräte

Für Handfeuerlöscher und mobile Löschgeräte wurden ebenfalls fluorierte Feuerlöschmittel entwickelt. In Deutschland werden in Motorsportbooten und Rennfahrzeugen teilweise diese Handfeuerlöscher eingesetzt. Auch militärische Sonderfahrzeuge werden mit diesen Feuerlöschmitteln geschützt. In der Regel erfüllen Wasser-, Pulver-, Schaum- oder Kohlendioxid- Handfeuerlöscher alle gängigen Löschanforderungen.

Tabelle 6.2: HFKW für Handfeuerlöscher und mobile Feuerlöschanlagen

Abkürzung	Name	GWP ₁₀₀ [WMO 2006]
HFKW-227ea	1,1,1,2,3,3,3-Heptafluorpropan	3.220
HFKW-236fa	1,1,1,3,3,3-Hexafluorpropan	9.810

Löschmittelsituation in Deutschland

In der Vergangenheit durften in Deutschland nur zugelassene Feuerlöschmittel vermarktet und verwendet werden. Das führte dazu, dass HFKW zunächst nur in geringem Umfang eingesetzt wurden. Als erstes erhielt der HFKW-227ea in Deutschland im Jahr 1997 eine Zulassung. Im Rahmen der Beteiligung beim Zulassungsverfahren hat das Umweltbundesamt den Einsatz von HFKW-227ea mit der Einschränkung befürwortet, dass der *„Einsatz von FM 200 [...] nur dort erfolgen sollte, wo keine umweltfreundlicheren Alternativen zur Verfügung stehen und derzeit noch eine zwingende Notwendigkeit für den Einsatz von Halon im Sinne der ‚essential-use‘-Definition der FCKW-Halon-Verbots-Verordnung besteht. Auf Probeflutungen sollte grundsätzlich verzichtet werden“* [UBA 1996]. In den Jahren 2001 und 2002 folgten die HFKW-236fa und HFKW-23. Den Einsatz des HFKW-236fa hatte das Umweltbundesamt im Rahmen des Zulassungsverfahrens mit der gleichen Einschränkung wie bereits beim HFKW-227ea befürwortet. Ergänzend hat das Umweltbundesamt empfohlen, *„dass eine Zulassung dieses Stoffes in Deutschland zeitlich befristet und nur auf den Einsatz von Feuerlöschgeräten in Kampfräumen von Panzern und in gepanzerten Zivilfahrzeugen begrenzt werden sollte“* [UBA 2000]. Für den HFKW-23 ist weder ein Bedarf gegeben, noch ist dieser Stoff als Löschmittel unter Umweltgesichtspunkten akzeptabel. Das Umweltbundesamt hat sich gegen eine Zulassung dieses Stoffes ausgesprochen.

Eingesetzt werden in Deutschland inzwischen alle drei HFKW vorwiegend in ortsfesten Feuerlöschanlagen. Die Emissionen lagen im Jahr 2007 bei etwa 2.100 kg bzw. knapp 10 kt CO₂-Äquivalenten [NIR 2009]. Die in Feuerlöschsystemen installierte HFKW-Menge betrug im Jahr 2007 258 t [NIR 2009].

Minderungsmöglichkeiten

Die zuständigen Behörden haben bereits direkt nach dem Verbot von Halon in Deutschland im Jahr 1992 nur für wenige Halon-Anwendungen Ausnahmen für deren Verwendung erteilt, da in allen anderen Anwendungen eine Substitution möglich war. In einer Vielzahl von Anwendungen erfolgte eine Umstellung des Brandschutzes auf halogenfreie Feuerlöschmittel und -verfahren. Beispielhaft seien nur Kohlendioxid-, Sprinkler- und Inertgasanlagen sowie verbesserte Frühwarnsysteme genannt. Bei den Handfeuerlöschern

wurde wieder verstärkt auf Pulver, Wasser, Schaum und Kohlendioxid zurückgegriffen. Ausgewählte Anwendungsgebiete werden weiter hinten getrennt betrachtet.

Das oben genannte Fluorketon, welches wie Kohlendioxid (CO₂) ein Treibhauspotenzial von 1 hat, ist gemäß Herstellerangabe für Flutungs-, Sprinkler- und Explosionsunterdrückungsanlagen sowie Handfeuerlöscher geeignet [3M 2009].

Nach Pleß und Seliger [2003] beeinflusst der Kampf um erreichbare Marktanteile die Auswahl des für die Anwendung optimalen Löschmittels negativ. Vorteile von HFKW-Löschmitteln werden häufig hervorgehoben und Nachteile bleiben unbenannt. Für den Anwender ist es kaum möglich, auf der Basis der vorhandenen Informationen objektive Entscheidungen zu treffen. Um dies zu ändern, schlagen Pleß und Seliger vor, für chemische Löschmittel, die im Löschprozess schädigende oder toxische Verbindungen bilden können, sowie für Löschmittel mit toxischen Eigenschaften das Sicherheitsdatenblatt des Löschmittelherstellers nach den Technischen Regeln für Gefahrstoffe 220 (TRGS 220 [TRGS 220 2009]) zum Pflichtbestandteil der Angebotsunterlagen zu machen.

Ortsfeste Feuerlöschanlagen

Halogenfreie Löschmittel für ortsfeste Feuerlöschanlagen sind z. B. Wassernebeltechniken und Inertgase. Beide wirken als Volumenlöschmittel. D. h., sie entfalten ihre Löschwirkung in den Flammen und unterbrechen die Verbrennungsreaktion durch Radikalbindung, Stoßreaktion oder Energieaufnahme [Pleß, Seliger 2003].

Wasservernebelungsanlagen arbeiten mit einem feinen Wassernebel mit einem Tröpfchendurchmesser unter 200 µm. Der Löschmechanismus beruht auf den Aspekten [HTOC 1997]:

- Kühlen der Gasphase,
- Sauerstoffverdrängung,
- Oberflächenbefeuchtung und -kühlung.

Die Leistungsfähigkeit von Wasservernebelungsanlagen hängt stark von ihrer Fähigkeit ab, Tröpfchen mit sehr kleinem Durchmesser (10-100 µm) zu erzeugen und die erforderlichen Wassermengen über den ganzen Löschbereich zu verteilen. Die Löschwirkung wird auch von der Geometrie des erzeugten Wasserstrahls und des zu schützenden Bereiches beeinflusst. Die Eignung von Wassernebel muss deshalb immer im Zusammenhang mit einer Anlagentechnik betrachtet werden und kann nicht allein als Feuerlöschmittel bewertet werden [HTOC 1997]. Wassernebel werden z. B. zum Schutz von Maschinenräumen, Notstromanlagen, Computerräumen, Hotels, Büros, Underground- (U-) Bahnen und historischen Bauten eingesetzt. Sie haben sich als sehr wirksam erwiesen und werden inzwischen auch für den Ersatz von Halon in kritischen Verwendungszwecken getestet.

Inertgase werden in verschiedenen Mischungen angeboten (s. Tab. 6.3). Neben dem fehlenden Treibhauspotenzial besteht ihr Hauptunterschied zu den fluorierten Feuerlöschmitteln darin, dass sie keiner thermischen Zersetzung unterliegen. Dadurch werden höhere Löschkonzentrationen benötigt. Es entstehen dafür keine korrosiven und gesundheitsschädlichen Nebenprodukte. Inertgase werden z. B. zum Schutz von Rechen- und Kontrollzentren eingesetzt.

Tabelle 6.3: Inertgase für ortsfeste Feuerlöschanlagen [HTOC 2007]

Name	IG-541	IG-55	IG-01	IG-100
Handelsname	Inergen	Argonite	Argotec	NN 100
Chemische Zusammensetzung				
• Stickstoff	52 %	50 %		100 %
• Argon	40 %	50 %	100 %	
• Kohlendioxid	8 %			

Als halogenhaltiges Löschmittel ist auch das Fluorkton Novec1230 oder FK 5-1-12 auf dem Markt erhältlich. Dieser Stoff stellt bezüglich seines nicht vorhandenen Ozonabbaupotenzials sowie seines sehr geringen GWP₁₀₀ von 1 aus Umweltschutzsicht eine geeignete Alternative zu den Halonen, aber auch zu den HFKW dar. Im Brandfall kann der Einsatz von NovecTM 1230 ähnlich wie bei den HFKW zur Bildung humantoxischer Zersetzungsprodukte führen [Tolksdorf 2003].

Im Gegensatz zu bereits auf dem Markt erhältlichen halogenfreien Löschmitteln wie Inergen, Wasser, Wassernebel oder CO₂ führt der Einsatz von NovecTM 1230 jedoch zu einem anthropogenen Eintrag von Fluor in Form von Fluorkohlenwasserstoffen, fluorierten organischen Säuren und Fluorwasserstoff (HF) in die Umwelt. Zwar sind die durch den Einsatz von NovecTM 1230 verursachten Einträge voraussichtlich sehr gering. Bestehende Systeme ohne halogenierte Löschmittel sowie Einsatzbereiche, in denen sich halogenfreie Löschmittel bewährt haben, sollten aber nicht von NovecTM 1230 bedient werden.

Ausgewählte Anwendungsbereiche

Eine ausführliche Darstellung der löschtechnischen Möglichkeiten in den hier ausgewählten und weiteren Anwendungsbereichen findet sich unter anderem bei Pleß und Seliger [2003]. An dieser Stelle wird daher nur ein kurzer Überblick gegeben.

Rechenzentren, Computerräume, Kontrollzentren

In Rechenzentren, Computerräumen und ähnlichen Anwendungen werden meist ortsfeste Feuerlöschanlagen eingebaut. Der Ersatz von Halon erfolgte in Deutschland häufig durch die Kombination einer Brandfrüherkennung und den Löschgasen Stickstoff und Argon.

HFKW werden in Deutschland nur selten eingesetzt. Für Serverschränke wurden spezielle Kleinstlöschanlagen entwickelt, die Stickstoff, Argon oder Kohlendioxid als Löschmittel verwenden [bvfa].

Auch in Dänemark werden für diesen Anwendungsbereich Inertgase favorisiert, da diese keine korrosiven Zersetzungsprodukte bilden [Pedersen u. a. 1995]. Beispielhaft sei auf den Einsatz von Inergen im Kontrollzentrum der Dänischen Bahn verwiesen. Eine Anforderung an die Löschanlage war hier, dass Personen auch im Falle des Auslösens der Löschanlage im Kontrollzentrum verbleiben können [Pedersen u. a. 1995].

Veranstaltungsstätten, Flughäfen

In einer ganzen Reihe von Gebäuden mit starkem Publikumsverkehr wurden in Deutschland Sprinkleranlagen eingebaut. Neben der Löschanlage sorgen eine Vielzahl von Maßnahmen des baulichen und organisatorischen Brandschutzes für eine umfassende Sicherheit. Als Beispiele seien hier der Flughafen Düsseldorf, die Messe Nürnberg sowie die Allianz Arena in München genannt [bvfa].

Explosionsunterdrückung

In der Vergangenheit wurde Halon zur Explosionsunterdrückung in Bereichen wie mit Aerosol gefüllten Räumen, Getreidesilos, in der Papierproduktion oder Milchpulverherstellung eingesetzt. Als Alternativen kommen hauptsächlich Pulver und wässrige Systeme zum Einsatz [UNEP 2002].

Bibliotheken, Museen

In Bibliotheken und Museen stehen grundsätzlich Handfeuerlöscher für die Bekämpfung von Entstehungsbränden zur Verfügung. Löschmittel ist hierbei CO₂. Für diese Orte problematisch ist die rechtzeitige Feststellung von nächtlichen Bränden. Diese werden ohne Vorkehrungen zur Branderkennung erst sehr spät entdeckt. Da Bibliotheken und Museen sich häufiger in alten historischen Gebäuden befinden, kann es zusätzlich zu einer beschleunigten Brandausbreitung aufgrund der Bauweise und des verwendeten Baumaterials kommen. Bekanntestes Beispiel ist der Brand in der Anna-Amalia-Bibliothek in Weimar im Jahre 2004. Heute ist die Anna-Amalia-Bibliothek mit einer Feinsprühanlage ausgerüstet.

Als stationäre Löschanlagen kommen neben Sprinkleranlagen auch CO₂ oder Inertgasanlagen zum Einsatz [Pleß, Seliger 2003]. CO₂ hat den Vorteil, dass bei ausreichender Löschkonzentration auch Glutbrände sicher gelöscht werden können. Nachteilig ist, dass durch eine ausreichend lange Vorwarnzeit sichergestellt werden muss, dass alle Personen den zu flutenden Bereich verlassen haben.

Archive

Auf die individuellen Anforderungen zugeschnittene Brandschutzkonzepte, die baulichen Brandschutz, Handfeuerlöschgeräte und automatische Löschanlagen kombinieren, können auch Archive in der Regel umfassend mit halogenfreien Stoffen geschützt werden. Eine Möglichkeit ist die kontrollierte Zuführung von Stickstoff, um den Sauerstoffanteil in der Luft zu senken. Das Risiko eines offenen Brandes wird ausgeschlossen. Gleichzeitig kann die Alterung alter Dokumente durch die Sauerstoffreduzierung verlangsamt werden. Durch aktive Brandvermeidungssysteme geschützte Bereiche bleiben begehbar [bvfa].

Handfeuerlöscher und mobile Löschgeräte

In Handfeuerlöschern und mobilen Löschgeräten werden vor allem die traditionellen Löschmittel wie Wasser, Wassernebel, Schaum, Kohlendioxid und Pulver eingesetzt. Der Einsatz von HFKW ist nicht erforderlich. Einzige Ausnahme sind ggf. mobile Löschgeräte für Kampfräume von Panzern, gepanzerte Zivilfahrzeuge und Flugzeuge.

Schlussfolgerungen

Halone sind heute in fast allen Anwendungsbereichen durch alternative Löschmittel ersetzbar. Ausnahmen stellen nur noch militärische Anwendungen sowie die Luftfahrt dar.

Für Handfeuerlöscher und mobile Löschgeräte sind HFKW und FKW nicht erforderlich. Hier sind Kohlendioxid, Schaum und Pulver die gebräuchlichen Löschmittel.

Keines der in diesem Kapitel beschriebenen Löschmittel kann alle an ortsfeste Feuerlöschanlagen gestellten Anforderungen erfüllen. Die Vergangenheit hat aber gezeigt, dass in fast allen Anwendungsbereichen halogenfreie Feuerlöschmittel einsetzbar sind. Ihr Einsatz ist heute Stand der Technik. Problematisch bleiben in naher Zukunft noch verschiedene Anwendungsbereiche in der Luftfahrt.

Der Einsatz von HFKW als Löschmittel sollte nur dort erfolgen, wo keine umweltgerechteren Alternativen zur Verfügung stehen und ihr Einsatz zum Schutz von Leben und Gesundheit des Menschen zwingend erforderlich ist. Eine Bewertung, ob in Ausnahmefällen der Einsatz von HFKW als Löschmittel gerechtfertigt ist, ist im Detail nur am konkret zu schützenden Objekt möglich. Bereits durch gute bauliche Planung und durch ein gutes Brandschutzkonzept (Frühwarnsysteme etc.) ist der Brandschutz deutlich verbesserbar.

Der Anwender ist über die Eigenschaften chemischer Löschmittel, einschließlich der umweltrelevanten Eigenschaften in geeigneter Weise umfassend zu informieren.

Werden halogenierte Stoffe im Einzelfall eingesetzt, ist sicherzustellen, dass Emissionen bei der Errichtung und während der Nutzphase durch kontinuierliche Überprüfungen der Anlagen minimiert werden. Bei Erreichen der maximalen Lebensdauer muss zudem garantiert werden, dass das Produkt entweder recycelt oder fachgerecht entsorgt wird. Außerdem sollten Stoffe mit einem möglichst geringen GWP gewählt werden.

Als halogenhaltiges Löschmittel mit einem sehr geringen GWP ist das NovecTM 1230 (FK 5-1-12) auf dem Markt erhältlich. Dieser Stoff stellt aus Umweltschutzsicht eine geeignete Alternative zu Halonen, aber auch zu HFKW dar. Bestehende Systeme ohne halogenierte Löschmittel sowie Einsatzbereiche, in denen sich halogenfreie Löschmittel bewährt haben, sollten aber nicht von NovecTM 1230 bedient werden.

Vollständig verzichtet werden sollte auf den Einsatz von Stoffen mit einem sehr hohen GWP. Hierzu zählen die FKW, die bereits in der EU verboten sind und der HFKW-23.

In Kapitel 6 verwendete Literatur

3M (2009): Produkt-Informationen des Herstellers.

(http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/Novec/Home/Product_Information/Fire_Protection/?WT.mc_id=www.3m.com/novec1230).

Bvfa - Bundesverband Technischer Brandschutz e.V. (<http://www.bvfa.de>)

EG-Verordnung (2006): *Verordnung (EG) Nr. 842/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über bestimmte fluorierte Treibhausgase*. Amtsblatt der EG L161 S. 1-11.

EG-Verordnung (2009): *Verordnung (EG) Nr. 1005/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. September 2009 über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen*. Amtsblatt der EG, L286 S. 1-30.

EG-Verordnung (2010): zur Änderung der Verordnung (EG) 1005/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen, in Bezug auf die kritischen Verwendungszwecke von Halonen. Amtsblatt der EG, L218 S. 2-8.

FCKW-Verordnung (1991): *FCKW-Halon-Verbots-Verordnung - Verordnung zum Verbot von bestimmten die Ozonschicht abbauenden Halogenkohlenwasserstoffen*. Vom 6. Mai 1991, BGBl. I S. 1090-1092, zuletzt geändert am 29. Oktober 2001, BGBl. I S. 2785.

HTOC - Halon Technical Options Committee (2007): *New Technology Halon Alternatives*, Technical Note 1 – Revision 3, Nairobi: Ozone Secretariat.

- NIR - Nationaler Inventarbericht Deutschland (2009): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2009. (http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/4771.php).
- Pederson, Per H.; Jensen, Mette L.; Pedersen, Erik (1995): *Going Towards Natural Fire Extinguishants. Experience from Danish Industry*. Environmental Project No. 312, Copenhagen: Ministry of Environment and Energy, Danish Environmental Protection Agency. (www.mst.dk/homepage; 17.12.2003).
- Pleß, Georg; Seliger, Ursula (2003): *Substitution bestimmter umweltschädlicher Feuerlöschmittel in ausgewählten Anwendungsbereichen*. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 306 09 007, Heyrothsberge: Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt. (http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=2403).
- Tolksdorf, Ewers (2003): *Toxikologische und brandhygienische Bewertung des Feuerlöschmittels Novec 1230 des Hygiene-Instituts Gelsenkirchen*. Studie im Auftrag von 3M, unveröffentlicht, Gelsenkirchen: Hygiene-Institut Gelsenkirchen.
- TRGS 220 - Technische Regeln für Gefahrstoffe 220 (2009): *Sicherheitsdatenblatt*. Ausgabe: 02.07.2009. (http://www.baua.de/nn_16700/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/pdf/Bekanntmachung-220.pdf).
- UBA - Umweltbundesamt (1996): *Stellungnahme zur ökologischen Bewertung von 1,1,1,2,3,3,3-Heptafluoropropan (CF₃-CHF-CF₃) (R 227)*. Berlin: UBA.
- UBA - Umweltbundesamt (2000): *Stellungnahme zu den umweltrelevanten Eigenschaften von 1,1,1,3,3,3-Hexafluoropropan unter besonderer Berücksichtigung des Einsatzes als Feuerlöschmittel*. Berlin: UBA.
- UNEP - United Nations Environment Programme (2002): *Report of the Halons Technical Options Committee*. Nairobi: Ozone Secretariat.
- WMO – World Meteorological Organization (2006): *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006*, Report No. 50

7 HFKW als Lösemittel

Lösemittel werden in vielen Bereichen benötigt. In diesem Kapitel wird der mögliche Einsatz von HFKW als Lösemittel in gewerblichen und industriellen Anlagen zur Oberflächenreinigung diskutiert. Nicht betrachtet werden Chemischreinigungen, da dort kein Einsatz von HFKW erfolgt.

Zu den industriellen Anwendungen von Lösemitteln gehört vor allem die Oberflächenreinigung von Metallen, Glas oder Schmucksteinen. Die Reinigung von Oberflächen dient meist der Entfettung und Trocknung und findet häufig zwischen einzelnen Herstellungs- oder Behandlungsschritten (vor einer Oberflächenbeschichtung, vor Verklebung von Materialien etc.) sowie am Ende von Produktionsprozessen statt. Bedeutende Industriezweige / Anwender von Lösemitteln in Oberflächenreinigungsanlagen sind z. B. die metallverarbeitende Industrie, die Optik-, Präzisionswerkzeug- sowie die Luft- und Raumfahrtindustrie und die Medizintechnik [Schwarz, Leisewitz 1994; Harnisch, Schwarz 2003; UNEP 2003].

Die Anforderungen an die Oberflächenreinigung sind in einigen Bereichen extrem hoch. Empfindliche Oberflächen sowie das Erfordernis einer weitgehend vollständigen und rückstandsfreien Entfernung von Fett, Staub und Feuchte bei gleichzeitig sehr kleinen, geometrisch komplexen Reinigungsobjekten stellen hohe Anforderungen an das Lösemittel und/oder das Reinigungsverfahren. Darüber hinaus sollten die Kosten für Anlagenbau und -betrieb, einschließlich Energiekosten für Trocknungsprozesse, gering sein [Schwarz, Leisewitz 1994; Harnisch, Schwarz 2003].

Prinzipiell sind organische Lösemittel gut zur Oberflächenreinigung geeignet. Über einen langen Zeitraum fanden vor allem CKW und FCKW Anwendung [Schwarz, Leisewitz 1994; UNEP 2003]. FCKW wurden wegen ihrer Nicht-Brennbarkeit, ihrer Inertheit gegenüber Materialien, ihrer geringen Toxizität und ihres guten Lösevermögens für Öle und Fette eingesetzt. Bis zum Verbot der FCKW wurde in erster Linie der FCKW-113 eingesetzt. Andere FCKW fanden selten Anwendung [UBA 1989].

Als FCKW-Ersatz eignen sich lösemittelarme / -freie Verfahren und chlorfreie Lösemittel. HFCKW und n-Propylbromid (n-PB) sind wegen ihres ODP keine Alternativen. In Deutschland werden HFCKW nicht eingesetzt. Von n-PB ist kein Einsatz bekannt.

Weltweit werden vielfach HFKW eingesetzt. Insbesondere für die Präzisionsreinigung haben Lösemittelhersteller in den USA neue, unbrennbare fluorierte Verbindungen als Ersatz für die dort ab dem Jahr 1996 verbotenen FCKW-113, HFCKW-141b und 1,1,1-Trichlorethan entwickelt. Bevorzugt vermarktet wird in den USA der HFKW-43-10mee = $C_5H_2F_{10}$ (Verkauf in den USA seit Juni 1995, in Europa seit 1996). Als weiterer HFKW werden der HFKW-365mfc [Schwarz, Leisewitz 1999; Solvay 2009], der HFKW-245fa und der HFKW-c447ef allein oder in Mischungen angeboten [UNEP 2006].

In Deutschland sind die aus dem Einsatz von HFKW als Lösemittel in der industriellen Oberflächenreinigung resultierenden Emissionen wegen bestehender Rechtsverordnungen (siehe Abschnitt Minderungsmöglichkeiten) vernachlässigbar. Wegen der Relevanz in anderen Ländern wird in diesem Bericht dennoch ein kurzer Überblick über diesen möglichen Anwendungsbereich gegeben.

Minderungsmöglichkeiten

In Deutschland ist nicht nur die Verwendung von FCKW, sondern auch die Verwendung von HFKW und FKW als Lösemittel seit 1993 durch die 2. BImSchV [1990] verboten. Auch die im Jahr 2001 beschlossene Änderung im Zusammenhang mit der Umsetzung der europäischen *VOC-Lösemittelrichtlinie* [1999] sieht keine Aufhebung dieses Verbots vor. Gemäß der im Zuge der Anpassung an EG-Recht in *Verordnung zur Emissionsbegrenzung von leichtflüchtigen halogenierten organischen Verbindungen* umbenannten 2. BImSchV dürfen „*beim Betrieb von Anlagen als leichtflüchtige Halogenkohlenwasserstoffe nur Tetrachlorethen, Trichlorethen oder Dichlormethan in technisch reiner Form eingesetzt werden*“. Allerdings lässt die neue Regelungen Ausnahmegenehmigungen auf Antrag zu, welche an hohe Anforderungen geknüpft sind: Nach § 17 „*kann die zuständige Behörde auf Antrag des Betreibers für hochwertige Anwendungen in Oberflächenbehandlungsanlagen, insbesondere in der Reinigung von elektronischen Bauteilen, der Herstellung von Präzisionswerkstücken oder bei der Fertigung in der Mess- und Regeltechnik auch den Einsatz von leichtflüchtigen teilfluorierten Kohlenwasserstoffen in technisch reiner Form oder im Gemisch mit trans-1,2-Dichlorethen zulassen, soweit im Einzelfall schädliche Umwelteinwirkungen und Auswirkungen auf das Klima nicht zu erwarten sind und wenn nach dem Stand der Technik für diese Anwendungen keine anderen nicht teilfluorierten Lösemittel eingesetzt werden können.*“ Von dieser Ausnahmeregelung wurde in Deutschland bisher nur einmal Gebrauch gemacht.

Neben den HFKW haben Hersteller Hydrofluorether (HFE) als spezielle Ersatzstoffe für FCKW entwickelt [UNEP 2006, 3M 2009]. Sie dienen teilweise als drop-in-Stoffe, d. h. FCKW-Anlagen konnten mittels dieser Stoffe weiterbetrieben werden [Schwarz, Leisewitz 1999].

HFE haben wegen ihrer Etherbindung im Molekül im Vergleich zu HFKW eine geringe atmosphärische Lebensdauer. Damit ist auch ihr GWP meist geringer als das der HFKW.

Das GWP₁₀₀ liegt aber mit Werten zwischen 30 und 500 immer noch weit oberhalb des GWP von halogenfreien Kohlenwasserstoffen. HFE finden heute in Spezialanwendungen, meist in Mischungen oder in Co-Solvent-Verfahren, Einsatz [UNEP 2003; IPCC/TEAP 2005, 3M 2009]. HFEs werden von der chemischen Industrie zunehmend auch in Aerosolbehältern für die Elektronikindustrie angeboten. Über diesen Anwendungsbereich liegen für Deutschland keine Daten vor.

Wegen des in Deutschland früh vollzogenen Ausstiegs aus den FCKW als Lösemittel und der Verbotsregelungen der 2. BImSchV hat sich bei der Auswahl und Anwendung von Ersatzstoffen eine andere Entwicklung vollzogen als in Ländern mit einem späteren Ausstieg. So hatten sich in Deutschland zum Zeitpunkt der Entwicklung sowohl der HFKW als auch der HFE bereits wässrige Reiniger, halb wässrige Verfahren, der Verzicht auf Reinigung durch geänderte Produktionsverfahren und halogenfreie organische Lösemittel (entaromatisierte aliphatische Kohlenwasserstoffe, Lösemittel auf Alkohol/Glykolether-Basis) durchgesetzt [Schwarz, Leisewitz 1994; Harnisch, Schwarz 2003]. Den HFE kam damit in Deutschland im Vergleich zu anderen Ländern wenig Bedeutung zu. Als leichtflüchtige halogenierte organische Verbindungen fallen HFE in den Geltungsbereich der novellierten 2. BImSchV und unterliegen den dort festgelegten strengen technischen Anforderungen. HFKW, wie der HFKW-43-10mee, durften hingegen nach der 2. BImSchV zum Zeitpunkt ihrer Einführung in Deutschland nicht verwendet werden.

Neben dem Einsatz chlorfreier organischer oder wässriger Lösemittel kommen lösemittelarme/-freie Verfahren in Betracht. Zu den lösemittelfreien Verfahren zählt z. B. die Plasmareinigung [3M 2000; UNEP 2003].

Wegen der besonderen Situation in Deutschland werden die Einsatzmöglichkeiten, Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren in diesem Bericht nicht dargestellt. So ist beispielsweise auch der unterschiedliche Energieverbrauch der verschiedenen Verfahren in eine Gesamtbetrachtung einzubeziehen. Eine gute Darstellung findet sich in [UNEP 2003].

Schlussfolgerungen

In Deutschland hatten sich zum Zeitpunkt der Entwicklung fluorierter FCKW-Ersatzstoffe wie HFKW oder HFE bereits halogenfreie Lösemittel und Verfahren oder der Verzicht auf eine Reinigung durchgesetzt. Zwar könnten heute HFE und in Ausnahmefällen HFKW eingesetzt werden. Diese Möglichkeit wird aber in Deutschland - mit einer Ausnahme - nicht genutzt. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass der Einsatz fluorierter Lösemittel nicht zwingend erforderlich ist.

In Kapitel 7 verwendete Literatur

2. BImSchV (1990): *Zweite Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Verordnung zur Emissionsbegrenzung von*

leichtflüchtigen Halogenkohlenwasserstoffen. Vom 10. Dezember 1990, BGBl. I S. 2694, zuletzt geändert am 23. Dezember 2004, BGBl. I S. 3758.

3M (2000): Vortrag auf einem Arbeitsgruppentreffen der AG 5 „fluorierte Gase“ (ECCP) am 19. September 2000.

3M (2009): Produktionformation Hydrofluorether. (http://products.3m.com/catalog/us/en001/oil_gas/specialty_materials/node_2CT5BPQWKBge/root_GST1T4S9TCgv/vroot_G1F6DNZDBVge/theme_us_oilgas_3_0/command_AbcPageHandler/output_html).

Harnisch, Jochen; Schwarz, Winfried (2003): *Final Report on the Costs and the Impact on Emissions of Potential Regulatory Framework for Reducing Emissions of Hydrofluorocarbons, Perfluorocarbons and Sulphur Hexafluoride*. Studie im Auftrag der Europäischen Kommission (GD Umwelt), Nürnberg: Ecofys GmbH, Öko-Recherche.

IPCC/TEAP - Intergovernmental Panel on Climate Change/Technology and Economic Assessment Panel (2005): *Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System – Issues related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons*. Cambridge, New York.

Schwarz, Winfried; Leisewitz, André (1994): *Metalloberflächenreinigung mit CKW, KW und wässrigen Reinigern: Stoffstromanalyse und Umweltbelastungsvergleich*. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben: Ersatz und unverzichtbare Einsatzgebiete von Chlorkohlenwasserstoffen (CKW), Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 104 08 325, UBA-Texte 65/94, Berlin: UBA.

Schwarz, Winfried; Leisewitz, André (1999): *Emissionen und Minderungspotential von HFKW, FKW und SF₆ in Deutschland*. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 298 41 256, Frankfurt/Main: Öko-Recherche. (www.umweltbundesamt.de/luft/emissionen/f-und-e/abgeschlossen/index.htm 30.12.2003).

Solvay 2009: Produktionformationen zum HFKW 365mfc. (http://www.solvaychemicals.us/static/wma/pdf/1/6/0/2/9/Solkane_365mfc_Component_for_Solvent_Formulations.pdf).

UBA - Umweltbundesamt (1989): *Verzicht aus Verantwortung: Maßnahmen zur Rettung der Ozonschicht*. UBA-Berichte 7/89, Berlin: Erich-Schmidt.

UNEP - United Nations Environment Programme (2003): *2002 Assessment*. Solvents, Coatings and Adhesives Technical Options Committee, Nairobi: Ozone Secretariat. (www.teap.org/REPORTS/downloads/STOC2002.pdf; 4.9.2003).

- UNEP - United Nations Environment Programme (2006): *2006 Assessment Report of the Chemicals Technical Options Committee*. Nairobi: Ozone Secretariat. (ozone.unep.org/teap/Reports/CTOC/ctoc_assessment_report06.pdf 4.8.20038).
- VOC - Lösemittelrichtlinie (1999): *Richtlinie 1999/13/EG des Rates vom 11. März 1999 über die Begrenzung von Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen, die bei bestimmten Tätigkeiten und in bestimmten Anlagen bei der Verwendung organischer Lösungsmittel entstehen*. ABl. EG Nr. L 85 vom 29.3. 1999 S. 1 ber. Nr. L 188 S. 54.

8 HFKW, FKW und SF₆ als Ätzgase

Fluorierte Gase (HFKW, FKW, SF₆ und NF₃) eignen sich in Ätzprozessen (Plasmaätzen, Plasmaverfahren) als Fluorlieferant. Vorwiegend werden FKW als Ätzgase eingesetzt. Ätzprozesse finden in der Halbleiterindustrie, der Leiterplattenfertigung und der Photovoltaikindustrie statt. Dabei kommt der Halbleiterindustrie in Bezug auf Verwendungsmengen und Emissionen die dominierende Rolle zu.

Im Gegensatz zu den meisten der zuvor beschriebenen Anwendungen fluorierter Gase kommt es beim Einsatz als Ätzgas zu deren Umwandlung oder Zersetzung. Daher sind die verwendeten Mengen nicht zwangsläufig ein Maß für die Emissionen. Vielmehr sind hier vielfältige Faktoren, wie Prozessführung, Abgasreinigung, Art des Prozesses und des eingesetzten Gases etc. relevant.

Für FKW-Emissionen ist die Halbleiterindustrie nach der Aluminiumindustrie die zweitgrößte Quelle. Für HFKW und SF₆-Emissionen ist die Bedeutung im Vergleich zu anderen Quellen hingegen gering. So betragen die HFKW-Emissionen aus der Halbleiterindustrie ungefähr 0,02 Mio. t CO₂-Äquivalente pro Jahr. Über die letzten fünf Jahre gab es nur leichte Änderungen (s. Abb. 8.1). Auch die SF₆-Emissionen, die sich mittlerweile um 0,03 Mio. t CO₂-Äquivalente pro Jahr bewegen, haben sich seit 2004 halbiert. Gleiches gilt für die FKW-Emissionen. Diese sind gegenüber der bisherigen Jahreshöchstmenge von 0,33 Mio. t im Jahr 2000 auf 0,14 Mio. t im Jahr 2008 zurückgegangen. Die Emissionsreduktion kann sowohl auf die Verringerung der Produktion, als auch auf Emissionsminderungsmaßnahmen zurückgeführt werden [Infineon 2009].

Die FKW-Emissionen aus der Leiterplattenfertigung entsprechen nach bisherigen Schätzungen seit 1995 unverändert etwa 0,02 Mio. t CO₂-Äquivalenten. Plasmaprozesse werden bei der Leiterplattenherstellung noch nicht von allen Herstellern eingesetzt. Mit Fortschreitung der technischen Entwicklung und Anforderungen an Leiterplatten könnte sich dies in den nächsten Jahren ändern. In der Folge könnten - wenn keine Emissionsminderungsmaßnahmen getroffen werden - die Emissionen aus diesem Bereich steigen. In Abbildung 8.1 ist die Emissionsentwicklung im Zeitraum 1995 bis 2008 dargestellt.

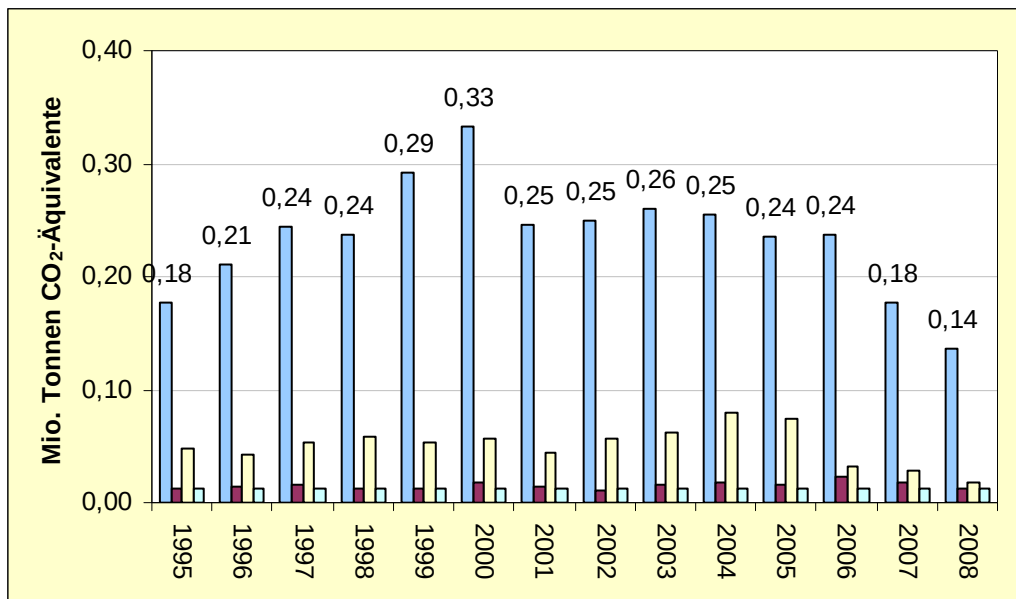


Abbildung 8.1: Emissionen fluorierter Gase aus der Halbleiterindustrie (von links: FKW, HFKW, SF₆) und aus der Leiterplatten(LP)fertigung (rechte Säule) in Deutschland in Mio. t CO₂-Äquivalente. Daten aus: [Schwarz 2009; ZVEI 2009].

8.1 Halbleiterindustrie

Produkte der Halbleiterindustrie finden heute in fast allen Bereichen Anwendung. Beispielhaft können die mobile Kommunikation, die Computer-, Sicherheits- und Chipkartentechnik und die Automobil- und Industrieelektronik genannt werden. Die Halbleiterindustrie produziert Elektronikbauteile, die u. a. zu einer Verringerung des Stromverbrauchs beitragen; z. B. in den Netzteilen für Computer oder in der Steuerung von Kfz-Motoren.

HFKW, FKW und SF₆ benötigt die Halbleiterindustrie zur Herstellung von „Wafern“, den aus hochreinem Silizium bestehenden Basisbausteinen für alle Halbleiterbauteile. Ihre Verwendung verteilt sich im Wesentlichen auf zwei Bereiche: Das Plasmaätzen (Ätzgase) und die Kammerreinigung (Reinigungsgase). Unter chemisch-physikalischen Gesichtspunkten sind beides Ätzprozesse.

Zum Ätzen von Silizium (Waferherstellung) sind Fluorionen und –radikale erforderlich. Hierzu hat die Halbleiterindustrie zunächst Flusssäure eingesetzt. Das Ätzen dient der Strukturierung der Siliziumoberfläche. In den vergangenen Jahren hat sich die Art der Strukturen stark geändert. Die früher noch relativ groben Strukturen haben zwischenzeitlich eine Breite von nur noch 0,15 µm. Mit Flusssäure ist diese Strukturbreite nicht mehr zu erreichen. Dies führte zum Einsatz von fluorierten Gasen. Diese werden zunächst in einer Vorkammer zerlegt (cracken), um das Fluor freizusetzen [Infineon 2003]. FKW werden

somit bereits während des Ätzprozesses teilweise umgesetzt. Diese Umsetzung sowie Rekombinationen führen zu einer Vielzahl von Gasen in der Kammer und in der Abluft. Beispielsweise werden die FKW C₂F₆ und C₃F₈ im Plasma derart umgesetzt, dass es zur Neubildung von nicht zu vernachlässigenden CF₄-Mengen als Nebenprodukt kommt [Schwarz, Leisewitz 1999].

Die Auswahl der FKW beim Plasmaätzen hängt von der zu erzielenden Struktur ab. Jeder FKW ist eng auf den jeweiligen Prozess abgestimmt [Infineon 2003], da neben dem Fluor auch der Kohlenstoffgehalt von Bedeutung ist. Beides hat Einfluss auf die Bildung von C-F-Polymeren, welche ihrerseits Einfluss auf den Ätzprozess haben [Beu u. a. 1998]. Grundsätzlich hat es bei der Wafer-Herstellung und bei den Ätzprozessen große technologische Entwicklungen gegeben. Dies ist bei der Suche nach Substituten und Emissionsminderungsmaßnahmen zu beachten. SF₆ wird nur in älteren Anlagen (4-Zoll- und 6-Zoll-Anlagen¹) oder für Spezialätzungen eingesetzt.

Für die Herstellung von Wafern mit verschiedenen dielektrischen (Silizium) und metallischen Schichten kommt die Chemical Vapour Deposition (CVD)-Methode zum Einsatz. Beim Aufbringen der Schichten aus der Gasphase geht ein Teil nicht auf den Wafer, sondern setzt sich in den CVD-Kammern ab. Um im weiteren Verarbeitungsprozess Verunreinigungen der Wafer durch ein Abblättern dieser Ablagerungen zu unterbinden, werden die Kammern nach bestimmten Zyklen gereinigt. Zur Kammerreinigung werden wiederum fluoridierte Gase eingesetzt, die dabei wie im eigentlichen Ätzprozess einer Umsetzung unterliegen. Im Gegensatz zum Plasmaätzen hat die Kammerreinigung, die zwar grundsätzlich ebenfalls einen Ätzprozess darstellt, keinen großen Einfluss auf das Produkt. Daher sind die Möglichkeiten bei der Auswahl der verwendeten Gase größer. Damit steigen auch die Substitutionsmöglichkeiten [Infineon 2003].

Minderungsmöglichkeiten

Treibende Kraft für die Halbleiterindustrie zur Emissionsreduktion sind neben möglichen Kostensenkungen selbst gesteckte Ziele: Im April 1999 hat die weltweite Vereinigung der Halbleiterhersteller (World Semiconductor Council = WSC) erklärt, die Treibhausgasemissionen aus der Halbleiterproduktion bis zum Jahr 2010 um 10 % bezogen auf das Basisjahr 1995 zu senken [WSC 1999]. Bezogen auf eine Wachstumsrate von 15 %² entspricht dies einer Reduktion in der Größenordnung von 90-95 % [Infineon 2003]. Sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene streben die beteiligten Halbleiterhersteller äquivalente Ziele an. In diesem Zusammenhang steht auch die

¹ Die Angabe in Zoll bezieht sich auf die Größe der Wafer. Die Wafergröße ist kontinuierlich von 4 Zoll (100 mm) auf 12 Zoll (300 mm) gestiegen.

² Diese Wachstumsrate errechnet sich statistisch aus den Wachstumsraten der letzten 40 Jahre. Wegen des geringen Wachstums in den letzten Jahren müsste sie heute auf ca. 10-12 % korrigiert werden.

freiwillige Selbstverpflichtung der Halbleiterhersteller mit Produktionsstätten in Deutschland aus dem Jahr 2004. Analog zu den auf supranationaler Ebene abgegebenen Verpflichtungen verpflichteten sich diese darin zu einer Reduktion der absoluten Treibhausgasemissionen um mindestens 8 % gegenüber dem Basisjahr 1995 [ZVEI 2005]. Nach den durch den Fachverband Bauelemente im Zentralverband der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) erhobenen Emissionsdaten wurde dieses Ziel bereits 2007 mit einer Reduktion um 13,4 % bereits deutlich übertroffen [ZVEI 2008]. Diese Emissionsentwicklung ist zum einen auf das gegenüber den Prognosen geringere tatsächliche Wachstum der Waferproduktion, zum anderen aber auch auf die neu installierten Abgasreinigungsanlagen (siehe unten) zurückzuführen.

International wird trotz dieser Erfolge weiterhin intensiv an neuen Ätzgasen und –prozessen als Option zur Emissionsminderung geforscht. Führend ist hier der internationale Forschungsverband SEMATECH (Semiconductor Manufacturing Technology). Hier sind viele Halbleiterhersteller Mitglied. Die Ergebnisse der Forschungsarbeit werden im Internet, aber auch auf Konferenzen vorgestellt.

Die Forschungsaktivitäten können in vier grundsätzliche Gebiete unterteilt werden:

- alternative Chemikalien,
- Prozessoptimierungen,
- Recycling und
- Abluftreinigung / End-of-pipe-Techniken.

Die höchste Priorität der derzeitigen Forschungsaktivitäten hat die Suche nach weniger umweltschädlichen Alternativen bei den Chemikalien. Dabei konzentriert sich die Suche vor allem auf Gase mit einem geringeren GWP und einem hohen Zerfallsgrad im Prozess. Erschwert wird die Erfüllung dieser Kriterien dadurch, dass ein hoher Fluorierungsgrad einer stabilen Verbindung einem geringen GWP eher grundsätzlich entgegensteht.

Neue Gase für Ätzprozesse werden in Kombination mit neuen Kammergenerationen entwickelt und getestet. Damit sind sie nicht für bestehende Kammern einsetzbar; eine Umstellung ist nicht realisierbar [Infineon 2003].

Als ein mögliches Substitut für Teilprozesse (Kammerreinigung) kam zunächst NF_3 in Betracht. Dieses sollte nach damaligem Wissensstand auch ohne nachgeschaltete Abgasreinigung (siehe nachfolgenden Text) zu 98 % zerstört werden. Bei gut geführten Ätzprozessen werden sogar 99,9 % des eingesetzten NF_3 zerstört, jedoch muß das durch die nachgeschaltete Abgasreinigung anfallende Waschwasser von gelöstem HF, Schwermetallen und Sand aufwändig gereinigt werden. Darüber hinaus werden nur ca. 60 % der Abluft insgesamt mit Abluftreinigungsanlagen behandelt [ZVEI, 2007], so dass ein beträchtlicher Teil NF_3 bei schlecht geführtem Ätzprozess in die Atmosphäre entweicht.

Trotz dieser Problematik erhöhte sich der Einsatz und damit auch der Ausstoß von NF₃ bis 2005 kontinuierlich, konnte aber in den vergangenen Jahren wieder auf einen Wert nahe des Ausgangsniveaus von 1995 verringert werden [ZVEI 2008]. Für diese Entwicklung ist zum einen die geringere Auslastung, zum anderen aber auch die Investitionen der Hersteller in optimierte Prozesse (Remote Plasma Clean) und Abgasreinigungsanlagen verantwortlich. Bei der Remote Plasma Clean-Methode werden 99,9 % des eingesetzten NF₃ umgesetzt, bei HFKW-Gasen liegt die Rate dagegen nur bei ca. 95 % [Chen u.a. 2003].

Als weiteres Substitut wurde in Japan ClF₃ diskutiert. Dabei handelt es sich um einen Raketentreibstoffzusatz und um eine hochexplosive gefährliche Chemikalie. In Europa und den USA wird der Einsatz aus Sicherheitsgründen abgelehnt [Infineon 2003].

Vor einigen Jahren wurde C₃F₈ in der Kammerreinigung vorgestellt, zunächst als mögliche Alternative für C₂F₆. C₃F₈ wird heute bereits in der Halbleiterindustrie eingesetzt. Die Einsatzmengen sind seit der Einführung 1997 zunächst kontinuierlich gestiegen, bleiben seit wenigen Jahren aber in etwa gleich. Nach Aussage des Herstellers können die Kosten mit C₃F₈ durch um bis zu 60 % verringerte Einsatzmengen bei gleichzeitiger Reduktion der FKW-Emissionen gesenkt werden. Darüber hinaus kann C₃F₈ in bestehenden C₂F₆-Anlagen als drop-in eingesetzt werden [3M 2003a]. Nachteilig wird angeführt, dass CF₄ als Nebenprodukt entsteht. Noch 1998 wurde C₃F₈ daher als Zwischenlösung bewertet [Beu u. a. 1998].

Des Weiteren waren C₄F₈O (3M), C₄F₉ (Dupont) und viele andere Chemikalien, einschließlich diverser HFKW und CF₃I, als neue Stoffe in der Diskussion [Beu u. a. 1998; 3M 2003b]. Trotz vielversprechender Tests in Europa und in Deutschland, die nach Aussage des Herstellers im Vergleich zu optimierten FKW-Prozessen eine Emissionsminderung um 90 % ermöglichen, konnte sich keine dieser Chemikalien hierzulande durchsetzen [3M 2003b; ZVEI 2008].

Neben der Substitution von Stoffen sind Prozessoptimierungen eine weitere Option, die Emissionen treibhausrelevanter Gase zu verringern. Auch hieran wird intensiv gearbeitet. Prozessoptimierungen in der Halbleiterindustrie zielen auf eine Verringerung des Chemikalieneinsatzes durch höhere Umsetzungsraten. Dies geht mit geringeren Rohstoff-, aber auch geringeren Entsorgungskosten bei gleichzeitiger Reduktion von Emissionen einher. Damit führen Prozessoptimierungen in der Regel zu einer Verringerung negativer Umweltauswirkungen bei gleichzeitiger Kostenreduktion [Infineon 2003]. Forschungsarbeiten in Bezug auf Prozessoptimierungen legen ihren Focus bisher auf Kammerreinigungsprozesse. Dies hängt mit den geringeren Anforderungen an die bei der Kammerreinigung ablaufenden Ätzprozesse zusammen. In Einzelfällen können Prozessoptimierungen zu Emissionsreduktionen von 10-50 % führen. Intensive Forschungsarbeit ist beispielsweise in Bezug auf C₂F₆ als Reinigungsgas geleistet worden [Beu u. a. 1998].

Neben Prozessoptimierungen wird an Recycling-Konzepten gearbeitet. In der Entwicklung sind Membran-Verfahren und/oder kryotechnische Separationstechniken [Vartanian u. a. 2000]. Recycling-Konzepte können sowohl für Abgase aus Ätz- als auch aus Reinigungsprozessen greifen. Nach Information von Halbleiterherstellern hat eine in diesem Zusammenhang in den USA erprobte Pilotanlage (Texas Instruments) zum Recycling von FKW keinen Erfolg gehabt. Problematisch war hier vor allem, dass grundsätzlich Gasmischungen vorliegen, deren Trennung sehr schwierig ist [Infineon 2003].

Zur Emissionsminderung werden derzeit vor allem Abluftreinigungstechniken eingesetzt [Infineon 2003]. Auch diese können wie Recycling-Konzepte sowohl für Abgase aus Ätz- als auch aus Reinigungsprozessen eingesetzt werden. Bereits während des Ätz-/Reinigungsprozesses werden die FKW teilweise umgesetzt. Durch eine nachgeschaltete Abgasreinigung können sie dann weitgehend (85-99 %) zerstört werden. Abluftreinigungsanlagen sind heute Stand der Technik. Allerdings sind bisher nicht alle Anlagen mit effizienten Abgasreinigungssystemen ausgestattet. Im Jahr 1997 waren es 30 % aller deutschen Produktionsstätten [Schwarz, Leisewitz 1999], bis 2007 hat sich der Anteil, wie bereits erwähnt, auf 60 % erhöht [ZVEI 2007]. Bei manchen Herstellern ist der maximale Ausrüstungsgrad bereits erreicht, so dass 95-98 % der anfallenden Gase gereinigt werden [Infineon 2009]. Es kann zwischen lokal ansetzenden POU (point-of-use) Techniken und EOP (end-of-pipe) Techniken für mehrere Kammern oder ganze Produktionsstätten unterschieden werden [Beu u. a. 1998]. Die Kosten für Abluftreinigungsanlagen variieren zwischen 60.000 und 200.000 Euro zuzüglich Installationskosten. Letztere liegen zwischen 5.000 und 30.000 Euro. Betriebskosten geben Betreiber mit etwa 18.000 Euro an. Alle Kosten sind abhängig vom Durchsatz und von der Art der Anlage [Infineon 2003]. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass eine Abgasreinigung teurer ist als Primärmaßnahmen [Beu u. a. 1998]. Thermische Verfahren sind von allen Abluftreinigungsverfahren am teuersten [Infineon 2003]. Vartanian u. a. [2000] haben die Kosten für thermische Verfahren (EOP) und Plasmaverfahren (POU) verglichen. Sie kommen auf Investitionskosten von \$25,000-\$50,000 pro Kammer für das langzeiterprobte thermische Verfahren und von \$20,000-\$25,000 pro Kammer für das relativ neue Plasmaverfahren. Die jährlichen Betriebskosten lagen bei \$10.000-\$25.000 und \$500-\$1.000.

Nach Einschätzung der Industrie werden auch zukünftig vielfältige Emissionsminderungsmaßnahmen nebeneinander Bestand haben. Neue Entwicklungen werden in den meisten Fällen nur für neue Fabriken oder Produktionserweiterungen zum Tragen kommen [Infineon 2003].

Schlussfolgerungen

Die mit der Erklärung des WSC im Jahr 1999 erstmals festgelegten und von deutschen Halbleiterherstellern in einer daraus resultierenden Selbstverpflichtung ebenfalls verfolgten Ziele können nur durch die Umsetzung effizienter Maßnahmen erreicht werden. Maßnahmen zur Emissionsminderung sind:

1. alternative Chemikalien / Gase,
2. Prozessoptimierungen,
3. Recycling und Abluftreinigung (End-of-pipe-Techniken).

Die Entwicklung alternativer, weniger umweltschädlicher Chemikalien hat als beste und zukunftsweisende Lösung oberste Priorität. Prozessoptimierungen sind wichtige, ergänzende Maßnahmen, die meist auch zu einer Kosteneinsparung führen. End-of-pipe-Techniken sind dort sinnvoll, wo andere, primäre Maßnahmen nicht möglich sind oder wo sie Primärmaßnahmen ergänzen. Dies betrifft vor allem Altanlagen. Generell können neue Gase für Ätzprozesse meist nur für neue Kammern eingesetzt werden, während andere Maßnahmen auch bei bestehenden realisierbar sind.

Einige von der chemischen Industrie in Zusammenarbeit mit den Anlagenherstellern entwickelte alternative Chemikalien zeigen in Pilotanlagen gute Ergebnisse und werden teilweise bereits großtechnisch eingesetzt. In Kombination mit Prozessoptimierungen sowie den weiteren dargestellten Maßnahmen ist zu erwarten, dass die Halbleiterindustrie ihre angestrebten Ziele erreichen kann.

Die konsequente Umsetzung von Forschungsergebnissen beim Aufbau neuer oder der Modernisierung bestehender Produktionskapazitäten sowie die Ausstattung bestehender Produktionsstätten mit nachgeschalteten Abgasreinigungen oder die Implementierung anderer geeigneter Maßnahmen ist für eine Erreichung der Ziele erforderlich.

8.2 *Dünnschichtsolarzellen- und Flachbildschirmproduktion*

Bei der Herstellung von Dünnschichtsolarmodulen kommt wie bei der Produktion von mehrschichtigen Wafern die Chemical Vapor Deposition (CVD)-Methode zur Anwendung. Das Silizium wird hierbei aus der Gasphase auf eine Glasscheibe aufgebracht, die Reinigung der CVD-Kammern ist dabei ebenso erforderlich wie in der Halbleiterherstellung. Hierzu wird SF₆ und in zunehmendem Maße NF₃ eingesetzt, wobei letzteres gegenüber SF₆ eine schnellere Kammerreinigung gewährleistet und daher für den Herstellungsprozess besser geeignet ist. Aus diesem Grund ist damit zu rechnen, dass zukünftig eher NF₃ als SF₆ zu Reinigungszwecken verbraucht wird. Obwohl die in

Deutschland produzierenden Dünnschichtmodulhersteller ihre Produktion mit Abgasreinigungsanlagen ausgestattet haben, entweichen ca. 3-5 % des eingesetzten Reinigungsgases in die Atmosphäre, weil Anlagen überlastet sind oder Funktionsstörungen aufweisen. Dies resultiert aus der falschen Dimensionierung dieser Anlagen, die zunächst bei der Halbleiterherstellung installiert wurden und dort für viel kleinere Gasmengen ausgelegt sind [Sollmann 2008].

Ein weiterer Prozess, bei dem die CVD-Methode für die Beschichtung von Glasoberflächen zur Anwendung kommt, ist die Herstellung von Flachbildschirmen (Liquid Crystal Displays, LCD) und LCD-Fernsehern. Analog zu den oben aufgeführten Fertigungsprozessen müssen Kammerreinigungen durchgeführt werden. In diesem Anwendungsbereich kommt überwiegend NF_3 als Fluorlieferant zum Einsatz. Laut ZVEI gibt es in Deutschland keine bedeutenden Produktionskapazitäten für LCD-Flachbildschirme oder LCD-Fernseher [ZVEI 2010].

Minderungsmöglichkeiten

Der einfachste Lösungsansatz besteht in erster Linie in der den anfallenden Treibhausgasemissionen entsprechenden Auslegung der Abgasreinigungsanlagen sowie die Sicherstellung eines störungsfreien Betriebs, z. B. durch redundante Auslegung der Abgasreinigungsanlagen.

Eine Alternative zu fluorierten Treibhausgasen stellt der Einsatz von Fluorgas (F_2) dar. Dieses wird aufgrund seiner korrosiven Eigenschaften und Giftigkeit jedoch nicht direkt als Gas in Druckgasflaschen ausgeliefert und eingesetzt, sondern durch ein elektrochemisches Verfahren vor Ort aus Fluorwasserstoff (HF) gewonnen. Diese Methode, als On-site Fluor-Verfahren bezeichnet, wird bereits bei der Herstellung von Flachbildschirmen eingesetzt [Toshiba 2006]. In Kombination mit geeigneten Abgasreinigungstechniken birgt dieses Verfahren ein großes Potenzial, die Emissionen von fluorierten Treibhausgasen in diesem und verwandten Anwendungsbereichen deutlich zu senken. Auch in Deutschland wird die Technik bereits eingesetzt. Da mit elementarem Fluor die Reinigungszeit halbiert und damit der gesamte Produktionsablauf um 10% gekürzt werden kann, ist diese Alternative auch kostengünstiger als die bisher eingesetzten Verfahren zur Kammerreinigung [Linde 2010].

Alternativ zur CVD-Technik kann bei der Dünnschichtsolarzellenherstellung auch die sogenannte Electron-Beam Evaporation eingesetzt werden, die eine zielgerichtete Beschichtung ermöglicht. Der aufwändige Prozess der Kammerreinigung ist bei diesem Verfahren nicht nötig, die Depositionsraten sind mit 20 nm/s zusätzlich wesentlich höher als bei der CVD (0,5-2 nm/s) [Becker u.a. 2008]. Bisher ist diese Technik jedoch lediglich auf Anwendungen in der Forschung beschränkt, eine großtechnische Herstellung nach diesem Prinzip wurde noch nicht realisiert.

Schlussfolgerungen

Bei großen Neuanlagen ist heute der Einsatz fluorierter Treibhausgase nicht mehr erforderlich. In bestehenden Anlagen kann die Prozessführung so optimiert werden, dass Emissionen fluorierter Treibhausgase deutlich reduziert werden. Durch eine redundante Auslegung der Abgasreinigungsanlagen ist eine Emissionsminimierung sichergestellt.

8.3 Leiterplattenherstellung

In der Leiterplattenherstellung werden Ätzverfahren zur Reinigung und/oder Vorbereitung von Oberflächen für die spätere Aufbringung von Kupferschichten (Metallisierung), beispielsweise nach der Herstellung von Bohrlöchern zur Entfernung (desmear) der aus dem Epoxidharz entstandenen, unerwünschten Produkte (Verschmierungen = smear) und zum Rückätzen (etchback, zum Beispiel von Epoxidharz) zur Vergrößerung der Oberfläche eingesetzt. Werden zum Ätzen Plasmaprozesse eingesetzt, wird CF₄ in einem Gemisch mit Sauerstoff als Ätzgas eingesetzt [Schwarz, Leisewitz 1999; ZVEI 2002]. Der CF₄-Anteil beträgt je nach Anwendung zwischen 5 und 15 % [plasonic 2003].

Ein weiteres Einsatzgebiet für Plasmaverfahren ist z. B. das Plasmalochbohren flexibler Leiterplatten [iaf].

Minderungsmöglichkeiten

Obwohl Plasmaprozesse in der Halbleiterfertigung breite Anwendung finden, werden sie bei der Leiterplattenherstellung noch nicht von allen Herstellern eingesetzt [plasonic 2003]. Viele, vor allem europäische Hersteller setzen weiterhin nasschemische Verfahren ein. Hierbei wird zum Entfernen der Verschmierungen (desmear) das Basismaterial mit einem Lösemittel aufgequollen und anschließend mit einer warmen Permanganatlösung abgeätzt und neutralisiert [anonym; EPA]. Weitere Verfahren existieren, werden aber heute kaum noch eingesetzt. Für die Rückätzung (etchback) können anorganische Säuren eingesetzt werden [anonym].

Im Vergleich zu flüssigen Reinigungsverfahren (nasschemische Verfahren) hinterlassen Plasmaprozesse keine korrosiven Rückstände auf den Bauteilen. Es ist eine gleichbleibende Qualität (da keine schwankenden Badkonzentrationen) garantiert [iaf]. Für einige Leiterplattenmaterialien können keine nasschemischen Verfahren angewendet werden. So müssen nach Angabe des ZVEI [2002] für Teflon sowie für Polyimid in Verbindung mit Acrylharzklebern die Bohrverschmierungen (smear) mit dem trockenen Plasmaprozess entfernt werden. Auch die Reinigung von Microvias (Micro-Bohrlöcher) in flexiblen Leiterplatten ist mittels Nassreinigungsverfahren wegen der sehr geringen Durchmesser

kaum möglich [plasonic 2003]. Dieser als Post-Laser-Plasma-Reinigung bezeichnete Prozess erfolgt, wie bereits im Namen genannt, daher mittels Plasmaverfahren [ZVEI 2002].

Mit dem Einsatz von Plasmaprozessen wird die gesamte nasschemische Bearbeitung hinfällig. Dies führt nach verschiedenen Aussagen [anonym; EPA; ZVEI 2002] zu einer Reduktion der Betriebskosten, des Wasserverbrauchs und des Abfallaufkommens. Plasmaprozesse werden im Vergleich zu nasschemischen Verfahren als umweltverträglicher bewertet. Die US EPA unterstützt vor diesem Hintergrund die Umstellung nasschemischer Verfahren auf Plasmaprozesse.

Neue, weniger umweltschädliche Ätzelektrolyse wurden für die Leiterplattenherstellung bisher nicht entwickelt.

Im Gegensatz zu den oben dargestellten Plasmaprozessen (desmearing, etchback) steht das Plasmalochbohren flexibler Leiterplatten in Konkurrenz zum Laserbohren. Letzteres erreicht heute eine so hohe Qualität, dass das Bohren mittels Plasmaverfahren voraussichtlich keine weite Verbreitung erlangen wird [plasonic 2003].

Nach plasonic [1999: aus Schwarz, Leisewitz 1999] gibt es in der Leiterplattenfertigung zwar alkalische Abgaswäscher zum Auffangen der Reaktionsprodukte (z. B. HF), aber keine Anlagen, die das nicht umgesetzte oder rekombinierte CF_4 im Abgas spalten könnten. Damit schätzt Schwarz [1999] die CF_4 -Emissionen im Abgas der Prozesskammer auf 85 %, plasonic [2003] auf bis zu 98 % des zugeführten CF_4 -Gases. An der Situation im Jahr 1999 hat sich bis heute kaum etwas geändert. Zwar stehen nach Auskunft von plasonic [2003] heute Technologien für eine nachgeschaltete Verbrennung (analog der in der Halbleiterindustrie eingesetzten Technik) zur Verfügung. Deren Einsatz ist aber mit Investitionskosten in einer Größenordnung von 200.000 € verbunden. Zum Vergleich: Die Anlagenkosten (Plasmaanlage) liegen ebenfalls um 200.000 €, die Kosten für eine nachgeschaltete Nasswäsche um 50.000 €, wobei die Nasswäsche durch eine nachgeschaltete Verbrennung nicht hinfällig wird.

Schlussfolgerungen

Die heute für die Leiterplattenherstellung zur Verfügung stehenden, ohne CF_4 arbeitenden Technologien können nicht für alle Leiterplatten (-materialien, -typen) eingesetzt werden. Auch werden sie allgemein als weniger umweltverträglich bewertet. Eigene Bewertungen sind vor dem Hintergrund der geringen Relevanz dieser Anwendung in Bezug auf die FKW-Emission nicht durchgeführt worden. Alternative Ätzelektrolyse wurden für die Leiterplattenherstellung bisher nicht entwickelt.

Damit bleiben zur Emissionsminderung aus heutiger Sicht vor allem end-of-pipe Techniken. Wie bereits für die Halbleiterindustrie ist auch in der Leiterplattenproduktion der Einsatz von nachgeschalteten Spaltanlagen (Verbrennung)

eine technische Möglichkeit, die CF₄-Emissionen zu verringern. Deren Einsatz ist jedoch mit hohen Kosten verbunden. Vor dem Hintergrund der eher geringen Emissionen ist die Verhältnismäßigkeit einer solchen Maßnahme nicht grundsätzlich gegeben. Allerdings werden sich Plasmaprozesse voraussichtlich auch in der Leiterplattenproduktion immer weiter durchsetzen. In der Folge werden auch die Emissionen fluorierter Gase zunehmen. Zumindest bei größeren Produktionsstätten sollte der Einsatz z. B. einer nachgeschalteten Verbrennung daher in Betracht gezogen werden. Außerdem sollte die Entwicklung kleinerer und damit kostengünstigerer Anlagen für entsprechend kleine Fertigungsanlagen angestoßen werden.

In Kapitel 8 verwendete Literatur

- 3M (2003a): Produktinformation. (<http://cms.3m.com/cms/US/en/2-178/iilelFY/view.jhtml>; 4.9.2003).
- 3M (2003b): Mündliche Mitteilung Herr Peter Breloer vom 13. Februar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- Anhörung (2003): Gespräche zu fluorierten Treibhausgasen auf der Basis des Eckpunktepapiers und der hierzu im BMU eingegangenen Stellungnahmen zu den Anwendungsbereichen „stationäre Kälte- und Klimatechnik“ (28./29. Januar 2003), „mobile Kälte- und Klimatechnik (einschl. Transportisolierung)“ (30. Januar 2003), „Verschäumung (einschließlich Montageschaum)“ (12. Februar 2003), „SF₆ in Schaltanlagen“ (13. Februar 2003), „Halbleiterindustrie“ (13. Februar 2003) und „Sprayanwendungen, Feuerlöschmittel, sonstige Anwendungen“ (14. Februar 2003), Umweltministerium, Bonn.
- anonym (keine Jahresangabe): Information im Internet zu Plasmaverfahren. (<http://207.207.205.214/bmr/desmeat.htm>; 7.10.2003).
- Beu, Laurie u. a. (1998): *Current State of Technology: Perfluorocompound (PFC) Emissions Reduction*. International SEMATECH Technology Transfer # 98053508A-TR, S. 1-13. (www.sematech.org; 12.10.2010).
- BReg - Bundesregierung (2004): Berichterstattung der Bundesrepublik Deutschland gemäß Artikel 5, 7 und 8 des Kyoto-Protokolls der UN-Klimarahmenkonvention zu fluorierten Treibhausgasen an das Sekretariat der Klimarahmenkonvention im Jahr 2004. (<http://unfccc.int/program/mis/ghg/submis2003.html>; 8.1.2004).
- Chen, Xing; Holber, William; Loomis, Paul; Sevillano, Evelio; Shao, Shou-Qian; Bailey, Scott; Goulding, Michael (2003): *Advances in remote plasma sources for cleaning 300 mm flat panel CVD systems*. In: Semiconductor Magazine, 2003 (8), Reed Elsevier, London.

- EPA - US Environmental Protection Agency (keine Jahresangabe): Case Study 4: *Plasma Desmear*. Fallstudie im Rahmen des "Design for the Environment (DfE) Program". (www.epa.gov/dfe/pubs/pwb/case_stu/case4/index.htm; 7.10.2003).
- Harnisch, Jochen; Hendriks, Chris (2002): *Economic Evaluation of Emission Reductions of HFCs, PFCs and SF₆ in Europe*. Contribution to the study *Economic Evaluation of Sectoral Emission Reduction Objectives for Climate Change*. Studie im Auftrag der Europäischen Kommission, GD Umwelt, Köln: Ecofys Energy and Environment.
- iaf - Institut für angewandte Forschung Göppingen (keine Jahresangabe): Arnim, Volkmar von; Feßmann, Jürgen: *Einsatz von Plasmatechnologie für das Löten und Bonden mikrosystemtechnischer Komponenten*. Projekt gefördert durch das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg. (www2.fht-esslingen.de/institute/iafgp/deutsch/proj_pla.htm; 7.10.03).
- Infineon (2003): Mündliche Mitteilung Herr Wolfgang Bloch vom 13. Februar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- Infineon (2009): Mündliche Mitteilung Herr Dr. Christian Pophal vom 6. April 2009.
- Linde (2010): Die CO₂-Manager, S. 29-31 (www.the-linde-group.com/de/images/Linde%20Technology_1_2010_de16-10183.pdf) Linde Technology, Ausgabe 1.10.
- plasonic - plasonic Oberflächen GmbH Gerlingen (1999): Persönliche Mitteilung an Herrn Winfried Schwarz, Öko-Recherche, vom 20. Mai 1999.
- plasonic - plasonic Oberflächen GmbH Gerlingen (2003): Persönliche Mitteilung Herr Messelhäuser vom 8. Oktober 2003.
- Schwarz, Winfried; Leisewitz, André (1999): *Emissionen und Minderungspotential von HF₆W, FKW und SF₆ in Deutschland*. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 298 41 256, Frankfurt/Main: Öko-Recherche. (www.umweltbundesamt.de/luft/emissionen/f-und-e/abgeschlossen/index.htm; 30.12.2003).
- Schwarz, Winfried (2009): *Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland 2008*. Studie im Auftrag des Umweltbundesamt, Förderkennzeichen 360 16 026, Dessau-Roßlau: UBA. (<http://www.umweltbundesamt.de/produkte/fckw/emissionen.htm>).
- Sollmann, Dominik (2008): *Klimakiller Photovoltaik?* In: Photon 2008 (12), 56-58, Aachen: Photon Europe GmbH.
- Toshiba – Toshiba Matsushita Display technology Co., Ltd. (2006): *Japan's first environmentally-conscious process adopted in the new plant for LTPS TFT LCD Panels*. Pressemitteilung. (www.tmdisplay.com/tm_dsp/press/2006/06-09-19.html; 17.03.2009).

- Vartanian, Victor u. a. (2000): Semiconductor International, 6/1/2000. (www.reed-electronics.com/semiconductor/index.asp?layout=article&articleid=CA47528&rid=0&rme=0&cfd=1; 11.9.2003).
- WSC - World Semiconductor Council (1999): Third WSC meeting in Fiuggi, Italy on April 23, 1999.
- ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) e. V., Fachverband Bauelemente der Elektronik (2002): *Stellungnahme des Fachverbands Bauelemente der Elektronik im ZVEI zum Eckpunktepapier des BMU zu Fluorierten Treibhausgasen*. Frankfurt/Main: ZVEI.
- ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie (ZVEI) e.V., Fachverband Electronic Components and Systems (2005): *Selbstverpflichtung der Halbleiterhersteller mit Produktionsstätten in der Bundesrepublik Deutschland zur Reduzierung der Emissionen bestimmter fluorierter Gase*. Frankfurt/Main: ZVEI.
- ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie (ZVEI) e.V., Fachverband Electronic Components and Systems (2007): *Zwischenbericht zur Selbstverpflichtung der Halbleiterhersteller mit Produktionsstätten in der Bundesrepublik Deutschland zur Reduzierung der Emissionen bestimmter fluorierter Gase*. Frankfurt/Main: ZVEI.
- ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie (ZVEI) e.V., Fachverband Electronic Components and Systems (2008): *Freiwillige Meldung der PFC-Emissionen der Deutschen Halbleiterindustrie für 1995 - 2007*. Vom 2. Juni 2008, Frankfurt/Main: ZVEI.
- ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie (ZVEI) e.V., Fachverband Electronic Components and Systems (2009): *Freiwillige Meldung der PFC-Emissionen der Deutschen Halbleiterindustrie für 1995 - 2008*. Vom 25. Mai 2009, Frankfurt/Main: ZVEI.
- ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie (ZVEI) e.V., Hausgeräte-Fachverbände (2010): Persönliche Mitteilung Herr Christian Eckert vom 15. Januar 2010.

9 SF₆ als Lösch- und Isoliergas in elektrischen Betriebsmitteln

Elektrische Betriebsmittel (Schaltgeräte, Schaltanlagen und Transformatoren) werden in Stromnetzen zur Verteilung und Umspannung von Strom und zur Zusammenschaltung und Trennung von Versorgungsunternehmen und von Industriebetrieben eingesetzt. Elektrische Betriebsmittel finden in allen Spannungsbereichen von der Niederspannung (NS, Spannungen kleiner 1 kV) bis hin zur Höchstspannung Anwendung. Der Spannungsbereich über 1 kV wird unterteilt in Mittelspannung (MS: 1 bis kleiner 52 kV), Hochspannung (HS: ab 52 kV) und Höchstspannung (größer 110 kV). Die SF₆-Betriebsmittel werden hauptsächlich durch die Energieversorgungsunternehmen (öffentliche Netzbetreiber) betrieben.

Schwefelhexafluorid (SF₆) wird als Lösch- und/oder Isoliermedium in elektrischen Betriebsmitteln der Hochspannung (>52 bis 380 kV) seit den sechziger Jahren weltweit verwendet, in der Mittelspannung (1-52 kV) erst 10 Jahre später. SF₆ ersetzte die Medien Öl oder Luft. Für die Herstellung von Komponenten für gasisolierte Innenraumschaltanlagen (Wandler und Durchführungen) und von Hochspannungs-Freiluftwandlern kommt SF₆ ebenfalls zum Einsatz. In Geräten der Niederspannung wird SF₆ nicht verwendet [ZVEI 2003].

Mit 915 t im Jahr 2008 geht die größte Menge des insgesamt in Deutschland verwendeten SF₆ in den Bereich „elektrische Betriebsmittel“ [ZVEI 2009]. Der Großteil der in Deutschland produzierten Anlagen wird exportiert. SF₆-Emissionen dieser Anlagen werden, außer den Emissionen bei der Herstellung, am Einsatzort freigesetzt und daher in der deutschen Berichterstattung nicht berücksichtigt.

Die Gesamtfüllmenge an SF₆ in bestehenden elektrischen Betriebsmitteln > 1kV betrug in Deutschland im Jahr 2008 etwa 1.860 t. Davon entfallen etwa 60 % auf Hochspannungsgeräte und -anlagen. Konventionelle Geräte (Leistungsschalter, Wandler) sind mit 1/3 und gasisolierte Schaltanlagen (GIS) mit 2/3 an den SF₆-Bestandsmengen in Hochspannungsanlagen beteiligt.

Etwa 40 % der SF₆-Mengen kommen in Mittelspannungsanlagen zur Anwendung. Hierbei bilden die Lasttrennschalteranlagen (Ring-Main-Units (RMUs)) einen Anwendungsschwerpunkt mit 2/3 der in diesen Bereich gehenden SF₆-Menge. In

Leistungsschaltern (bis 36 kV) und Leistungsschalteranlagen werden geringe Mengen eingesetzt [ZVEI 2004, 2009]. Abbildung 9.1 zeigt die im Jahr 2008 in Deutschland installierten SF₆-Mengen in den verschiedenen elektrischen Betriebsmitteln.

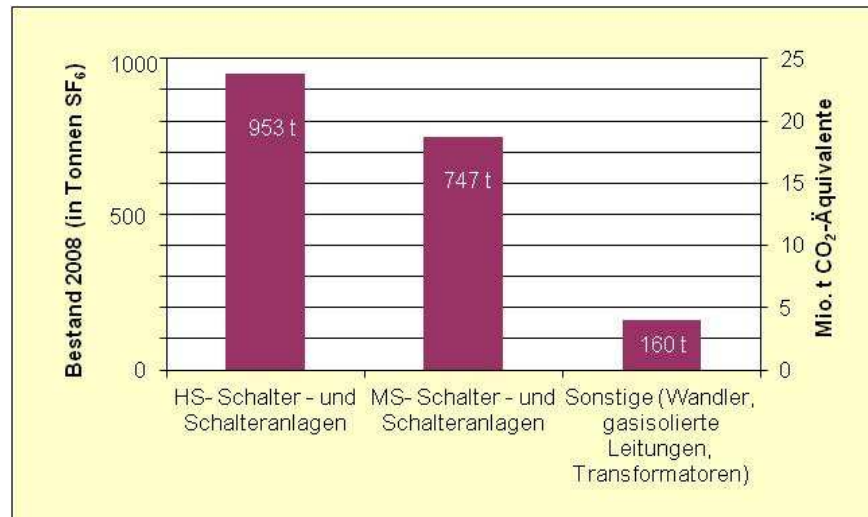


Abbildung 9.1: Im Jahr 2008 in Deutschland in elektrischen Betriebsmitteln installierte SF₆-Menge in t nach [ZVEI 2009].

Die SF₆-Emissionen bei Herstellern und Betreibern elektrischer Betriebsmittel betrugen im Jahr 2008 etwa 22,7 t [ZVEI 2009]. Die Netzbetreiber haben ihre Datenerhebung für die Hochspannung effizienter gestaltet; sie ermitteln in repräsentativen Referenzanlagen die Dichtheit der Anlagen, um Emissionsfaktoren für diese Anlagen zu ermitteln. [Schwarz 2007]. Die Emissionsentwicklung seit 1990 ist in Kapitel 2 dieses Berichtes dargestellt.

Eine Studie zur Hoch- und Mittelspannungsausrüstung in Europa zeigt, dass sich seit Mitte der neunziger Jahre die SF₆-Emissionen über den Lebenszyklus reduziert haben; bis 2020 könnten aber weitere Reduktionen erreicht werden, wenn die Maßnahmen in ganz Europa durchgeführt werden [Ecofys 2005].

Für Schaltanlagen, die SF₆ enthalten, gilt die Europäische F-Gase Verordnung. Sie schreibt vor, dass die Rückgewinnung von SF₆ aus Schaltanlagen größer 1 kV nur durch zertifiziertes Personal erfolgen darf und gibt Mindestanforderungen an das Personal vor, dass das Recycling, die Aufarbeitung und die Zerstörung vornimmt. Schaltanlagen, die SF₆ enthalten, sind zu kennzeichnen.

Zahlreiche internationale und nationale Normen für Schaltgeräte und -anlagen (wie die Normen der Reihe IEC 62271 und in Deutschland der Reihe DIN EN 62271/VDE0671) sind in den letzten Jahren systematisiert und überarbeitet worden, so dass der Umgang mit SF₆ in Schaltanlagen auch weltweit auf einer einheitlichen Basis erfolgen kann. In Deutschland

geben die Informationen der Berufsgenossenschaft zu SF₆-Anlagen und Betriebsmitteln zusätzliche Hinweise und Empfehlungen für die praktische Anwendung der Regeln zu SF₆ [BGI 2008].

CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Electriques), das internationale Forum für elektrische Energieerzeugung, -übertragung und -verteilung, veröffentlichte Leitfäden zum Umgang mit SF₆ und zum Recycling [CIGRE 2003, 2005]. Diese CIGRE Guides sind in einen technischen Bericht des Internationalen Normenkomitees IEC überführt und in deutscher Übersetzung im nationalen Normenwerk des VDE verfügbar.

Diese Berichte weisen auch darauf hin, dass aufgrund geringerer Dichtigkeit bestimmte ältere gasisolierte Betriebsmittel, insbesondere die von Hochspannungssystemen eine hohe betriebliche SF₆-Leckagerate haben können, und deshalb Maßnahmen zur Reduzierung dieser SF₆-Emissionen realisiert werden sollten. Zur Vermeidung von SF₆-Emissionen werden Verfahren für den sicheren und umweltverträglichen Umgang mit SF₆ während der Erstmontage, der Inbetriebnahme, der üblichen und außergewöhnlichen Betriebszustände, der Entsorgung am Lebensdauerende der Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen definiert. Die Lagerung und der Transport von SF₆ werden ebenfalls behandelt. Weiterhin wird der Umgang mit den möglichen Zersetzungsprodukten von SF₆, die bei starker Lichtbogeneinwirkung entstehen können, definiert [IEC 2007, IEC 2008].

CIGRE hat 2007 für SF₆-isolierte Betriebsmittel > 1 kV eine neue Broschüre „SF₆ Tightness Tests“ herausgegeben. Ziel ist die Festlegung von Verfahren und Messmethoden auf internationaler Ebene, um minimale betriebliche Leckageraten zu erreichen. Eine überarbeitete Fassung wird Ende 2010 erwartet.

Der Weltklimarat (UNFCCC) hat zwei anerkannte Methodologien zur Berechnung der Gutschriften für die Emissionsvermeidung von SF₆ bei der Rückgewinnung/Wiedergewinnung von SF₆ aus Stromnetzen und für die Rückgewinnung von SF₆ nach Schaltanlagentests erarbeitet [UNFCCC 2006, 2009]. Bisher sind im UNFCCC noch keine Projekte genehmigt. Projekte wären nur in Staaten möglich, in denen die Rückgewinnung von SF₆ rechtlich noch nicht vorgeschrieben ist.

Schaltanlagen und elektrische Betriebsmittel

Elektrische Betriebsmittel der Stromversorgung befinden sich an Knotenpunkten von Übertragungs- und Verteilnetzen der öffentlichen Energieversorgung und in der Industrie. In diesen Netzen werden z. B. Netzteile und/oder Verbrauchergruppen mittels Schaltanlagen zu- oder abgeschaltet. Wesentliche Bestandteile von **Schaltanlagen** sind Leistungs-, Last- und Trennschalter. Schaltanlagen können als Freiluft- oder als Innenraumanlagen gebaut werden.

Bei den Mittelspannungsnetzen unterscheidet man zwischen Primär- und

Sekundärverteilnetzen. Zur **Primärverteilung** gehören MS-Schaltanlagen mit Leistungsschaltern, z. B. in Umspannwerken¹ oder in Kraftwerken, die von Hoch- auf Mittelspannung umwandeln. Neben dem Ein- und Ausschalten von Betriebsströmen in Teilnetzen müssen Schaltanlagen hohe Kurzschlussströme, die aus Fehlern und Störungen im Stromkreis resultieren, in Millisekunden abschalten und entstehende Lichtbögen löschen können. Die **Sekundärverteilung** umfasst die Verteilung der elektrischen Energie auf der Mittelspannungsebene und die Transformation² von Mittel- auf Niederspannung. Es werden hier im Wesentlichen Lasttrennschalteranlagen und - in geringem Umfang - kombinierte Lasttrenn-/Leistungsschalteranlagen eingesetzt [Schwarz, Leisewitz 1999; VDN 2002; Nelles, Tuttas 1998; Heuck, Dettmann 1999].

Typische elektrische Anlagen, die SF₆ enthalten, sind in einer Studie für die EU beschrieben [Ecofys 2005].

9.1 *Schaltanlagen im Spannungsbereich 52-380 kV- Hochspannung*

In der Hochspannung werden, abgesehen von sehr alten Anlagen, heute im Wesentlichen zwei Anlagentypen eingesetzt: SF₆-isolierte Hochspannungsschaltanlagen und Freiluftanlagen. Beide Typen enthalten das Treibhausgas SF₆, allerdings in sehr unterschiedlichen Mengen.

SF₆-isolierte Hochspannungsschaltanlagen, engl. **Gas Insulated Switchgear** oder kurz GIS, werden hauptsächlich in Innenräumen installiert. Alle Komponenten sind zu einem geschlossenen, metallgekapselten System zusammengefasst. Der Grund für den Einsatz von SF₆ liegt vor allem in seiner sehr guten Isoliereigenschaft und dem guten Löschvermögen für energiereiche Lichtbögen. In einer GIS können die Abstände zwischen den spannungsführenden Bauteilen bis zu zehnmal geringer gehalten werden als bei den üblichen Freiluftanlagen [Schwarz, Leisewitz 1999; VDN 2002; Nelles, Tuttas 1998; Heuck, Dettmann 1999]. GIS benötigen eine etwa um den Faktor 10 kleinere Fläche als Freiluftanlagen. SF₆-isolierte Schaltanlagen enthalten von einigen bis 200 kg SF₆ pro Gasraum. Nach 20-25 Jahren ist eine Wartung nötig [Ecofys 2005]. Die betrieblichen

¹ Jede HS-Schaltanlage setzt sich aus Schaltfeldern zusammen. Jedes Schaltfeld (meist sechs bis zehn pro Schaltanlage) hat einen eigenen Leistungsschalter, eigene Anschlüsse an die Sammelschienen, eigene Kabelabgänge usw. HS-Schaltanlagen sind oft an den Einspeisepunkten lokaler Mittelspannungsnetze von der regionalen oder überregionalen Hochspannungsleitung lokalisiert. Sie sind meist einem Transformator vorgelagert, der die Abspannung vornimmt.

Auf der Abgangs- oder Mittelspannungsseite des Transformators befindet sich eine Mittelspannungsschaltanlage (10-30 kV) zum Ein- und Ausschalten des Stromnetzes der niedrigeren Spannungsebene. Hochspannungsschaltanlage, Transformator und Mittelspannungsschaltanlage (Leistungsschalteranlage) bilden oft eine bauliche Einheit, das Umspannwerk.

² Zur Transformation von Mittel- auf Niederspannung dienen die Transformatorstationen. Diese sind neben dem Transformator mit Lasttrennschalteranlagen (RMUs) bestückt.

Leckageraten liegen, da es sich um ein „geschlossenes Drucksystem für Gas“ handelt, unterhalb von 0,5 % pro Jahr [IEC 2007] und sind in der Praxis geringer. Hinzu kommen ggf. wartungsbedingte Emissionen. Die einmalig auftretenden Entsorgungsemissionen liegen unter 2 %. Aktuell werden für HS- Schaltanlagen und -geräte Emissionsraten von 0,7 % pro Jahr berichtet, sie beinhalten Nachfüllmengen aus Leckagen und Verluste bei Wartungsarbeiten [ZVEI 2009].

Bei beschränktem Platzangebot, wie in Ballungsgebieten oder Industriezentren, werden GIS verstärkt als Alternative zu den üblichen Freiluftanlagen eingesetzt [VDN 2002; RWE 2003]. Es werden aber auch GIS an Stellen ohne eingeschränktes Platzangebot errichtet [Anhörung 2003]. Beim Betrieb dieser Anlagen sind die Grenzwerte der 26. BImSchV (Verordnung über elektromagnetische Felder) vom 16.12.1996 (§ 3 und 4) einzuhalten [26. BImSchV 1996]. Im innerstädtischen Bereich ist die Realisierbarkeit von Schaltfeldern und Hochspannungskabeln damit nicht immer unproblematisch.

Freiluftanlagen sind die herkömmlichen und zahlenmäßig nach wie vor überwiegenden Hochspannungsschaltanlagen. Bei der Freiluftanlage isoliert die Umgebungsluft die spannungsführenden Teile gegeneinander. Kernstücke von Freiluftanlagen sind die **Leistungsschalter**. Sie schalten die Ströme des Normalbetriebs und unterbrechen im Kurzschlussfall die ansteigenden Ströme, indem sie den stromstarken Lichtbogen löschen. Zur Löschung dient heute SF₆. Ältere Schalter wurden mit Luft oder Öl als Lösch- und Isoliermedium gebaut, entsprechen aber nicht mehr dem Stand der Technik. Sogenannte ölarme Leistungsschalter sind bis heute in Betrieb, werden aber nicht mehr hergestellt [Schwarz, Leisewitz 1999; VDN 2002; Nelles, Tuttas 1998; Heuck, Dettmann 1999].

Vakuum, das in der MS bereits als Löschmedium in Leistungsschaltern verwendet wird, wurde von Herstellern für den HS- Bereich erprobt, ist aber bisher technisch und ökonomisch in den in Deutschland üblichen Spannungsbereichen ab 52 kV nicht realisierbar [Siemens 2002]. Im Prinzip stehen mit Feststoffen, Flüssigkeiten oder deren Kombination weitere Arten von Isoliermedien zur Verfügung. Gasförmige Isoliermedien haben sich aber auf dem Markt durchgesetzt [Schwarz, Leisewitz 1999; VDN 2002; Nelles, Tuttas 1998; Heuck, Dettmann 1999].

Die Investitionskosten für Freiluftanlagen sind geringer als für GIS. Die höheren Anlagenkosten für GIS können aber je nach Standort durch verringerte Grundstückskosten ausgeglichen werden.

Seit einigen Jahren gibt es auch sogenannte HIS- Hoch-Integrierte Schaltanlagen, die die Vorteile der konventionellen Freilufttechnik mit denen der SF₆-isolierten Schaltanlagen vereinen. Die HIS besteht aus metallgekapselten, gasisolierten Modulen, die mit luftisolierten Schaltanlagenkomponenten kombiniert werden können und für den Einsatz im Freien geeignet sind. Ein Vorteil ist der geringere Platzbedarf (etwa die Hälfte) gegenüber herkömmlichen Freiluftanlagen. [Helbig 2000; Siemens 2010]. Da in der HIS nur die

Komponenten Leistungsschalter und Trennschalter gasisoliert sind, ist das SF₆-Volumen im Vergleich zur kompletten GIS etwa 25 bis 30 % geringer [VDE 2010].

Minderungsmöglichkeiten

Freiluftanlagen enthalten weniger SF₆ als SF₆ isolierte Hochspannungsschaltanlagen. Eine Minderungsmöglichkeit für SF₆ besteht darin, SF₆ isolierte Hochspannungsschaltanlagen nur dort einzusetzen, wo dies wegen des Platzbedarfes tatsächlich erforderlich ist.

Einen ökobilanziellen Vergleich zwischen den Hochspannungsschaltanlagentypen GIS und Freiluftanlagen hat die Fa. Solvay durch die Solvay Management Support GmbH erstellen lassen [Krähling, Krömer 1999]. Verglichen wurden Anlagen, die dem modernsten Anlagenstandard entsprechen. Dadurch bedingt sind die SF₆-Emissionen der untersuchten Anlagen, verglichen mit den noch im Betrieb befindlichen älteren Anlagen, gering. Dennoch konnten - basierend auf der geringeren Größe, der damit verbundenen größeren Flexibilität und dem geringeren Materialeinsatz etc. - keine allgemeingültigen Aussagen zu ökologischen Vorteilen von GIS-Anlagen gegenüber Freiluftanlagen getroffen werden. Als wichtigste Ergebnisse sind sicher festzuhalten, dass aus ökologischer (klimaschutzorientierter) Sicht geringe SF₆-Emissionen bei Herstellung, Betrieb und Entsorgung sowie ein optimiertes Verteilungsnetz mit minimierten Verlusten anzustreben sind. Zur Gewährleistung des zweiten Punktes kann der Einsatz von GIS gegenüber Freiluftanlagen sinnvoll sein, wenn sich im Einzelfall eine Freiluftanlage nicht am im Rahmen der Netzoptimierung gewählten Standort aufstellen lässt. Für beengte Platzverhältnisse können aber auch die Hoch-Integrierten Schaltanlagen eine Lösung sein.

SF₆-Emissionen können außer durch eine Substitution durch Maßnahmen bei der Herstellung, Wartung, Maßnahmen an der Anlage (verbesserte Anlagendichtheit) und bei der Entsorgung von GIS vermieden werden. Im Jahr 1996 haben der ZVEI (Zentralverband Elektrotechnik und Elektroindustrie e.V.) und der VDEW (Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke e.V.) gegenüber dem BMU die erste freiwillige Erklärung zu SF₆ abgegeben [Erklärung 1996]. Darin verpflichten sie sich, SF₆-Emissionen - wo immer möglich - zu vermeiden. Als Maßnahmen können eine garantierte Leckagerate < 1 %, die Rückgewinnung und Wiederverwendung und ggf. umweltgerechte Entsorgung genannt werden. Der Hersteller von SF₆, Solvay Deutschland, ist in die freiwillige Erklärung einbezogen. Im Jahr 1997 überreichte die Betreiber- und Herstellervereinigung eine freiwillige Selbstverpflichtung an das BMU. Im Jahr 2005 wurde die Selbstverpflichtung auf weitere Anwendungen im Bereich der Energieübertragung und -verteilung ausgedehnt und um konkrete Reduktionsziele ergänzt. Bis zum Jahr 2020 soll die Gesamtemission aus allen Lebenszyklen von Schaltanlagen und -geräten auf 17 t pro Jahr (entspricht 0,4 Mio. t CO₂ Äquivalente) begrenzt werden [SV 2005].

Schlussfolgerungen

Für Leistungsschalter (> 52 kV) gibt es heute keine Alternative zu SF₆, die dem Stand der Technik entspricht und damit SF₆ ersetzen könnte. Entscheidungsspielraum für oder gegen den darüber hinaus gehenden Einsatz von SF₆ gibt es in dem hier diskutierten Spannungsbereich nur bei der Wahl der Schaltanlage. Da bei GIS die gesamte Anlage mit SF₆ befüllt ist, sind die eingesetzten Mengen und damit die Emissionen pro Anlage vergleichsweise groß. Auch sind die Leckageraten gegenüber Mittelspannungsanlagen (< 0,1 % pro Jahr für „hermetisch abgeschlossene Drucksysteme für Gas“, nach IEC62271-1) mit durchschnittlich (Alt- und Neuanlagen) etwa 1 % höher. Hinzu kommen einmalige Entsorgungsverluste in der Größenordnung von kleiner 2 %.

GIS sollten unter ökologischen Gesichtspunkten daher nur dort eingesetzt werden, wo sie zum Erhalt oder zur Herstellung eines optimierten Netzes (minimierte Übertragungsverluste) oder, z. B. in der Industrie, zur verbrauchernahen Einspeisung notwendig sind. Dieses Erfordernis sollte im Einzelfall unter Berücksichtigung geeigneter Kriterien geprüft werden. Beim Einsatz von SF₆ sind Emissionen soweit wie möglich zu vermeiden. Luftisolierte Freiluftanlagen leisten hierzu einen Beitrag.

9.2 *Schaltanlagen im Spannungsbereich > 1-52 kV (Mittelspannungsanlagen)*

Als Schaltanlagen im Mittelspannungsbereich werden Lasttrennschalteranlagen (RMUs) und Leistungsschalteranlagen eingesetzt. Beide Anlagentypen gibt es mit Luft oder mit SF₆ als Lösch- und/oder Isoliermedium auf dem Markt.

Sofern SF₆ eingesetzt wird, handelt es sich wie bei Hochspannungsschaltanlagen um metallgekapselte, hermetisch geschlossene Anlagen. Alle Komponenten sind zu einem geschlossenen System zusammengefasst und mit SF₆ bei leichtem Überdruck gegeneinander isoliert. Sie werden wie die HS-Schaltanlagen auch als GIS bezeichnet. Die Anlagen enthalten 0,25 bis 10 kg SF₆ pro Gasraum. Ihre Lebensdauer beträgt 40 Jahre [Ecofys 2005].

Die in Leistungsschalteranlagen eingesetzten Leistungsschalter sind meist Vakuumschalter, nur in besonderen Ausnahmefällen werden SF₆-Schalter verwendet. In Deutschland werden diese Leistungsschalter aber nicht produziert und nur in besonderen Fällen aus technischen Gründen, z.B. für Generatorschalter in Verbindung mit luftisolierten Anlagen eingesetzt [Driescher 2003].

Minderungsmöglichkeiten

In den in Leistungsschalteranlagen verwendeten Leistungsschaltern wird aus technischen Gründen heute vorwiegend Vakuum als Isoliermedium eingesetzt. Ölarme Leistungsschalter

werden heute nicht mehr angeboten [Driescher 2003]. Technisch ist der Einsatz von SF₆ in Leistungsschaltern nicht erforderlich.

SF₆-haltige Gemische, welche die SF₆-Menge in RMUs und Leistungsschalteranlagen herabsetzen können, werden erforscht, sind aber nicht kommerziell erhältlich [RWE 2002].

Eine seit Jahren übliche Technologie sind luftisolierte Lasttrennschalter- und Leistungsschalteranlagen. Zwischenzeitlich sind auch metallgekapselte, luftisolierte Anlagen mit Überdruck auf dem Markt, während Luft üblicherweise bei Normaldruck eingesetzt wird. Ein Hersteller bietet luftisolierte Lasttrennschalteranlagen bis 24 kV in hermetisch geschlossener Bauweise an, womit diese Anlagen analog zu SF₆-Anlagen vollkommen von der Umgebung und damit von ggf. negativen Umwelteinflüssen (salzhaltige, korrosive Luft etc.) abgeschlossen sind [Holec Holland 2003]. Die Technologie unterscheidet sich von der SF₆-isolierter Anlagen.

Die von den Herstellern, Vertreibern und Betreibern von SF₆- und luftisolierten Anlagen dargestellten Vor- und Nachteile beider Anlagentypen sind vielfältig. Als wesentliche Vergleichskriterien werden die Personensicherheit (einschl. toxischer Zersetzungsprodukte des SF₆), die Versorgungssicherheit, die Lebensdauer, die Gesamtkosten, der Ressourcenverbrauch (auch Verbrauch unversiegelter Fläche/Platzbedarf), die Übertragungsverluste und die Emissionen umweltschädlicher (einschließlich persistenter) Stoffe herangezogen.

Unter der Annahme, dass die SF₆-Emissionen pro Anlage über die gesamte Lebenszeit weniger als 0,1 % der Füllmenge pro Jahr betragen und dass bei der Entsorgung das enthaltene SF₆ vollständig zurück gewonnen wird (Verluste < 2 % der Füllmenge), führt die Prüfung und Bewertung der dem UBA vorliegenden Informationen zu dem Ergebnis, dass eine eindeutige Aussage, ob einer der beiden Anlagentypen ökologisch vorteilhafter ist, nicht möglich ist. Die Notwendigkeit des Einsatzes von SF₆ in der Mittelspannung konnte nicht eindeutig belegt werden. Luftisolierte Anlagen haben den Vorteil, nicht zum Aufbau des SF₆-Reservoirs (installierte Mengen) und in verringertem Maße zu einem Eintrag persistenter Stoffe in die Umwelt beizutragen. Anlagen in speziellen Anwendungen können wegen besonderer Bedingungen (z. B. sehr geringer vorhandener Platz, extreme Umwelteinflüsse) GIS-SF₆ Anlagen notwendig machen. In der neuen Anwendung der off-shore Windkraftanlagen werden, auch aus technischen Gründen (z.B. bei Spannungen über 30 kV), SF₆-isolierte Schaltanlagen eingesetzt.

Auch wegen der widersprüchlichen Angaben und der Schwierigkeit, die verschiedenen ökologischen Kriterien miteinander zu vergleichen, erarbeiteten Hersteller und Betreiber von SF₆-isolierten Anlagen zusammen mit einem SF₆-Hersteller eine Ökobilanz zur GIS Technologie in der Mittelspannung. Luftisolierte Schaltanlagen (AIS) und gas-isolierte Schaltanlagen (GIS) wurden in repräsentativen Schaltanlagen- und Netzzusammenstellungen verglichen, wobei nur typengeprüfte Schaltanlagen einbezogen wurden. Neben

einer durchschnittlichen Produktmischung wurden Mittelspannungsnetze mit 10 kV für die Simulation städtischer und mit 20 kV Spannung für die Simulation ländlicher Gebiete analysiert. Die Lebensdauer für AIS wurde mit 30 Jahren, die für GIS mit 40 Jahren angenommen. Für die SF₆-Emissionsraten bei GIS wurden 0,14 %/Jahr für die Herstellung und den Betrieb und 2% für die Außerbetriebnahme angenommen [Solvay 2003].

Die Ergebnisse zeigen, dass die Verwendung von SF₆ in Bezug auf die ökologischen Auswirkungen von MS-Schaltanlagen nur geringen Einfluss hat. Insgesamt schneiden die untersuchten SF₆-Anlagen (GIS) im Ergebnis in dieser Ökobilanz günstiger ab als die in den Vergleich einbezogenen luftisolierten Anlagen (AIS). Schaltanlagen klein- und mittelständischer Unternehmen ohne SF₆ sind in der Ökobilanz wegen widersprüchlicher Datenlage nicht enthalten. Die Ergebnisse der Ökobilanz sind daher nur eingeschränkt aussagekräftig.

In einer von einem italienischen Hersteller durchgeführten Ökobilanz kommen die Autoren zu dem Ergebnis, dass beim Vergleich von SF₆-Schaltanlagen, luftisolierten Anlagen (Standard) und kompakten luftisolierten Schaltanlagen letztere die ökologischste Variante darstellen [Petroni u. a. 2003]. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass etwas höhere, gemäß Aussage von deutschen Herstellern unrealistische SF₆-Leckageraten angenommen wurden. Weiterhin ist von Bedeutung, dass Anlagen aus dem Jahr 2000 (Luft) mit Anlagen aus dem Jahr 1990 (SF₆) verglichen wurden.

Auch bei der Mittelspannung können SF₆-Emissionen außer durch eine Substitution durch Maßnahmen bei der Herstellung, Wartung und bei der Entsorgung vermieden werden. Die Freiwillige Selbstverpflichtung der SF₆-Produzenten, Hersteller und Betreiber von elektrischen Betriebsmitteln > 1kV [SV 2005] umfasst daher auch die Anlagen der Mittelspannung.

Schlussfolgerungen

Im Mittelspannungsbereich sind Leistungsschalter mit Vakuum zur Isolation eine geeignete, bereits weitgehend eingesetzte Alternative zu SF₆-Schaltern.

MS-Schaltanlagen haben geringe Leckageraten von weniger als 0,1 % pro Jahr, daher sind die SF₆-Emissionen trotz der großen installierten Menge an SF₆ weiterhin vergleichsweise gering. Obwohl es in einigen Jahren zu einer Entsorgung dieser Geräte in größerem Umfang kommt, kann der Emissionsanstieg durch geeignete Maßnahmen, zu denen sich die Industrie verpflichtet hat, gering gehalten werden.

Wird dies im Zusammenhang mit den vorgelegten Ergebnissen der Ökobilanz bewertet, kann zunächst kein konkreter Handlungsbedarf abgeleitet werden. Dies darf aber in Anbetracht des hohen Treibhauspotenzials, der Persistenz von SF₆, den vorhandenen Alternativtechnologien und vor dem Hintergrund der großen in den

Verkehr gebrachten Mengen nicht zu einem unkontrollierten Einsatz von SF₆ führen. Eine grundsätzliche technische Notwendigkeit, SF₆-isolierte Anlagen einzusetzen, besteht in der Mittelspannung nicht.

In Kapitel 9 verwendete Literatur

26. BImSchV (1996): *Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes - Verordnung über elektromagnetische Felder*. Vom 16. Dezember 1996, BGBl. I 1996 S. 1966.
- Anhörung (2003): *Gespräche zu fluorierten Treibhausgasen auf der Basis des Eckpunktepapiers und der hierzu im BMU eingegangenen Stellungnahmen zu den Anwendungsbereichen „stationäre Kälte- und Klimatechnik“* (28./29. Januar 2003), „mobile Kälte- und Klimatechnik (einschl. Transportisolierung)“ (30. Januar 2003), „Verschäumung (einschließlich Montageschaum)“ (12. Februar 2003), „SF₆ in Schaltanlagen“ (13. Februar 2003), „Halbleiterindustrie“ (13. Februar 2003) und „Sprayanwendungen, Feuerlöschmittel, sonstige Anwendungen“ (14. Februar 2003), Umweltministerium, Bonn.
- BGI (2008): Berufsgenossenschaftliche Informationen BGI 753: *SF₆-Anlagen und –Betriebsmittel*, Berufsgenossenschaft Elektro Textil Feinmechanik, Mai 2008, (http://www.bgetem.de/bilder/pdf/bgi_753_a04-2009.pdf; 26.04.2010).
- BReg - Bundesregierung (2004): *Berichterstattung der Bundesrepublik Deutschland gemäß Artikel 5, 7 und 8 des Kyoto-Protokolls der UN-Klimarahmenkonvention zu fluorierten Treibhausgasen an das Sekretariat der Klimarahmenkonvention im Jahr 2004*, (<http://unfccc.int/program/mis/ghg/submis2003.html>; 8.1.2004).
- CIGRE (2003): Broschüre 234: *SF₆ Recycling Guide. Revised version 2003*, CIGRE 2003, (<http://www.cigre.org/>; 15.04.2010).
- CIGRE (2005): Broschüre 271: *Guide for the preparation of customised „Practical SF₆ Handling Instructions*, CIGRE, (<http://www.cigre.org/>; 15.04.2010).
- Driescher - Elektrotechnische Werke Fritz Driescher & Söhne GmbH, Moosburg (2003): Persönliche Mitteilung vom 17. September 2003.
- Ecofys (2005): Wartmann, Sina; Harnisch, Jochen: *Minderung von SF₆- Emissionen aus elektrischen Betriebsmitteln der Hoch- und Mittelspannung in Europa (deutsche Kurzfassung) Ausführliche englische Fassung: Reductions of SF₆ Emissions from High and Medium Voltage Electrical Equipment in Europe.*, Nürnberg: Ecofys GmbH, (<http://www.zvei.org/index.php?id=1533> oder <http://www.capiel-electric.com>; 26.01.2010).
- Erklärung - Erklärung zu SF₆ in elektrischen Schaltgeräten und -anlagen (1996): *Erklärung*

- der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke e. V. und des Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V., Frankfurt/Main: VDEW, ZVEI.
- Helbig, Dirk (2000); Meinherz, Manfred: *HIS – ein hochintegriertes innovatives Schaltanlagenkonzept*, etz - Elektrotechnik + Automation 6/2000, S. 2-4.
- Heuck, Klaus; Dettmann, Klaus-Dieter (1999): *Elektrische Energieversorgung : Erzeugung, Transport und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis*. 4. vollständig neubearbeitete und erweiterte Auflage, Braunschweig: Vieweg.
- Holec Holland (2003): Produktinformation und persönliche Mitteilung vom 19. März 2003. IEC - IEC 60694 - DIN EN 60694 (1996): *Gemeinsame Bestimmungen für Hochspannungs-Schaltgeräte-Normen* (IEC 60694:1996 + Corr. 1:2001 + A1:2000 + A2:2001 + Corr. 1:2001). Ausgabe: September 2002. Deutsche Fassung EN 60694:1996 + A1:2000 + A2:2001.
- IEC (2007) High-voltage switchgear and controlgear - Part 1: Common specifications IEC 62271-1:2007; (in Deutschland: EN 62271-1:2008).
- IEC (2008) High-voltage switchgear and controlgear - Part 303: Use and handling of sulphur hexafluoride IEC TR 62271-303:2008 (in Deutschland VDE V 0671-303:2010).
- Krähling, Hermann; Krömer, Silke (1999): *Stromversorgung unter Nutzung der SF₆-Technologie*. Hannover, Ökobilanzstudie im Auftrag von ABB, PreussenElektra Netz, RWE Energie, Siemens und Solvay Fluor und Derivate: Solvay Deutschland - Zentralbereich Umweltschutz und Sicherheit.
- Nelles, Dieter; Tuttas, Christian (1998): *Elektrische Energietechnik*. Stuttgart: Teubner.
- Petroni, Fiorangelo u. a. (2003): *Comparative Life Cycle Assessment among MV metal-enclosed Switchgears for HV/MV distribution substations*. Präsentiert auf der 17th International Conference on Electricity Distribution, 12.-15. Mai 2003, Barcelona, Spanien.
- RWE - RWE Net AG (2002): Persönliche Mitteilung Herr Claus Neumann vom 15. Januar 2002.
- RWE - RWE Net AG (2003): Mündliche Mitteilung Herr Claus Neumann vom 12. März 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- Schwarz (1999): Schwarz, Winfried; Leisewitz, André: *Emissionen und Minderungspotential von HFKW, FKW und SF₆ in Deutschland*. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 298 41 256, Öko-Recherche, Frankfurt am Main 1999, (http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=2483; 26.01.2010).

- Schwarz (2007): Schwarz, Winfried, Effizientere Datenerhebung für das SF₆- Monitoring der Netzbetreiber in der Hochspannung, Gutachten für den Verband der Netzbetreiber – VDN e.V. beim VDEW und den VIK Verband der industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V., Juni 2007, Frankfurt am Main: Öko-Recherche.
- Siemens AG (2002): Persönliche Mitteilung Herr Andreas Luxa vom 5. November 2002.
- Siemens AG (2010): *SIMOBREAKER und SIMOVER- Platzsparende luftisolierte Schaltanlagen*, Firmenprospekt Siemens, (<http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/high-voltage-substations/compact-solution/simobreaker/AIS-SimovBreak-d-070717.pdf>; 19.04.2010).
- Solvay (2003): Mersiowsky, Ivo: *SF₆-GIS Technologie in der Energieverteilung–Mittelspannung*. Ökobilanzstudie im Auftrag von ABB, AREVA T&D, EnBW Regional, e.on Hanse, RWE, SIEMENS, SOLVAY Fluor und Derivate, Solvay Management Support, Hannover, November 2003, (<http://www.zvei.org/index.php?id=1533>; 26.01.2010).
- SV (2005): *Freiwillige Selbstverpflichtung der SF₆-Produzenten, Hersteller und Betreiber von elektrischen Betriebsmitteln > 1kV zur elektrischen Energieübertragung und -verteilung in der Bundesrepublik Deutschland zu SF₆ als Isolier- und Löschgas*, Partner: Verband der Netzbetreiber –VDN e. V. beim VDEW, VIK Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e. V., ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V., SOLVAY Fluor GmbH, (<http://www.zvei.org/index.php?id=1533>; 26.01.2010).
- UNFCCC (2006): *Approved baseline and monitoring methodology AM0035 “SF₆ Emission Reductions in Electrical Grids”, Version 01*, 29. September 2006, (http://cdm.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/CDMWF_AM_5WABPI8CK9HOSTV8E9CKDPFZM7UKQU; 19.04.2010).
- UNFCCC (2009): *Approved baseline and monitoring methodology AM0079 “Recovery of SF₆ from gas insulated electrical equipment in testing facilities”, Version 02*, 4. Dezember 2009, (<http://cdm.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/BX7WY3ZS1G92TQRDA6JLEKOVH8NIUP>, 19.04.2010).
- VDE (2010): Persönliche Auskunft Herr Bohn, VDE, Juni 2010.
- VDN - Verband der Netzbetreiber e. V. beim VDEW (2002): *SF₆ in Mittel- und Hochspannungsschaltanlagen - Gemeinsame Stellungnahme des ZVEI und des VDN zum Eckpunktepapier*. Frankfurt/Main: VDN, ZVEI.
- ZVEI (2004): Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V., Fachbereich

Schaltgeräte, Schaltanlagen, Industriesteuerungen im Fachverband Automation (2004): *Datenmeldung des ZVEI und des VDN für das Jahr 2002 im Rahmen des SF₆ Monitoring*. Frankfurt/Main: ZVEI, VDN.

ZVEI (2003): Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) e. V., Fachbereich Schaltgeräte, Schaltanlagen, Industriesteuerungen im Fachverband Automation (2003): Persönliche Mitteilung Herr Johannes Stein im März 2003.

ZVEI (2009): Datenmeldung an das BMU/UBA gemäß der Selbstverpflichtung: VDE, VIK, ZVEI und SOLVAY: *SF₆-Daten 2008 für die Energieübertragung und -verteilung größer 1 kV*. 16. Juni 2009, Frankfurt am Main.

10 SF₆ Anwendungen in der Nichteisen(NE)-Metallindustrie

10.1 SF₆ zur Verwendung als Schutzgas (Magnesiumverarbeitung)

Die Magnesiumindustrie setzt SF₆ seit Mitte der siebziger Jahre als Schutzgas ein. Im Jahr 2008 wurden weltweit 719.000 Tonnen Magnesium produziert, Hauptproduzent ist China mit 559.000 t [IMA 2010]. In Deutschland und der gesamten EU wird nur bereits als Barren angeliefertes Magnesium verarbeitet und Magnesium recycelt. Die Verarbeitung von primärem Magnesium, also die Herstellung der Barren, wird daher in diesem Bericht nicht betrachtet. Allerdings wird auch bei diesem Verarbeitungsschritt SF₆ zum Schutz der Magnesiumschmelze eingesetzt [Harnisch, Schwarz 2003]. Außerdem steht SF₆ als Feuerlöschmittel für Magnesiumbrände in den Betrieben bereit [Öko-Recherche 2009].

Die Magnesiumgießverfahren können technologisch unterteilt werden in Druck-, Kokillen-, Sand- und Stranggussverfahren. Die Verarbeitungstemperaturen liegen bei den Druckgussverfahren von 630°C bis maximal 750°C, beim Kokillen, Sand- und Stranggussverfahren über 730°C bis 830°C. Einen tabellarischen Überblick über die Gussarten und typische Temperaturbereiche ist im Bericht [Öko-Recherche 2008] enthalten. Einige Magnesiumgussarten sind genauer beschrieben im Bericht [Öko-Recherche 2009]. Der größte Anteil von Magnesium wird in Kalt- oder Warmkammer- Druckgussverfahren verarbeitet. In Deutschland sind im Jahr 2006 insgesamt 30.600 t Magnesium verarbeitet worden, davon 29.800 t in Druckgussverfahren [GDM 2007].

SF₆ wird zusammen mit Trägergasen (wie Stickstoff, trockener Luft oder CO₂) als Schutzgas beim Schmelzen und Gießen von Magnesium und magnesiumhaltigen Legierungen eingesetzt. Das Schutzgas führt zur Ausbildung einer Oberflächen-Schutzschicht und verhindert so die Oxidation und die Entzündung der Metallschmelze. Die SF₆-Konzentration beträgt etwa 0,2-3 % [Harnisch, Schwarz 2003].

Ein Teil des eingesetzten SF₆ wird im Prozess zersetzt [Carli u. a. 1997; Bartos u. a. 2003, EPA 2004, 2007]. Eine genaue Quantifizierung ist nicht möglich, da das Maß der Zersetzung vom jeweiligen Gussverfahren, der Schutzgaszusammensetzung, den Temperaturen, der Magnesiumzusammensetzung usw. abhängt. Gemäß den internationalen Anforderungen an die Berichterstattung werden der Verbrauch an SF₆ und die Emissionen in dieser Anwendung gleichgesetzt [Schwarz, Leisewitz 1999; IPCC 1996].

Da die europäische F-Gase-Verordnung in Artikel 8 (1) ab 1. Januar 2008 die Verwendung von Schwefelhexafluorid (SF_6) für Magnesium-Druckguss verboten hat, wenn die verwendete SF_6 -Menge über 850 kg jährlich liegt, geht der Einsatz von SF_6 zurück. Emittierten im Jahr 2005 in Deutschland noch 28 t SF_6 aus Magnesiumgießereien, waren es 2008 nur noch 7,3 t [Schwarz 2009, 2010]. Die Emissionsentwicklung seit 1995 ist in Kapitel 2 dargestellt. Umgestellt wurde vorrangig auf den HFKW-134a, wodurch die Emissionen von HFKW-134a gestiegen sind. Im Jahr 2008 betrugen die HFKW-134a Emissionen 15 t. Auch bei der Emissionsabschätzung für HFKW-134a beim Magnesiumguss werden der Verbrauch und die Emission gleichgesetzt, obwohl eine Zersetzung von HFKW-134a im Schutzgas stattfindet. Die neuen IPCC-Guidelines von 2006 verzichteten auf die Angabe von Standardwerten für den Emissionsfaktor, weil der effektive Grad der Zersetzung von vielen Umständen abhängt wie Temperatur, Konzentration, Massenfluss und eingesetztem Trägergas.

Einen Überblick über die Emissionssituation von SF_6 aus der Magnesiumindustrie in Europa gibt ein Bericht im Auftrag der Europäischen Kommission [Öko-Recherche 2009].

Die zunehmende Kritik an SF_6 als Schutzgas führte bereits weltweit bei der Magnesiumherstellung und -verarbeitung zu dessen freiwilligem Ersatz [EPA 2008, IMA 2009]. Unterstützend ist dabei auch die Möglichkeit, bei der Umstellung bestehender Anlagen von SF_6 auf SO_2 , Perfluorketon oder HFKW-134a Zertifikate für den Emissionshandel zu erwerben. Seit 2008 gibt es dafür eine vom Weltklimarat (UNFCCC) anerkannte Methodologie zur Berechnung der Gutschriften, die zusätzliche Bedingungen an den Einsatz der alternativen Schutzgase stellt [UNFCCC 2008].

Minderungsmöglichkeiten

Seit den siebziger Jahren hat es beim Einsatz von SF_6 vielfältige technische Verbesserungen gegeben, die zu einer erheblichen Emissionsminderung geführt haben. So konnte die spezifische SF_6 -Emissionsmenge pro Tonne Magnesium von über 3 kg/t in neuen Gießereien auf 0,4 bis 1 kg/t reduziert werden [Harnisch, Schwarz 2003; Hydro Magnesium 2000, Öko-Recherche 2009].

Vor der Einführung von SF_6 wurde hauptsächlich Schwefeldioxid (SO_2) als übliche Schutzgaskomponente eingesetzt. Der Einsatz von SF_6 erfolgte vor allem wegen seiner nicht-toxischen Eigenschaften im Vergleich mit SO_2 . Bis zum Ende der 60er Jahre fanden Abdecksalze (eutektische Gemische aus Alkali- und Erdalkalichloriden) oder Schwefel zum Schutz der Metallschmelze Verwendung [Ricketts u. a. 2003, Karger 2006b]. Die Zugabe von Beryllium in sehr geringen Massenanteilen (0,0005-0,00015 Massen-%) führt zu einem Oxidationsschutz durch Bildung einer Deckschicht aus Magnesium- und Berylliumoxiden, aber auch zu Materialversprödungen [Karger 2006b].

Prinzipiell wird nach der Entscheidung für ein Schutzgas sowohl die Gießerei an sich (z. B. Schutzmaßnahmen bei der Verwendung von SO₂) als auch der Fertigungsprozess darauf ausgerichtet [VW 2003a]. Eine Umstellung auf andere Schutzgase ist möglich, erfordert aber in Abhängigkeit vom alten und neuen Schutzgas Änderungen in unterschiedlichem Umfang; einen echten drop-in Ersatzstoff gibt es bislang nicht [Ricketts u. a. 2003; Öko-Recherche 2008]. Grundsätzlich soll im Falle einer Umstellung auf ein anderes Schutzgas der Fertigungsprozess möglichst wenig gestört und eine gleichbleibende Produktqualität sichergestellt werden [VW 2003a].

SO₂

Einige Gießereien setzen bis heute SO₂ ein; aus Kostengründen haben sich auch neu errichtete Gießereien für den Einsatz von SO₂ entschieden [Harnisch, Schwarz 2003]. Einige Anlagen wurden durch das Verbot von SF₆ auf SO₂ umgerüstet [Öko-Recherche 2008]. Auch beim Recycling wird, außer für Speziallegierungen mit hohen Schmelztemperaturen, hauptsächlich SO₂ verwendet [Öko-Recherche 2009].

Während in Deutschland und auch in Frankreich und Italien bis 2008 vorwiegend SF₆ eingesetzt wurde, wird in Österreich und Dänemark traditionell ausschließlich unter SO₂ gegossen [Harnisch, Schwarz 2003].

Wegen der Toxizität von SO₂ und des damit verbundenen höheren Aufwands für Arbeitsschutz, sowie wegen des hohen GWP von SF₆ (GWP₁₀₀ = 23.900 [IPCC 1995]) haben Verarbeiter und Verwender von Magnesium sowie Schutzgasproduzenten Forschungsprogramme zur Evaluierung von Alternativen aufgelegt [Australian Magnesium 2003a; 3M 2003; VW 2003b; VDG 2003; EPA 2004; EPA 2007; IMA 2009]. Treibende Kraft war dabei auch die Automobilindustrie als größter Abnehmer des Magnesiums. Hintergrund hierfür sind ökobilanzielle Untersuchungen (LCAs), die zeigen, dass der bei Fahrzeugen durch den Einsatz leichter Bauteile aus magnesiumhaltigen Legierungen an Stelle von Stahl erzielte Beitrag zur CO₂-Emissionsreduzierung (verringert Spritverbrauch) durch den Einsatz von SF₆ im Herstellungsprozess (Magnesium) mehr als aufgezehrt wird. Die Verbesserung der Klimabilanz von Fahrzeugen ist jedoch ein entscheidender Faktor für die Wahl der leichten Magnesiumteile [VW 2003a; Australian Magnesium 2003a; Ricketts u. a. 2003; Hydro Magnesium 2000].

In Kenntnis der Mechanismen, die bei Anwendung von SF₆ als Schutzgas ablaufen, fokussierte sich die Suche nach Alternativen vor allem auf andere fluorierte Stoffe. Diese sollten jedoch ein geringeres GWP als SF₆ haben [Ricketts u. a. 2003]. Als vielversprechende Alternativen sind in den letzten Jahren der HFKW-134a und ein Perfluorketon (C₂F₅C(O)CF(CF₃)₂, Summenformel C₆F₁₂O) in verschiedenen Anlagen untersucht worden [VW 2003a; Australian Magnesium 2003a; 3M 2003; Ricketts u. a. 2003; EPA 2004; EPA 2007]. Beide Stoffe werden - wie SF₆ - zusammen mit Trägergasen eingesetzt. Weitere Gase, wie z. B. BF₃, der Hydrofluorether C₄F₉OCH₃ und der HFKW-

1234ze, waren oder sind zwar in der Diskussion [Hillis 2002; EPA 2008], haben aber bisher eine eher untergeordnete Bedeutung und werden hier nicht näher betrachtet.

HFKW-134a

Der HFKW-134a wird bereits seit Jahren kommerziell vertrieben und in vielen Anwendungen eingesetzt, vor allem als Kältemittel. Es handelt sich um ein ebenfalls treibhauswirksames Gas mit einem Treibhauspotenzial (GWP_{100}) von 1.300 [IPCC 1995]. Das GWP ist somit wesentlich geringer als das von SF_6 . Testergebnisse für einen konkreten Standort zeigen, dass der Ausstoß treibhauswirksamer Gase durch eine Umstellung auf den HFKW-134a um mehr als 95 % (berechnet auf CO_2 -Äquivalente) gesenkt werden kann [VW 2003a, EPA 2007]. Dies ist auch als Durchschnittswert in Ricketts u. a. [2003] angegeben. Grund für diese Reduktion sind vor allem die gegenüber SF_6 verringerten Einsatzmengen bei gleichzeitig höherem Zersetzungsgrad von HFKW-134a. Der HFKW-134a hat sich in Versuchen auch in bestehenden Anlagen als geeignetes Schutzgas zum Ersatz von SF_6 erwiesen. In vielen Aspekten, wie beispielsweise der Schlackenmenge und -qualität, hat er sich gegenüber SF_6 sogar überlegen gezeigt [Ricketts u. a. 2003]. Im Jahr 2003 wurden in Deutschland erste großtechnische Versuche an verschiedenen Standorten (Druckguss) gefahren [VW 2003a; Australian Magnesium 2003a]. Inzwischen steht HFKW-134a allen Anwendern kommerziell für den Einsatz als Schutzgas zur Verfügung [Australian Magnesium 2003b]. Auch für Sandgussverfahren mit niedrig schmelzenden Legierungen bis $730^\circ C$ wurden Eignungstests mit positivem Ergebnis abgeschlossen [Australian Magnesium 2004]. Bei den beim Sandgießen von Magnesiumlegierungen üblicherweise notwendigen Temperaturen über $730^\circ C$ ist HFKW-134a nicht geeignet [Öko-Recherche 2008].

Perfluorketon

Das bereits genannte Perfluorketon hat ein GWP_{100} von etwa 1. Es handelt sich um einen neuen Stoff, der bisher erst in geringem Umfang verwendet und produziert wird. Auch für das Perfluorketon sind umfangreiche Versuche in verschiedenen Ländern durchgeführt worden. Der Hersteller des Ketons gibt an, dass es als Schutzgas in Untersuchungen gegenüber dem HFKW-134a Vorteile gezeigt hat und dass die Produktion und Bereitstellung ausreichender Mengen sichergestellt werden kann [3M 2003]. Die im Trägergas benötigte Konzentration beträgt etwa 0,01 % und ist damit um ein Vielfaches geringer als die erforderliche Konzentration an SF_6 [Milbrath 2002]. Neuere Untersuchungen zeigten, dass das Perfluorketon schon bei 0,00025 bis 0,00035 % effektiv ist [EPA 2008]. Untersucht wurden Fragestellungen in Bezug auf mögliche thermische Zersetzungsprodukte (FKW, Fluorolefine, TFA, HF, Carbonylfluorid), das GWP dieser Zersetzungsprodukte und die Arbeitsplatzsicherheit [Ricketts u. a. 2003; Milbrath 2002]. Tests zeigten, dass die Bildung unerwünschter Zersetzungsprodukte durch den Zusatz geringer Mengen an Sauerstoff und eine optimierte Schutzgasdosierung nahezu vollständig

vermieden werden kann [Milbrath 2002]. Das Perfluorketon ist mittlerweile als Ersatzstoff für SF₆ in Amerika eingeführt [EPA 2008]. Für Europa ist derzeit chemikalienrechtlich die Anwendung als Schutzgas nicht möglich [Öko-Recherche 2009]. Vor der Anwendung in Europa muss der Hersteller das Schutzgas gemäß des Europäischen Chemikalienrechts [REACH 2006] registrieren lassen. Eine Registrierung bei der ECHA ist seitens des Herstellers geplant (Stand 2010).

CO₂-Schnee

Eine weitere Alternative ist das Abdecken der Magnesium-Schmelze mit CO₂-Schnee. Flüssiges CO₂ wird unter hohem Druck durch eine Düse als CO₂-Schnee in den Ofenraum eingebracht. Durch den CO₂-Schnee wird die Badoberfläche gekühlt und so eine geringere Abdampfgeschwindigkeit des Magnesiums erreicht. Zudem sublimiert der CO₂-Schnee und expandiert, wodurch Luft von der Badoberfläche verdrängt wird [VDG 2003, Karger 2006a, b]. Das Verfahren ist an einer Druckgussmaschine mit einer Magnesiumlegierung erprobt worden und hat sich im Temperaturbereich bis 700°C als grundsätzlich technisch machbar erwiesen [Karger 2006b]. Die Nachteile von gasförmigem CO₂, bei dem sich Kohlenmonoxid und elementarer Kohlenstoff bilden, wurden bei CO₂-Schnee nicht beobachtet. Der Einsatz von CO₂-Schnee stellt eine weitere Alternative dar, die sich allerdings technisch und wirtschaftlich an den anderen neuen Schutzgasen messen muss.

Kosten

Grundsätzlich geben die befragten Produzenten und Verwender der Schutzgase einheitlich an, dass die Alternativgase HFKW-134a und das Perfluorketon im Preis günstiger als SF₆ sind [VW 2003a; Australian Magnesium 2003a; 3M 2003; Milbrath 2002]. SO₂ ist ebenfalls günstiger als SF₆, eine Quelle von 2008 geht von einem Fünftel bis einem Zehntel der Betriebskosten von SF₆ aus [EPA 2008].

Für die Verwender sind die Einstellung eines optimierten Fertigungsprozesses und die damit erreichte gleichbleibende Produktqualität von hoher Bedeutung. Umstellungen können immer mit - zumindest vorübergehenden - Problemen verbunden sein, die vor allem kleine Gießereien trotz möglicher langfristiger ökonomischer Vorteile abschrecken [VW 2003a; VW 2003b]. Ricketts u. a. [2003] gehen davon aus, dass eine Umstellung auf das Perfluorketon im Vergleich zu einer Umstellung auf den HFKW-134a mit höheren Kosten verbunden ist.

Ein recht ausführlicher Kostenvergleich zwischen SO₂ und SF₆ als Schutzgas sowie eine Darstellung der entstehenden Kosten im Falle einer Umrüstung auf SO₂ findet sich in Harnisch und Schwarz [2003]. Vereinfacht kommen die Autoren zu dem Ergebnis, dass die Verwendung von SO₂ an Stelle von SF₆ in der Investition teurer ist. Wegen der gleichzeitig geringeren laufenden Kosten beim Einsatz von SO₂, können Gießereien diese Mehrkosten in Abhängigkeit von der von ihnen verarbeiteten Menge an Magnesium langfristig

ausgleichen. Für kleinere Gießereien ist die Verwendung von SO_2 aber - wegen der sehr langen Zeiträume - nicht wirtschaftlich, insbesondere dann, wenn eine bestehende Anlage (SF_6) auf SO_2 umgerüstet werden muss. Eine neuere Studie im Auftrag der EU zeigt die Kosten für die Umstellung und den Betrieb der Anlagen auf HFKW-134a und SO_2 bei kleineren Anlagen mit einem SF_6 -Verbrauch kleiner 850 kg pro Jahr [Öko-Recherche 2009]. Es ergeben sich unterschiedliche Ergebnisse. In vielen Fällen ist die Umstellung (Umrüstkosten und Betriebskosten) teurer als eine weitere Verwendung von SF_6 . Für einige Anlagen sind die jährlichen Gesamtkosten mit SO_2 aber geringer als mit SF_6 . Mit HFKW-134a sind im Allgemeinen höhere Kosten zu erwarten als bei SO_2 . Das liegt vor allem daran, dass für den HFKW-134a derzeit (2010) eine Lizenzgebühr seitens des Patenthalters erhoben wird.

Schlussfolgerungen

Grundsätzlich sollten Schutzgase mit einem möglichst geringen GWP als Ersatzstoffe für SF_6 bevorzugt werden. Weitere Aspekte, wie eine Verringerung der Einsatzmengen, der Zersetzungsgrad des Schutzgases, die Verfügbarkeit geeigneter Ersatzstoffe und die technische Realisierbarkeit von Alternativen sind ebenfalls von Bedeutung.

Für Magnesium-Gießereien (Druckguss) steht an Stelle von SF_6 als langjährig erprobtes, bewährtes und kostengünstiges Schutzgas SO_2 zur Verfügung. Allerdings sind beim Einsatz von SO_2 wegen seiner Toxizität besondere Sicherheitsmaßnahmen erforderlich.

Heute ist SF_6 in bestehenden Druckgussanlagen mit Verbräuchen größer 850 kg/a in Deutschland und Europa verboten und bereits ersetzt. Der HFKW-134a ist das übliche neue Schutzgas in Deutschland. Bereits die Umstellung von SF_6 auf den HFKW-134a führt wegen des geringeren GWP, dem etwas geringeren Verbrauch und der Zersetzung in Stoffe ohne GWP zu einer Emissionsreduktion treibhauswirksamer Gase. Auch ein Umstieg auf SO_2 ist möglich und schon erfolgt.

Das Perfluorketon ist als Schutzgas geeignet und hat ein sehr geringes GWP. ist aber derzeit (2010) in Europa wegen fehlender chemikalienrechtlicher Registrierung nicht einsetzbar.

10.2 SF_6 als Reinigungsgas für den Sekundäraluminiumguss

Zur Entfernung von in der Aluminiumschmelze befindlichen Gasen (Entgasung), vorwiegend von Wasserstoff, aber auch zur Entfernung von unerwünschten Elementen (Reinigung) werden Aluminiumschmelzen vor dem Abgießen in Formen vorbehandelt. Die Entgasung und Reinigung dienen der Qualitätsverbesserung. Zur Entgasung werden meist die Inertgase Stickstoff und/oder Argon eingeleitet. Zur Reinigung werden Halogene (Chlor,

Fluor etc.) eingebracht. Während zur Reinigung von Primärschmelzen den Inertgasen daher üblicherweise elementares Chlor als chemisch reagierender Stoff zugesetzt wird, weil die Reinheitsanforderungen an Primäraluminium sehr hoch sind, genügen zum Spülen von Sekundäraluminium-Schmelzen in der Regel Inertgase ohne Additive [Steinhäuser 1996: aus Schwarz, Leisewitz 1999]. Der Einsatz des in den USA zum damaligen Zeitpunkt gebräuchlichen SF₆ konnte sich nach Auskunft der Wirtschaftsvereinigung Metalle [1995] wegen auftretender Probleme am Arbeitsplatz in Deutschland nicht durchsetzen. Dies wurde dem UBA im Jahr 2002 nochmals bestätigt. Als weiterer Grund wird genannt, dass SF₆ auch hinsichtlich der Kosten gegenüber den etablierten Mitteln nicht konkurrenzfähig ist.

Ein deutscher Hersteller verwendet als Einziger in Europa SF₆ zum Entgasen und Reinigen bei der Herstellung einer speziellen Aluminiumlegierung. Die eingesetzte SF₆-Menge stieg bisher jährlich an. Messungen ergaben, dass SF₆ im Prozess quantitativ zerstört wird. Während bis zum Jahr 2008 3 % des eingesetzten SF₆ entwichen und 97 % im Prozess zerstört wurden, wies der Hersteller 2009 in einer Messung an der umgebauten Anlage nach, dass im Abgas nur noch 1,5 % des eingesetzten SF₆ enthalten sind, d.h. 98,5 % des SF₆ zerstört werden. Der Hersteller beabsichtigt, zukünftig auf SF₆ zu verzichten und es ab dem Jahr 2015 durch ein anderes Gas zu ersetzen.

In Kapitel 10 verwendete Literatur

3M (2003): Mündliche Mitteilung Herr Peter Breloer vom 14. Februar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].

Anhörung (2003): Gespräche zu fluorierten Treibhausgasen auf der Basis des Eckpunktepapiers und der hierzu im BMU eingegangenen Stellungnahmen zu den Anwendungsbereichen „stationäre Kälte- und Klimatechnik“ (28./29. Januar 2003), „mobile Kälte- und Klimatechnik (einschl. Transportisolierung)“ (30. Januar 2003), „Verschäumung (einschließlich Montageschaum)“ (12. Februar 2003), „SF₆ in Schaltanlagen“ (13. Februar 2003), „Halbleiterindustrie“ (13. Februar 2003) und „Sprayanwendungen, Feuerlöschmittel, sonstige Anwendungen“ (14. Februar 2003), Umweltministerium, Bonn.

Australian Magnesium (2003a): Mündliche Mitteilung Herr Manfred Quandt vom 14. Februar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].

Australian Magnesium (2003b): Persönliche Mitteilung Herr Christian Kettler vom 16. Oktober 2003.

Australian Magnesium (2004): Persönliche Mitteilung Herr Christian Kettler vom 27. Januar 2004.

Bach, F.-W; Karger, A.; Pelz, C.; Schaper, M. (2006): *Verwendung von CO₂ Schnee zur Abdeckung von Magnesiumschmelzen*. Institut für Werkstoffkunde der Universität

- Hannover, Linde AG, Unterschleißheim, Information der Linde AG 06/03. (<http://corporateresponsibility.linde.com/2005/de/serviceseiten/suche.php?q=Magnesium&pageID=4706>, 3.06.2010).
- Bartos u. a. (2003): *Measured SF₆ emissions from magnesium die casting operations*. Vortrag auf dem 132nd TMS Annual Meeting, 2. bis 6. März 2003, San Diego, Kalifornien.
- BReg - Bundesregierung (2004): *Berichterstattung der Bundesrepublik Deutschland gemäß Artikel 5, 7 und 8 des Kyoto-Protokolls der UN-Klimarahmenkonvention zu fluorierten Treibhausgasen an das Sekretariat der Klimarahmenkonvention im Jahr 2004*, (<http://unfccc.int/program/mis/ghg/submis2003.html>; 8.1.2004).
- Carli, Stefan; Martin, Andreas; Kluge, Steffen (1997): *SF₆-Emissions from magnesium die casting*. In: *Proceedings of the First Israeli Conference on Magnesium Science & Technology*, 10.-12. November 1997, Dead Sea, Israel.
- Deslauniers, Roger (2008): *Update of Advance Magnesium Melt Protection Technologies*. 4th Annual International Global magnesium Industry Climate protection Workshop at the 65th annual World magnesium Conference, 18. Mai 2008, Warschau, Polen, (http://www.epa.gov/highgwp/magnesium-sf6/documents/8_update_advance_mag.pdf; 30.06.2010).
- EPA (2004) *Characterization of Cover Gas Emissions from U.S. Magnesium Die Castings*. Environmental Protection Agency (EPA), Climate Protection Partnership Division Washington D.C., May 2004, EPA 430-R-04-004.
- EPA (2007) *Characterization of Emissions and occupational Exposure Associated with Five Cover Gas technologies for Magnesium Die Castings*. Environmental Protection Agency (EPA), Office of Air Radiation, Office of Atmospheric Programs, Climate Change Division, August 2007, EPA 430-R-07-008.
- EPA (2008) 4th Annual International Global magnesium Industry Climate protection Workshop at the 65th annual World magnesium Conference, May 18, 2008 Warschau, Polen. (http://www.epa.gov/highgwp/magnesium-sf6/conf/conf_4thglobal.html; 12.04.2010).
- GDM - Gesamtverband deutscher Metallgießereien e.V. (2007): *Bericht über das Geschäftsjahr 2006*. August 2007, (<http://www.gdm-metallguss.de>; 12.03.2010).
- Harnisch, Jochen; Schwarz, Winfried (2003): *Final Report on the Costs and the Impact on Emissions of Potential Regulatory Framework for Reducing Emissions of Hydrofluorocarbons, Perfluorocarbons and Sulphur Hexafluoride*. Studie im Auftrag der Europäischen Kommission (GD Umwelt), Nürnberg: Ecofys GmbH,

- Öko-Recherche.
(http://www.oekorecherche.de/english/berichte/volltext/ecofys_oekorecherchestudy.pdf; 29.03.2010).
- Hillis, James E. (2002): *The International Program to Identify Alternatives to SF₆ for Magnesium Melt Protection*. International Conference on SF₆ and the Environment, San Diego.
- Hydro Magnesium - Hydro Magnesium und International Magnesium Association (2000): *The Industry Perspective to Limit Emissions of SF₆ from Production and Casting of Magnesium*. Brüssel, Belgien.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (1995): *Climate Change 1995 - The Science of Climate Change*. Contribution of Working Group I to the Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (1996): *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Workbook (Volume 2), Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- IMA - International Magnesium Association (2009): Annual World Magnesium Conferences, San Francisco, California, 31. Mai bis 2. Juni 2009, (<http://www.intlmag.org/assets/pdfs/2009Abstracts.pdf>).
- IMA – International Magnesium Association (2010), *Primary Magnesium Production 2008*. (<http://www.intlmag.org/files/yend2008.pdf>; 22.10.2010).
- Karger, Alexander (2006a): *Umwelt – und werkstoffgerechte Schutzgassysteme für Magnesiumschmelzen*. Dissertation am Institut für Werkstoffkunde, Fakultät Maschinenbau an der Gottfried Leibniz Universität, Hannover.
- Karger, Alexander; Biedenkopf, Peter; Schaper, Mirko (2006b): *Eine innovative Methode zum Abdecken von Magnesiumschmelzen mit festem CO₂*. Giesserei 93 (04) 72-76.
- Milbrath, Dean S. (2002): *Development of 3MTM Novec 612 Magnesium Protection Fluid as a Substitute for SF₆ over Molten Magnesium*. International Conference on SF₆ and the Environment, San Diego, Kalifornien, USA.
- Öko-Recherche (2008), Winfried Schwarz; Reissner, Agnes *Fachgespräche zur Verordnung (EG) Nr. 842/2006 über bestimmte fluorierte Treibhausgase zu den Themen Qualifikation und Zertifizierung von Unternehmen und Personal (Kälte-Klimabranche) und Verwendung von Schwefelhexafluorid in der NE-Metallindustrie*, Bericht im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 363 01 172, Januar 2008.
(<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3488.pdf>, 15.02.2010).

- Öko-Recherche (2009), Winfried Schwarz, Barbara Gschrey: *Service contract to assess the feasibility of options to reduce emissions of SF₆ from the EU non-ferrous metal industry and analyse their potential impacts*, Final Report, Frankfurt am Main, Oktober 2009.
(http://ec.europa.eu/environment/climat/fluor/pdf/report_sf6.pdf; 15.02.2010).
- REACH (2006) *Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Chemikalienagentur, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission*, berichtigte Fassung veröffentlicht im Amtsblatt der Europäischen Union am 29.05.2007, L136/3.
- Ricketts, Nigel J. u. a. (2003): *Replacement of SF₆ for the Protection of Molten Magnesium*.
- Schwarz, Winfried; Leisewitz, André (1999): *Emissionen und Minderungspotential von HFKW, FKW und SF₆ in Deutschland*. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 298 41 256, Frankfurt/Main: Öko-Recherche.
(http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=2483, 27.10.2010).
- Schwarz, Winfried (2009): *Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland 2006 und 2007*, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, Texte 22/2009.
- Schwarz, Winfried, (2010): *Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland 2008. Inventarermittlung der F-Gase 2008 Daten von HFKW, FKW und SF₆ für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für das Berichtsjahr 2008.*, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, Texte 41/2010.
(<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3999.pdf>).
- Steinhäuser, Th. (1996): Universität Duisburg, Fachbereich 8, persönliche Mitteilung an Herrn Winfried Schwarz vom 8. Oktober 1996.
- UNFCCC (2008): *Approved baseline and monitoring methodology AM0065 “Replacement of SF₆ with alternate cover gas in the magnesium industry”*, 1. Februar 2008
(<http://cdm.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/FGLCX4465YLA50JI5269YAS57V40M8>; 12.04.2010).
- VDG (2003): *Umwelt- und werkstoffgerechte Magnesiumschmelzbehandlung*. Verbundforschungsvorhaben im BMBF-Förderprogramm „Integrierter Umweltschutz in der Gießereiindustrie“.

- VDI (2008) Katharina Otzen, *Chinas Magnesiumproduktion übersteigt den Weltbedarf*, VDI Nachrichten, Düsseldorf, 29. Februar 2008 (http://www.vdi-nachrichten.com/vdi-nachrichten/aktuelle_ausgabe/akt_ausg_detail.asp?cat=2&id=37407; 27.10.2010).
- VW - Volkswagen AG (2003a): Mündliche Mitteilung Herr Block vom 14. Februar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- VW - Volkswagen AG (2003b): Mündliche Mitteilung Herr Holger M. Thum vom 14. Februar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- Wirtschaftsvereinigung Metalle (1995): Schreiben an das Umweltbundesamt vom 14. März 1995.

11 SF₆ als Füllgas in Isolierverglasungen von Schallschutzfenstern

Bereits in den siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts hat sich Mehrscheiben-Isolierglas gegen die bis dahin übliche Einfachverglasung bei (Kasten-)Fenstern und Glasfassaden durchgesetzt. Seit 1975 haben Hersteller SF₆ zur Erhöhung der Schalldämmung in den Scheibenzwischenraum gefüllt. Seit dem 4. Juli 2008 ist das Inverkehrbringen von Fenstern, die SF₆ oder andere fluorierte Treibhausgase enthalten, in der Europäischen Union untersagt¹ [KOM 2006]. Bereits im Vorfeld des Verbots haben Hersteller die SF₆-Mengen reduziert oder auf den Einsatz von SF₆ verzichtet.

Emissionen von SF₆ aus dieser Anwendung entstehen zwar bereits in der Herstellung und in der Nutzphase. Der überwiegende Teil der Emissionen tritt aber erst bei der Entsorgung auf. Auf Kapitel 2 wird verwiesen.

Die Herstellung von Isolierglasscheiben erfolgt in Deutschland überwiegend dezentral in klein- und mittelständischen Betrieben (etwa 400 Hersteller). Die Lebensdauer der Scheiben beträgt durchschnittlich 25 Jahre [Schwarz, Leisewitz 1999].

Lärm stört und belästigt erheblich. In den letzten Jahren rückte der Lärm als störender Umwelteinfluss immer stärker in das Bewusstsein der Bevölkerung. Auf ungestörtes und ruhiges Wohnen als wichtiger Bestandteil der Lebensqualität wird ein immer größerer Wert gelegt. Eine Reihe von Gesetzen, Verordnungen und Richtlinien legen Grenzwerte fest oder ermöglichen eine aktive Lärmbekämpfung bei der Planung.

Für den Schallschutz eines Fensters ist die Verglasung, die Rahmenkonstruktion und die möglichst geringe Fugendurchlässigkeit maßgebend. Die Scheibenzwischenräume von Mehrscheiben-Isolierglas-Fenstern werden zur Verbesserung der Schalldämmung mit Gasen befüllt.

In Deutschland wird die Schalldämmung von Fenstern nach VDI 2719 [1987] in sechs Schallschutzklassen unterteilt, wobei die Zuordnung anhand des bewerteten Schalldämmmaßes [dB] erfolgt [Fensterportal 2008]. Zur Berechnung des

¹ Ausgenommen sind vor diesem Termin hergestellte Fenster. Das Inverkehrbringen von Fenstern von Wohnhäusern war bereits seit dem 4. Juli 2007 untersagt.

Schalldämmmaße sind Regelwerke vorhanden. Für die Einstufung eines Fensters in eine Schallschutzklasse ist das Zeugnis einer anerkannten Prüfstelle maßgebend.

Gegenüber Scheiben mit Luft- oder Edelgas-Füllung verbessert SF₆ die Schalldämmung im „bauakustisch festgelegten Frequenzbereich“ um 2-5 dB [Anonym 2001; Saß, Schuhmacher 2000]. Für eine genaue Beurteilung der erzielten Schalldämmung ist jedoch eine detailliertere Betrachtung erforderlich.

Wegen der Besonderheiten des Prüfverfahrens nach DIN 52210-4² [DIN 1984] für die Schalldämmung von Bauteilen wurden Isolierglasscheiben mit SF₆-Füllung für den praktischen Einsatz gegen Straßenverkehrslärm deutlich zu gut beurteilt [Schwarz, Leisewitz 1999]. Zwar wird die Schalldämmung von Mehrscheiben-Isolierglas durch das in den Scheibenzwischenraum gefüllte SF₆ oder Gemisch aus Argon und SF₆ gegenüber luftgefüllten Isolierglasscheiben im „bauakustisch festgelegten Frequenzbereich“ um 2-5 dB verbessert. Und dementsprechend ist das im Prüfzeugnis der Scheibe angegebene, verkaufswirksame Schalldämmmaß R_w um 2-5 dB höher [Anonym 2001; Saß, Schuhmacher 2000]. Der deutlichen Verbesserung des Dämmverhaltens bei hohen Frequenzen steht aber eine Verschlechterung der Schalldämmung bei tiefen Frequenzen gegenüber. Häufig weisen gerade Straßenverkehrsgeräusche einen hohen Anteil tiefer Frequenzen auf. Dies gilt z. B. für Straßen mit starkem Lkw-Verkehr. Hier bringt die verbesserte Schalldämmung im Bereich hoher Frequenzen kaum oder keine Vorteile [Saß, Schuhmacher 2000; Isolar 2000].

Die 1996 auch in Deutschland eingeführte DIN EN ISO 717-1 berücksichtigt diesen „Einbruch“ bei tiefen Frequenzen [DIN 2006]. Es werden sogenannte Spektrum-Anpassungswerte eingeführt. Mittels der dadurch erreichten Berücksichtigung des Frequenz-Spektrums für den städtischen Straßenverkehr verbessert sich das bewertete Schalldämmmaß (jetzt $R_w + C_{tr}$) der Isolierglasscheiben durch die SF₆-Füllung lediglich um etwa 0 bis 2 dB. Das bewertete Schalldämmmaß von fertigen Fenstern wird durch Verglasungen mit SF₆-Anteil lediglich um ca. 1 dB verbessert [Saß, Schuhmacher 2000].

Die durch den Einsatz von SF₆ angestrebte verbesserte Schalldämmung geht mit einer Verschlechterung der Wärmedämmeigenschaften einher. Aus diesem Grund haben Hersteller zum Zweck der Einhaltung der *WärmeschutzV* [1994] den SF₆-Anteil in Schallschutzfenstern bereits mehrfach reduziert und meist Gemische mit Argon eingesetzt [Anonym 2001].

Durch die Diskussion um die Klimawirksamkeit von SF₆ sind zunächst weniger umweltschädliche Gase mit ähnlich günstigen Schallschutzeigenschaften zur Substitution gesucht worden. Allerdings brachten Versuche mit speziellen Gasgemischen keine

² Teil 4 wurde im Jahr 1997 zurückgezogen und ersetzt durch DIN EN ISO 717-1 [DIN 2006]. Andere Teile der Norm wurden im Jahr 1998 zurückgezogen und ersetzt durch DIN EN ISO 140 [z. B. DIN 2005].

befriedigenden Ergebnisse, so dass dieser Weg nicht länger verfolgt wurde. Auch die erhoffte, positive Wirkung der Verwendung von Krypton auf den Schallschutz von Isoliergläsern konnte nicht durchgängig nachgewiesen werden [Hornischer 2002].

Technisch ist es möglich, die durch SF₆ erzielte, verbesserte Schalldämmung durch eine Veränderung der Glasaufbauten zu erreichen [Anonym 2001]. Denkbar sind neben schalldämmenden Fensterkonstruktionen wie Kastenfenstern auch dickere Scheiben oder Schallschutzfolien [Hornischer 2002]. Wird für Spezialanwendungen ein besonders effektiver Schallschutz benötigt, führen solche Änderungen am Fensteraufbau zu Mehrkosten. Die konkrete Höhe der zusätzlichen Kosten hängt von der gewählten Fensterkonstruktion und vor allem von dem Schalldämmmaß ab, welches das Fenster erreichen soll. Während sich unterhalb eines Schalldämmmaßes von 40 dB kaum Preisunterschiede zeigen, betragen die zusätzlichen Kosten oberhalb von 40 dB etwa € 7 bis € 29 pro m². Die durchschnittlichen, auf die Gesamtkosten bezogenen Mehrkosten betragen im Bereich 37-45 dB pro m² etwa 17,8 % (€ 10) [Harnisch, Schwarz 2003]. Für viele Anwendungen ist der alleinige Verzicht auf SF₆ - welcher zu keinen Mehrkosten führt - möglich [BF 2003]. Berechnungen besagen, dass auch im Bereich hoher Schalldämmmaße die aus einer verbesserten Wärmedämmung ohne SF₆ resultierenden verringerten Heizkosten die Mehrkosten eines Fensters ohne SF₆ überkompensieren können [Harnisch, Schwarz 2003].

Die Rückgewinnung des klimawirksamen SF₆ als Maßnahme zur Emissionsminderung hat sich weder technisch noch wirtschaftlich als durchführbar erwiesen [Schwarz, Leisewitz 1999; Hornischer 2002]. Damit wird einmal eingesetztes Gas vollständig emittiert.

Schlussfolgerungen

Seit dem 4. Juli 2008 ist das Inverkehrbringen von Fenstern, die SF₆ oder andere fluorierte Treibhausgase enthalten, in der Europäischen Union untersagt [KOM 2006].

Auch ohne SF₆-Füllung lassen sich Isolierglasscheiben mit hoher Schalldämmung fertigen. Die zusätzlich entstehenden Kosten sind gering. Zudem führt der Einsatz von SF₆ in Mehrscheiben-Isolierglas-Fenstern zu einer Verminderung der Wärmedämmung der Scheibe. Berechnungen ergeben, dass die geringen Mehrkosten für eine hohe Schalldämmung ohne SF₆ durch Einsparungen bei den Heizkosten ausgeglichen werden können.

Eine Rückgewinnung der knapp 2.000 t SF₆, die sich heute in Deutschland noch in bereits verbauten Isolierglasscheiben befinden (Stand: 2006), wäre zwar wünschenswert, ist aber aus technischen/logistischen und wirtschaftlichen Gründen nicht als praktikabel anzusehen.

In Kapitel 11 verwendete Literatur

24. BImSchV (1997): *Vierundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes - Verkehrswege-Schallschutzmaßnahmenverordnung*. Vom 4. Februar 1997, BGBl. I 1997 S. 172, ber. BGBl. I 1997 S. 1253.
- Anonym (2001): *Umweltverträgliche Schalldämmung*. In: GFF – Zeitschrift für Glas • Fenster • Fassade, 2001 (10).
- BF - Bundesverband Flachglas e.V. (2003): Mündliche Mitteilung Herr Rüdiger Graap vom 12. Februar 2003, Bonn: [Anhörung 2003].
- BImSchG (2002): *Bundes-Immissionsschutzgesetz, Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge*. Vom 26. September 2002, BGBl. I Nr. 71 S. 3830.
- DIN (1984): *Bauakustische Prüfungen - Luft- und Trittschalldämmung; Ermittlung von Einzahl-Angaben*. DIN 52210-4, Ausgabe: August 1984, Berlin: Beuth.
- DIN (1989): *Schallschutz im Hochbau*. DIN 4109, Ausgabe: November 1989, sowie Änderungen und Beiblätter, Berlin: Beuth.
- DIN (2005): *Akustik - Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 3: Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen in Prüfständen*. DIN EN ISO 140. Deutsche Fassung EN 20140-3:1995 + A1:2004, Berlin: Beuth.
- DIN (2006): *Akustik - Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 1: Luftschalldämmung*. DIN EN ISO 717-1. Deutsche Fassung EN ISO 717-1: 1996, + A1: 2006 Berlin: Beuth.
- Harnisch, Jochen; Schwarz, Winfried (2003): *Final Report on the Costs and the impact on Emissions of Potential Regulatory Framework for Reducing Emissions of Hydrofluorocarbons, Perfluorocarbons and Sulphur Hexafluoride*. Studie im Auftrag der Europäischen Kommission (GD Umwelt), Nürnberg: Ecofys GmbH, Öko-Recherche.
- Hornischer, Rudolf (2002): *Das SF₆-Verbot für Schallschutzgläser - ein Bericht zur Situation bei Wärme- und Schallschutzgläsern*. (www.fgw.at/wbfoe/2002-1/horn.htm; 16.6.2003).
- Fensterportal (2003): *Das Fensterportal*. (www.fenster1.de/fenster-schallschutz-schallschutzklassen 11.8.2008).
- Isolar - Isolar-Glas-Beratung GmbH (2000): *SF₆ in Mehrscheiben-Isoliergas*. In: KLAR[TEXT], 2000 (2).

- KOM - Europäische Kommission (2006): *Verordnung (EG) Nr. 842/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über bestimmte fluorierte Treibhausgase*. ABl. EG Nr. L161/1 vom 14.6.2006.
- Saß, Bernd; Schuhmacher, Rolf (2000): *Einfluss von SF₆ im Scheibenzwischenraum der Verglasung auf die Schalldämmung von Fenstern*. i.f.t. Rosenheim.
- Schwarz, Winfried; Leisewitz, André (1999): *Emissionen und Minderungspotential von HFKW, FKW und SF₆ in Deutschland*. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 298 41 256, Frankfurt/Main: Öko-Recherche. (www.umweltbundesamt.de/luft/emissionen/f-und-e/abgeschlossen/index.htm; 30.12.2003).
- TA Lärm (1998): *Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm, Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz*. Vom 26. August 1998, GMBI. 1998 S. 503.
- VDI 2719 (1987): *Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen*. Ausgabe: August 1987, Berlin: Beuth.
- WärmeschutzV (1994): *Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung - WärmeschutzV)*. Vom 16. August 1994, BGBl I S. 2121.

12 SF₆ als Lecksuch- und Tracergas

SF₆ ist auch heute noch ein gängiges Tracergas (Indikatorgas, Spurengas) bei Luftströmungs- und Gasausbreitungsmessungen (Stadtklimauntersuchungen, Luftaustauschmessungen in Gebäuden etc.). SF₆ eignet sich hier wegen seiner geringen Hintergrundkonzentration, seiner Stabilität, der nur schwach ausgeprägten Wechselwirkung zu Materialien, Ungiftigkeit, Unbrennbarkeit und seiner einfachen Detektierbarkeit.

Eine der häufigsten bekannten Anwendungen von SF₆ in diesem Anwendungsfeld ist die Messung des Luftwechsels in Gebäuden und Innenräumen gemäß DIN EN ISO 12569 (Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Bestimmung des Luftwechsels von Gebäuden - Indikatorgasverfahren) [DIN 2001] und VDI Richtlinie 4300, Bl. 7 (Messen von Innenraumluftverunreinigungen - Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen) [VDI 2001]. Die Verfahren beruhen auf Konzentrationsmessungen eines eingebrachten Indikatorgases (Tracergases) als Funktion der Zeit. Beide Normen listen im Anhang neben SF₆ auch weitere Tracergase auf: Helium (nur DIN 2001), C₆F₆ (nur VDI 2001), CO₂ oder Lachgas. Der Einsatz von SF₆ ist für keines der beschriebenen Verfahren zwingend vorgeschrieben.

Auch für stadtklimatologische Untersuchungen ist SF₆ ein gängiges Tracergas, wie u. a. Veröffentlichungen zu Untersuchungen in Trier/Ludwigshafen [Eggert 2000], Osnabrück [Weber, Kuttler 2003] und Freiburg [Matzarakis u. a. 2008] zeigen. So muss der Nachweis von Kaltluftströmen überwiegend mit optischen (z. B. Raucherzeuger) oder chemischen Tracern (z. B. SF₆) erfolgen, da konventionelle Windmessgeräte aufgrund mechanischer Trägheit im Schwachwindbereich nicht exakt aufzeichnen (Barlag und Kuttler 2008). Entsprechend empfiehlt auch der Entwurf der VDI-Richtlinie 3785 „Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima“ [VDI 2007] die Tracergasmethode zum Nachweis von Luftbewegungen, Kaltluftausbreitung und Geruchsausbreitung während schwachwindiger Situationen. Neben SF₆ ist lediglich CF₄ als mögliches Tracergas angegeben, obwohl eine Fußnote darauf hinweist, dass „die Freisetzung der hier aufgeführten Tracer (SF₆, CF₄) [...] unter dem Gesichtspunkt, dass sie äußerst starke und langlebige Treibhausgase sind, und deren Verbot für bestimmte Anwendungen bereits in Vorbereitung ist, auf ein Minimum beschränkt werden [sollte]. Stattdessen sollte auf andere Substanzen mit geringerem Treibhauspotenzial zurückgegriffen werden.“ Die Anwendung von Raucherzeugern hat den Nachteil, dass diese

nur visuell und damit qualitativ, nicht jedoch wie chemische Tracer auch quantitativ nachgewiesen werden können (Kuttler und Dütemeyer 2003).

In der Forschung und bei der Entwicklung z. B. von Messverfahren findet SF₆ ebenfalls als Tracergas Anwendung. Diese Anwendungen sind sehr speziell (atmosphärische Langzeitmessungen, Messung der Methan-Emission von Kühen, Bestimmung von Umwälzvorgängen in Seen etc.) und die eingesetzten Mengen in der Regel gering. Auf die Beschreibung dieser Anwendungen wird in diesem Bericht daher verzichtet.

Die bei den verschiedenen Messungen benötigten Konzentrationen liegen meist im ppm-Bereich und haben sich aufgrund verbesserter Sensoren in den letzten Jahren weiter verringert. Die in Deutschland eingesetzte Menge an SF₆ als Tracergas nimmt seit einigen Jahren ab und beträgt heute weit unter 500 kg/a [Schwarz 2010].

Im Jahr 2007 hat das englische Verteidigungsministerium Tests zur Ausbreitung von Giftgasen in Londoner U-Bahntunneln durchführen lassen, bei denen als Testgas ebenfalls SF₆ zum Einsatz kam [BBC 2007]. Über die eingesetzten Mengen ist nichts bekannt.

Auch wenn SF₆ in der Vergangenheit als Lecksuchgas (Schnüffelfgas, Prüfgas) zur genaueren Detektion von Leckstellen, z. B. in wasserführenden Leitungssystemen der Fernwärmeversorgung, eingesetzt wurde, finden sich heute keine Hinweise mehr auf solche Anwendungen. Hierfür können, ebenso wie für die Prüfung neu eingebauter Rohrabschnitte, andere Gase wie z. B. Helium oder Stickstoff/Wasserstoff-Gemische eingesetzt werden, die heute fest etabliert sind. SF₆ hat gegenüber diesen Gasen keine Vorteile, verursacht aber höhere Kosten [Umsicht 2003].

Vielfältige Anwendungen für Lecksuchgase gibt es darüber hinaus beim Apparatebau / bei der Bauteilherstellung. Hierzu zählt auch die Automobilzulieferindustrie. SF₆ wird hier - soweit bekannt - nicht eingesetzt.

Schlussfolgerungen

Der Einsatz von SF₆ als Lecksuch- oder Prüfgas (Leitungssysteme, Apparatebau etc.) ist weder ökonomisch sinnvoll noch ökologisch vertretbar. Für diese Anwendungen sollten andere Stoffe als SF₆ eingesetzt werden.

Anders ist der Einsatz als Tracergas in der Forschung zu bewerten. Es ist davon auszugehen, dass es hier über die genannten Anwendungen hinaus noch weitere gibt. Während die meist sehr speziellen Anwendungen recht vielfältig sein können, sind die eingesetzten Mengen vernachlässigbar gering. Von einem signifikanten Anstieg der Emissionen muss in diesem Bereich heute ebenfalls nicht ausgegangen werden. Zur Vermeidung von umweltschädlichen Emissionen sind die möglichen Umweltauswirkungen bei der Auswahl der Stoffe zu berücksichtigen und die Einsatzmengen zu minimieren.

Sofern SF₆ als Tracergas für Messungen in Normen aufgeführt wird, sollte ein Hinweis auf dessen extrem hohes Treibhauspotenzial aufgenommen werden und – soweit vorhanden – auf Alternativen hingewiesen und diesen der Vorzug gegeben werden.

In Kapitel 12 verwendete Literatur

- Barlag, Andreas-Bent; Kuttler, Wilhelm (2008): *Stadtklima am Niederrhein – dargestellt am Beispiel der Stadt Krefeld*. In : Natur am Niederrhein (N. F.) 23 (1) 155-165. Krefeld.
- BBC (2007): *Poison gas' test on Underground*, BBC News 25. März 2007.
- DIN (2001): *Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Bestimmung des Luftwechsels von Gebäuden – Indikatorgasverfahren*. DIN EN ISO 12569, Ausgabe: März 2001, Deutsche Fassung EN ISO 12569:2000, Berlin: Beuth.
- Eggert, Axel W. K. (2000): *Dreidimensionale SF₆-Tracergasmessung als Methodik zum Nachweis von lokalen Luftströmungen für die planungsorientierte Stadtklimatologie: Systementwicklung und Anwendungsbeispiele aus Trier und Ludwigshafen*. Dissertation. Reihe Umweltwissenschaft. Trier: Shaker.
- Kuttler, Wilhelm; Düttemeyer, D. (2003): *Umweltmeteorologische Untersuchungsmethoden*. In: Promet 30 (1-2) 15-27. Offenbach: Deutscher Wetterdienst.
- Matzarakis, A. u. a. (2008): *Planungsrelevante Bewertung des Stadtklimas. Am Beispiel von Freiburg im Breisgau*. In: Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 68 (7/8) 334-340.
- Piringer, Martin u. a. (1997): *Results on Perfluorocarbon Background Concentrations in Austria*. In: Atmos. Environ., 31 (4) 515-527.
- Schwarz, Winfried (2010): Mündliche Mitteilung am 08. Januar 2010.
- Umsicht - Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (2003): Persönliche Mitteilung Herr Peter Schwerdt vom 9.09.2003.
- VDI (2001): *Messen von Innenraumluftverunreinigungen - Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen*: VDI Richtlinie 4300, Bl. 7, Ausgabe: 2001, Berlin: Beuth.
- VDI (2007): *Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima*. VDI-Richtlinie 3785, Bl. 1, Ausgabe: 2007 (Entwurf), Berlin: Beuth.
- Weber, Stephan; Kuttler, Wilhelm (2003): *Analyse der nächtlichen Kaltluftdynamik und -qualität einer stadtklimarelevanten Luftleitbahn*. In: Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 63 (9) 381–386.

13 SF₆ als Füllgas in Autoreifen

Etwa Mitte der achtziger Jahre des letzten Jahrhunderts haben Reifenhersteller SF₆ erstmals als Füllgas für Autoreifen an Stelle von Luft propagiert. In der Folge kam es zu einem kontinuierlichen Anstieg des Einsatzes und der Emissionen (s. Kap. 2). Seit dem 4. Juli 2007 darf SF₆ in der Europäischen Union nicht mehr zu diesem Zweck verwendet werden [KOM 2006], so dass bis zum Jahr 2010 nur noch Restbestände in vor diesem Datum befüllten Reifen vorhanden sind und der Bestand dann auf Null reduziert sein wird. Allerdings ging der Absatz von SF₆ für die Befüllung von Autoreifen bereits vor dem Inkrafttreten des Verbots kontinuierlich zurück.

Wegen seiner Molekülgröße diffundiert SF₆ im Vergleich zu Luft weniger schnell aus den Reifen. Dadurch sollte ein langanhaltender, stabiler Reifendruck und in der Folge eine erhöhte Fahrsicherheit, ein geringerer Reifenverschleiß und ein niedrigerer Spritverbrauch erzielt werden.

Ein höherer Komfort (Fahrgefühl) konnte in Praxistests nicht bestätigt werden. Auch hat die Verwendung von SF₆ nach Aussagen von Reifenherstellern den Fahrer nicht von einer ständigen Kontrolle des Reifendrucks entbunden [UBA 1997]. Damit ging ein entscheidender - scheinbarer - Vorteil des SF₆ (ausreichender Reifendruck ohne ständige Kontrolle) verloren. Die neben dem langanhaltenden Reifendruck angeführten Vorteile sind ebenfalls hinfällig, da sie nicht durch den Einsatz von SF₆ als solchem, sondern durch den ausreichenden Reifendruck gewährleistet werden.

Bei regelmäßiger Kontrolle des Reifendrucks werden alle oben genannten Ziele problemlos durch Luft als Reifenfüllgas erreicht.

Reifenhersteller haben bereits vor einigen Jahren ihre Empfehlung der Nutzung von SF₆ wegen der Klimarelevanz und des in der Praxis nicht bestätigten Vorteils dieses Stoffes zurückgezogen. Kunden haben aber weiterhin SF₆ nachgefragt und in Werkstätten erhalten.

Als weitere Möglichkeit, einen ausreichenden Reifendruck über einen längeren Zeitraum als bei Verwendung von Luft zu halten, wird von Gase- und Reifenhändlern sowie Werkstätten die Verwendung von Stickstoff (N₂) angeboten [Bundesverband Reifenhandel 2003; Weymann 1997]. Stickstoff ist ein wesentlicher Bestandteil von Luft und kann aus dieser gewonnen werden. Negative Umwelteigenschaften besitzt dieses Gas nicht. Als Füllgas reduziert es nach Aussagen der Systemanbieter wegen seiner Diffusionseigenschaften und

seiner inertisierenden Wirkung den Druckverlust [Weymann 1997]. Regelmäßige Druckkontrollen sind aber auch hier unerlässlich. In der Formel 1 und in Flugzeugen sind die Reifen mit Stickstoff befüllt [Weymann 1997]. Allerdings sind die Vorteile der Verwendung von Stickstoff gegenüber Luft nicht unumstritten [ÖAMTC 2003].

Schlussfolgerungen

Die Verwendung von SF₆ als Füllgas in Autoreifen ist in der Europäischen Union seit dem 4. Juli 2007 verboten. Eine Stabilisierung des Reifendrucks durch SF₆ hatte sich in der Praxis ohnehin als nicht relevant erwiesen und hätte überdies in keinem Verhältnis zu den resultierenden klimawirksamen Emissionen gestanden. Als kostensparende und umweltgerechte Alternativen stehen Druckluft oder Stickstoff zur Verfügung.

In Kapitel 13 verwendete Literatur

- Bundesverband Reifenhandel (2003): Internetinformation. (www.bundesverband-reifenhandel.de/verbraucher-infos/reifen_a_z.html#fuellgas_stickstoff; 16.6.2003).
- KOM - Europäische Kommission (2006): *Verordnung (EG) Nr. 842/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über bestimmte fluorierte Treibhausgase*. ABl. EG Nr. L161/1 vom 14.6.2006.
- ÖAMTC - Österreichischer Automobil-, Motorrad- und Touringclub (2003): Internetinformation. (www.oeamtc.at/netautor/pages/resshp/anwendg/1098300.html; 16.6.2003).
- Schwarz, Winfried (2004): *Emissionen, Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren von fluorierten Treibhausgasen (F-Gase) in Deutschland für die Jahre 1995-1998. Anpassung an die Anforderungen der internationalen Berichterstattung und Implementierung der Daten in das zentrale System Emissionen (ZSE)*. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 201 41 261/01, unveröffentlicht, Frankfurt/Main: Öko-Recherche.
- UBA - Umweltbundesamt (1997): *Schwefelhexafluorid als Reifenfüllgas ökologisch nicht vertretbar*. Stellungnahme des Umweltbundesamtes zu Schwefelhexafluorid (SF₆) als Reifenfüllgas. In: BRV-Mitglieder-Magazin „Trends & Facts“ 1997 (7) 22, Bonn: BRV.
- Weymann, Michael (1997): *Das komfortable Reifengas der Zukunft*. Information der DWT GmbH.

14 SF₆ und FKW als Dämpfungsgas in Schuhen

In den siebziger [Greenpeace 1998] oder neunziger Jahren [Harnisch, Schwarz 2003] des 20. Jahrhunderts hatte ein Sportartikelhersteller (Nike) mit der Herstellung von Lauf- und Hallensportschuhen mit SF₆ begonnen. Der weltweite SF₆-Verbrauch pro Jahr betrug bis 1997 etwa 280 t, wobei pro Schuhpaar etwa 2-2,5 g enthalten waren [Greenpeace 1998; Harnisch, Schwarz 2003]. Seit 1997 hat Nike die eingesetzten Mengen kontinuierlich reduziert [Harnisch, Schwarz 2003] und im Jahr 2003 die Verwendung von SF₆ vollständig eingestellt.

Ähnlich wie bei Autoreifen wurde die Molekülgröße von SF₆ genutzt. Beim Turnschuh, um das Gas möglichst langfristig in der Sohle zu halten. Durch das in der Sohle enthaltene Gas sollte der Aufprall der Sportler gedämpft werden. SF₆ wurde z. B. in Jogging- oder Basketballschuhen eingesetzt.

Zwischen Juli 2003 und 4. Juli 2006 hat Nike SF₆ vollständig durch andere, weniger treibhauswirksame Gase substituiert. Zum Teil wurde Perfluorpropan (GWP₁₀₀ = 7.000) eingesetzt. Den vom Hersteller zum Jahr 2006 angekündigten endgültigen Verzicht auf Gase mit einem hohen GWP [Harnisch, Schwarz 2003] hat die Europäische Kommission in der Verordnung (EG) Nr. 842/2006 [KOM 2006] aufgegriffen und den Einsatz fluorierter Treibhausgase in dieser Anwendung ab dem 4. Juli 2006 untersagt.

Schlussfolgerungen

Der Einsatz von SF₆ ist in dieser Anwendung nicht notwendig und unter ökologischen Gesichtspunkten abzulehnen. Folgerichtung ist die Verwendung von fluorierten Treibhausgasen in Schuhen in der Europäischen Union seit dem 4. Juli 2006 verboten.

In Kapitel 14 verwendete Literatur

Greenpeace (1998): *Gefahr aus dem Turnschuh*. Greenpeace Magazin, 1998 (2). (www.greenpeace-magazin.de/archiv/hefte98/2_98/news_gefahr.html; 16.6.2003).

Harnisch, Jochen; Schwarz, Winfried (2003): *Final Report on the Costs and the Impact on Emissions of Potential Regulatory Framework for Reducing Emissions of Hydrofluorocarbons, Perfluorocarbons and Sulphur Hexafluoride*. Studie im

Auftrag der Europäischen Kommission (GD Umwelt), Nürnberg: Ecofys GmbH, Öko-Recherche.

KOM - Europäische Kommission (2006): *Verordnung (EG) Nr. 842/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über bestimmte fluorierte Treibhausgase*. ABl. EG Nr. L161/1 vom 14.6.2006.

15 Übersicht über Substitutions- und weitere Emissionsminderungsmöglichkeiten in den einzelnen Anwendungsbereichen

In nahezu allen Anwendungsbereichen lassen sich fluorierte Treibhausgase (HFKW, FKW und SF₆) durch halogenfreie Alternativen substituieren. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl weiterer Emissionsminderungsmaßnahmen. Die Tabelle 15.1 fasst die im Teil B dieses Berichtes beschriebenen Substitutions- sowie die weiteren Emissionsminderungsmöglichkeiten zusammen. Anschließend wird auf einige wichtige Anwendungen gezielt eingegangen.

Die Anwendungen (Kältemittel, Treibmittel, Treibgas, Feuerlöschmittel, Lösemittel etc.) sind in Tabelle 15.1 in derselben Reihenfolge aufgelistet wie sie im Bericht erfasst sind. In der Spalte „F-Gase“ sind die jeweils Verwendung findenden HFKW, FKW und SF₆ aufgeführt. In einigen Anwendungsbereichen ist der Stoffersatz auch in bereits bestehenden Anlagen ohne wesentliche technische Änderungen als „drop-in“ möglich (Stoffersatz in Altanlagen). Meist sind jedoch wesentliche Änderungen der Anlagen oder ihr Austausch erforderlich. Bei Neuanlagen/Produkten sind die Substitutionsmöglichkeiten vielfältiger. Die Spalte Substitutionsmöglichkeiten (Stoffersatz und Ersatzverfahren) enthält in der Regel fluorfreie Stoffe und Verfahren; in Einzelfällen sind aber auch HFKW o. Ä. aufgenommen, wenn durch ihren Einsatz eine Reduktion des Treibhausbeitrags erreicht werden kann. Neben einer Stoffsubstitution stellen hier häufig auch alternative Produkte und Herstellungsverfahren ohne treibhauswirksame Stoffe (Stoffersatz und Ersatzverfahren in Neuanlagen bzw. Produkten) eine Möglichkeit zur Emissionsminderung dar. Weitere Maßnahmen zur Emissionsminderung für Alt- und Neuanlagen sowie Produkte vervollständigen die Auflistung.

Die Tabelle 15.1 stellt lediglich eine Orientierungshilfe bezüglich der vielfältigen Möglichkeiten der Stoffsubstitution dar. Sie ist ein Bestandteil des Gesamtberichts und nur im Zusammenhang mit den darin enthaltenen Zusatzinformationen aussagekräftig.

Kap.	Funktion	F-Gase	Substitutionsmöglichkeiten ¹ Stoffersatz und Ersatzverfahren			weitere Emissionsminderungsmaß- nahmen	
	Anwendung		Altanlagen	Neuanlagen/Produkte		Altanlagen/ Entsorgung	Neuanlagen/ Produkte
				im Einsatz	in Erprobung		
3	Kältemittel						
3.3.1	Haushalts- und Laborgeräte Wärmepumpentrockner	HFKW: 134a, 404A HFKW: 407C, 134a, 410A, 152a		600a, Absorber, Not-In-Kind	Not-In-Kind Kohlenwasser- stoffe, CO ₂ , Wasser	emissionsarme Ents.	
3.3.2	Kälteanlagen für gewerbliche Zwecke	HFKW: 134a, 404A, 407C, 507A	abhängig vom Einzelfall	290 und 600a (steckerfertig), CO ₂ (Kaskade), CO ₂ transkritisch, NH ₃ (indirekt), 1270 und 290 (indirekt)	CO ₂ , NH ₃ /CO ₂ -Kaskade (Einzelanlagen)	Füllmengenred., Wartung/ Leckage-ÜW, emissions- arme Ents., Anlagenaustausch	Hermetisie- rung/ Dichtheit, Wartung/ Leckage-ÜW, emissions- arme Ents.
3.3.3	Kälteanlagen für industrielle Zwecke	HFKW: 134a, 404A, 407C, 507A, 236fa, 227ea, FKW	abhängig vom Einzelfall	290, 600a, NH ₃ (mit und ohne Kälteträger), NH ₃ /CO ₂ -Kaskade, Absorber, Adsorber	CO ₂		
3.3.5	stationäre Klimaanlage	HFKW: 134a, 407C	abhängig vom Einzelfall	Absorber, Adsorber, H ₂ O, Klimatisierung ohne mechanische Kälte, NH ₃ , Kohlenwasserstoffe, NH ₃ /DME	H ₂ O, Klimatisierung ohne mechanische Kälte		
3.3.4	Transportkälteanlagen	HFKW: 410A, 404A, 134a, 407C		CO ₂ , Kohlenwasserstoffe, NH ₃ , NH ₃ /CO ₂	CO ₂ , Kohlenwas- serstoffe	emissionsarme Ents., Dichtheit	Füllmengen- reduktion, Hermetisie- rung/ Dichtheit, emissions-
3.3.2	Kälte- und Klimageräte	HFKW: 407C, 410A, 417A		290, zentrale Anlage ohne HFKW	CO ₂		
3.3.6	Hauswärmepumpen	HFKW: 407C, 410A, 404A, 417A, 134a		290, CO ₂ , Adsorber, Absorber			

¹ Abkürzungen der Kohlenwasserstoffe: 600a: iso-Butan; 290: Propan; 1270: Propen
Sonstige Abkürzungen: TK: Tiefkühlung; NK: Normalkühlung; ÜW: Überwachung; Ents.: Entsorgung; Dichtigkeit: Verbesserung der Dichtigkeit durch technische Maßnahmen

Kap.	Funktion Anwendung	F-Gase	Substitutionsmöglichkeiten ¹ Stoffersatz und Ersatzverfahren			weitere Emissionsminderungsmaß- nahmen	
			Altanlagen	Neuanlagen/Produkte		Altanlagen/ Entsorgung	Neuanlagen/ Produkte
				im Einsatz	in Erprobung		
3.3.7	Fahrzeugklimaanlagen	HFKW: 134a (zukünftig verboten)	290	290, CO ₂	1234yf		arme Ents.
4	Treibmittel						
4.1	Hartschäume zur Wärmedämmung (XPS, PUR)	HFKW: 134a, 152a, 365mfc, 245fa, 227ea		CO ₂ , CO ₂ /Ethanol, c-Pentan, i-Pentan, n-Pentan, andere Dämmmaterialien			
4.2	PUR-Weichschäume			CO ₂			
4.3	PUR-Integralschäume	HFKW: 134a, 245fa 365mfc, 227ea		CO ₂ , Pentan			
4.4	Montageschaum	HFKW: 134a, 152a (teilweise verboten)		290, n-Butan, DME, Systeme ohne Treibgas		emissionsarme Ents.	
5	Treibgas						
5.1.1	Technische Sprays: Kälte- und Druckluft und sonstige technische Sprays	HFKW: 134a (teilweise verboten)		290, 600a, N ₂ , CO ₂			
5.2	Medizinische Sprays	HFKW: 134a, 227ea		Pulverinhalatoren	600a		
5.3	Sonstige Sprays (außer Insektizide etc.)	HFKW: 134a (teilweise verboten)		290, 600a, N ₂ , CO ₂ , Produkte ohne Treibgas (z. B. Pumpsprays, Papierschlangen, mechanische Schallgeräte)			
5.3.6	Insektizide, Pflanzenschutzmittel etc., nicht für den Hausgebrauch bestimmt	HFKW:134a			CO ₂ , CO ₂ /Ameisensäure- ethylester		
6	Feuerlöschmittel	HFKW: 227ea, 236fa, 23, außerhalb Deutschlands noch andere	(Fluorke- ton)	CO ₂ , N ₂ , Argon, Inergen®, Wassernebel, Fluorketon, Schaum, Sprinkler, Frühwarnsysteme etc.	Wassernebel, Fluorketon für neue Anwendungen	Wartung/ Leckage- ÜW, emissions- arme Ents.	Dichtheit, Wartung/ Leckage-ÜW, emissions- arme Ents.

Kap.	Funktion Anwendung	F-Gase	Substitutionsmöglichkeiten ¹ Stoffersatz und Ersatzverfahren			weitere Emissionsminderungsmaß- nahmen	
			Altanlagen	Neuanlagen/Produkte		Altanlagen/ Entsorgung	Neuanlagen/ Produkte
				im Einsatz	in Erprobung		
7	Lösemittel	HFKW: 43-10mee, außerhalb Deutschland: diverse		halogenfreie organische und wässrige Lösemittel, HFE, keine Reinigung, lösemittelfreie Reinigung		technische Maßnahmen	technische Maßnahmen
8	Ätzgas						
8.1	Halbleiterindustrie	SF ₆ FKW HFKW	(NF ₃)	div. Stoffe in Abhängigkeit vom Prozess, z. B. NF ₃ ,	div. Stoffe in Abhängigkeit vom Prozess, z. B. C ₄ F ₈ O	Abgasreinigung, Prozessoptimie- rung, (Recycling)	Prozessopti- mierung, (Recycling), Abgasrei- nigung
8.2	Leiterplattenherstellung	FKW		(nasschemische verfahren), Laser		Abgasreinigung, Prozessoptimie- rung, (Recycling)	Abgasreini- gung, Prozessopti- mierung, (Recycling)
9	Lösch- und Isoliergas						
9.1	Schaltanlagen 110-380 kV	SF ₆		Luft	Vakuum (<80 kV, theoretisch denkbar bis max. 145 kV)	Wartung/ Leckage- ÜW, emissions- arme Ents.	Hermetisierg. /Dichtheit, Wartung/ Leckage-ÜW, emissions- arme Ents.
9.2	Schaltanlagen > 1-36 kV	SF ₆		Luft, Vakuum			
10	Schutzgas						
10.1	Magnesiumverarbeitung	SF ₆ (teilweise verboten) HFKW: 134a	SO ₂	SO ₂ , 134a als Substitut für SF ₆ , Fluorketon	CO ₂	Prozessoptimie- rung	Prozessopti- mierung
10	Reinigungsgas						

¹ Abkürzungen der Kohlenwasserstoffe: 600a: iso-Butan; 290: Propan; 1270: Propen
Sonstige Abkürzungen: TK: Tiefkühlung; NK: Normalkühlung; ÜW: Überwachung; Ents.: Entsorgung; Dichtheit: Verbesserung der Dichtheit durch technische Maßnahmen

Kap.	Funktion Anwendung	F-Gase	Substitutionsmöglichkeiten ¹ Stoffersatz und Ersatzverfahren			weitere Emissionsminderungsmaß- nahmen	
			Altanlagen	Neuanlagen/Produkte		Altanlagen/ Entsorgung	Neuanlagen/ Produkte
				im Einsatz	in Erprobung		
10.2	Sekundäraluminiumguss	SF ₆	Inertgase + elem. Halogene	Inertgase + elem. Halogene			
11, 13	Füllgas						
13	Autoreifen	SF ₆ (verboten)		Luft, N ₂			
11	Isolierverglasungen	SF ₆ (verboten)		geänderte Glasaufbauten		(emissionsarme Ents.)	
12	Lecksuch- und Tracergas	SF ₆ FKW		He, N ₂ /H ₂ , Ar			
14	Dämpfungsgas						
14	Schuhe	SF ₆ , FKW (verboten)		Luft, N ₂			

16 Abkürzungen

Verwendete Abkürzung	Bedeutung (deutsch)	Bedeutung (englisch)
AFEAS		Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study
AG	Aktiengesellschaft	
ATP	s. Glossar	
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle	
BImSchG	Bundesim missionsschutzgesetz	
BImSchV	Bundesim missionsschutzverordnung	
BMU	Bundes ministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit	
BWP	Bundes verband Wärmepumpe e.V.	
CH ₄	Methan	
CKW	Chlorkohlenwasserstoffe	
CO ₂	Kohlendioxid	
COP		coefficient of performance
COPD		chronic obstructive pulmonary disease
CVD		Chemical Vapour Deposition
DB AG	Deutsche Bahn Aktiengesellschaft	
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt	
DDR	Deutsche Demokratische Republik	
DEC		Desiccative and Evaporative Cooling
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.	
DIY	Do-it-Yourself	
DKV	Deutscher Kälte- und	

Verwendete Abkürzung	Bedeutung (deutsch)	Bedeutung (englisch)
	Klimatechnischer Verein e.V.	
DME	Dimethylether	
DPI	Pulverinhalator	Dry-Powder-Inhaler
DTI		Danish Technological Institute
ECCP	European Climate Change Programme	Europäisches Klimaschutzprogramm
Ents.	Entsorgung	
EOP		End-of-pipe
EPA		Environmental Protection Agency
EPS	Expandiertes Polystyrol	
EU	Europäische Union	European Union
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe	
F-Gase	Fluorierte Gase (HFKW, FKW, SF ₆)	
FKW	fluorierte Kohlenwasserstoffe	
GD	Generaldirektion	
GDI	Gesamtverband Dämmstoffindustrie	
GIS	gasisolierte Schaltanlage	Gas Insulated Switchgear
GWP	Treibhauspotenzial	Global Warming Potential
GTZ	Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit	
HF	Fluorwasserstoff	
HFCKW	teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe	
HFE	Hydrofluorether	
HFKW	teilfluorierte Kohlenwasserstoffe	Hydrofluorocarbons (HFCs)
HFO	Hydrofluorolefin	
HS	Hochspannung	

Verwendete Abkürzung	Bedeutung (deutsch)	Bedeutung (englisch)
IMO		International Maritime Organization
IPCC		Intergovernmental Panel on Climate Change
IVPU	Industrieverband Polyurethan-Hartschaum e.V.	
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt	
KFOR		Kosovo Force
KOM	Europäische Kommission	European Commission (COM)
KRK	Klimarahmenkonvention	(United Nations) Framework Convention on Climate Change
KW	Kohlenwasserstoffe	
LBO	Landesbauordnung	
LCA	Ökobilanz	Life Cycle Assessment
Lkw	Lastkraftwagen	
MAC		Mobile Air Condition
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration	
MBO	Musterbauordnung	
MDI	Dosieraerosol, Asthmaspray	Metered Dose Inhaler
Mio.	Millionen	
MS	Mittelspannung	
N ₂	Stickstoff	
N ₂ O	Distickstoffoxid, Lachgas	
NF ₃	Stickstofftrifluorid	
NH ₃	Ammoniak	
NK	Normalkühlung	
NMVOC	flüchtige organische Verbindungen, die kein Methan enthalten	Non-Methane Volatile Organic Compounds

Verwendete Abkürzung	Bedeutung (deutsch)	Bedeutung (englisch)
n-PB	n-Propylbromid	
NS	Niederspannung	
ODP	Ozonabbaupotenzial	Ozone Depleting Potential
ODS	ozonschichtzerstörende Stoffe	Ozone Depleting Substances
ORC	Organischer Rankine Kreisprozess	Organic Rankine Cycle
P.D.R.	Produkte Durch Recycling	
PIR	Polyisocyanurat	
Pkw	Personenkraftwagen	
POU		Point of use
ppb		parts per billion
ppm		parts per million
ppt		parts per trillion
PUR	Polyurethan	
$\dot{Q}$	Wärmestrom	
R (z. B. R 404A)	Kältemittel	Refrigerant
RAL	Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V. – früher: Reichsausschuß für Lieferbedingungen	
RIM	Reaction Injection Moulding	
RMU	Lasttrennschalteranlage (Ortsnetzstation / Trafostation)	Ring Main Unit
RRIM		Reinforced Reaction Injection Moulding
SEMATECH		Semiconductor Manufacturing Technology
SF ₆	Schwefelhexafluorid	
SNAP		Significant New Alternatives

Verwendete Abkürzung	Bedeutung (deutsch)	Bedeutung (englisch)
		Policy Program
SO ₂	Schwefeldioxid	
SRIM		Structural Reaction Injection Moulding
TEAP		Technology and Economic Assessment Panel
TEWI		Total Equivalent Warming Impact
TFA	Trifluoressigsäure	Trifluoroacetic acid
TK	Tiefkühlung	
UBA	Umweltbundesamt	
ÜGPU	Überwachungsgemeinschaft Polyurethan-Hartschaum e.V.	
USA	Vereinigte Staaten von Amerika	United States of America
UNEP		United Nations Environment Programme
ÜW	Überwachung	
UZ	Umweltzeichen	
VDA	Verband der Automobilindustrie e.V.	
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik e.V.	
VDEW	Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke e.V.	
VDKL	Verband Deutscher Kühllhäuser und Kühllogistikunternehmen e.V.	
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.	
VOC	flüchtige organische Verbindungen	Volatile Organic Compounds
VSK	Vertragsstaatenkonferenz	Conference of the Parties

Verwendete Abkürzung	Bedeutung (deutsch)	Bedeutung (englisch)
W	Arbeit	Work
WLG	Wärmeleitfähigkeitsgruppe	
WMO		World Meteorological Organization
WSC		World Semiconductor Council
XPS	extrudiertes Polystyrol	
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V.	

17 Glossar

Begriff	Erläuterung
A+, A++	Energieeffizienzklassen
ATP-Abkommen	Abkommen über internationale Beförderungen leicht verderblicher Lebensmittel und über die besonderen Beförderungsmittel, die für diese Beförderungen zu verwenden sind. Siehe http://www.tuev-sued.de/anlagen_bau_industrietechnik/technikfelder/elektro-_und_gebaeudetechnik/kaelte-_klimatechnik_atp-pruefstelle .
azeotrope Kältemittel	Azeotrope Kältemittel verdampfen und verflüssigen sich bei konstanter Temperatur. Der Siedepunkt einer azeotropen Mischung (Blend) liegt entweder über dem höchsten oder unter dem niedrigsten Siedepunkt der Einzelkomponenten.
Blends	Mischungen verschiedener Kältemittel.
Brennbarkeit	Der Begriff Brennbarkeit bezieht sich auf das Brennverhalten nach eingetretener Entzündung, insbesondere auf die Brenngeschwindigkeit und Intensität. Man unterscheidet schwer-, normal-, leicht brennbare Stoffe.
COP	Der Coefficient of Performance = COP (Leistungszahl) ist das Verhältnis der Heiz/Kälteleistung (Nutzen) zur effektiven Leistungsaufnahme (Aufwand). Der COP hängt primär von den Temperaturen im Verdampfer und Verflüssiger ab. Je kleiner die Temperaturunterschiede, desto größer ist der COP.
Drop-in Kältemittel	Drop-in Kältemittel erlauben eine Umstellung bestehender Anlagen ohne Komponenten- und Ölwechsel. Der Begriff drop-in wird vereinzelt auf andere Anwendungen übertragen.
Einkreisanlage, -system, Direktverdampfungs-system, -anlage	Bei diesen Systemen wird die Kälte vom Kältemittel direkt an die Kühlstellen abgegeben.
Emissionsrate	Bezogen auf die Gesamtfüllmenge und auf ein Jahr berechneter Emissionsanteil, einschließlich herstellungsbedingter, regulärer Emissionen und Havarie-bedingter Emissionen.

Begriff	Erläuterung
End-of-pipe Verfahren	End-of-pipe Verfahren sind solche, die Umweltbelastungen durch am „Ende des Schornsteins“ ansetzende Verfahren vermindern. Das heißt, unerwünschte Stoffe entstehen zunächst und werden erst dann durch Auffangen, Umwandeln etc. aus dem Abgas, dem Abwasser etc. entfernt oder unschädlich gemacht. Klassische end-of-pipe Verfahren sind Rauchgas-Reinigungsanlagen, nachgeschaltete Waschverfahren oder der Katalysator. Den end-of-pipe Verfahren stehen Verfahren gegenüber, die durch ihre Technik erst gar keine oder kaum Schadstoffe freisetzen.
Entzündbarkeit	Ein brennbarer Stoff ist umso leichter entzündbar, je weniger Energie (Zündwärme) zum Erreichen seiner Zündtemperaturerforderlich ist.
Exergie	Energie = Exergie + Anergie Der Exergieanteil bezeichnet den Anteil der Energie, der uneingeschränkt in Arbeit umgewandelt werden kann. Der Exergie-Begriff ist erforderlich, um Energieformen im Hinblick auf ihre praktische Nutzung bewerten zu können. So haben beispielsweise Strom und Wärme eine unterschiedliche Energie-Qualität: Der Exergie-Gehalt von Wärme ist relativ gering, da er vom thermodynamischen Wirkungsgrad begrenzt wird. Strom besteht hingegen zu hundert Prozent aus Exergie.
Explosionsgrenze	Untere und obere Explosionsgrenze ist die niedrigste und höchste Konzentration des brennbaren Stoffes im Gemisch von Gasen, Dämpfen, Nebeln und / oder Stäuben, in dem sich nach dem Zünden ein Brennen gerade nicht mehr selbständig fortpflanzen kann.
F-Gase-Verordnung	Verordnung (EG) Nr. 842/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über bestimmte fluorierte Treibhausgase
Flammschutzmittel	Zur Stoffgruppe der Flammschutzmittel zählt eine Vielzahl von verschiedenen chemischen Verbindungen. Am häufigsten werden polybromierte Biphenyle (PBB), polybromierte Diphenylether (PBDE), Tetrabrombisphenol-A (TBBA), Chlorparaffine und Antimontrioxid eingesetzt. Flammschutzmittel sollen die Entzündbarkeit brennbarer Stoffe herabsetzen, eine Flambildung verhindern oder einen Brand verzögern. Hauptanwendungsgebiete sind die Bereiche Holz,

Begriff	Erläuterung
	Holzwerkstoffe, Kunststoffe und Textilien. Einige der verwendeten Flammschutzmittel besitzen erhebliche toxikologisch und ökotoxikologisch bedenkliche Eigenschaften.
GWP ₁₀₀	Treibhauspotenzial eines Stoffes bezogen auf einen Zeithorizont von 100 Jahren.
Halone	Halone sind organische Verbindungen, die sich von Methan und Ethan ableiten und Brom im Molekül enthalten. Halone wurden in Handfeuerlöschern und stationären Löschanlagen als Löschmittel eingesetzt. Halone gehören wie Fluorchlorkohlenwasserstoffe zu den die Ozonschicht zerstörenden Substanzen, wobei Halone ein 1 bis 10 mal höheres Zerstörungspotenzial besitzen.
Inergen®	Inergen® ist ein patentiertes Löschmittel, welches aus Stickstoff (52 Vol.-%), Argon (40 Vol.-%) und Kohlendioxid (8 Vol.-%) hergestellt wird.
inert / Inertgas	Der Begriff „inert“ bedeutet untätig, unbeteiligt. Entsprechend werden unter Inertgasen reaktionsträge Gase verstanden, die sich an chemischen Vorgängen nicht/kaum beteiligen. Fast alle Edelgase zählen zu den Inertgasen. Inertgase werden z. B. als Feuerlöschmittel eingesetzt. Inertgaslöschanlagen arbeiten durch Sauerstoffentzug. Dadurch wird das Feuer im Keim erstickt. Sie löschen vollkommen rückstandsfrei und eignen sich besonders für den Schutz hochwertiger Güter/Technik.
Kälteanlage/Wärmepumpe	Kälteanlagen (und Wärmepumpen) arbeiten mit Kältemitteln, die sich (meist) in einem geschlossenen Kreislauf bewegen. Die Kälte wird durch die Verdampfung des flüssigen Kältemittels erzeugt. Durch Druckerhöhung und anschließende Abkühlung wird das Gas wieder verflüssigt und Wärme erzeugt. Anlagen, die vorwiegend der Kälteerzeugung dienen, werden als Kälteanlage, Anlagen, die vorwiegend der Wärmeerzeugung dienen, werden als Wärmepumpen bezeichnet.

Begriff	Erläuterung
Kaskade	Bei Kaskadenschaltungen sind zwei oder mehrere in sich geschlossene einfache Kälteanlagen miteinander gekoppelt. Es erfolgt eine Wärmeübertragung zwischen dem Verflüssiger des einen Kreislaufes und dem Verdampfer des anderen Kreislaufes. Vorteilhaft gegenüber einer zweistufigen Kälteanlage ist, dass jeder Kreislauf mit einem anderen an die entsprechenden Temperaturbedingungen angepassten Kältemittel betrieben werden kann.
Klasse M1	Fahrzeuge zur Personenbeförderung mit höchstens 8 Sitzplätzen außer dem Fahrersitz.
Klasse N1	Fahrzeuge zur Güterbeförderung mit einer zulässigen Gesamtmasse bis zu 3,5 t.
Klimarahmenkonvention (KRK)	Die Klimarahmenkonvention wurde auf dem Weltgipfel für Umwelt und Entwicklung 1992 in Rio de Janeiro angenommen und seither von 186 Staaten ratifiziert. Sie trat 1994 in Kraft. Die Konvention bildet den Rahmen für die Klimaschutz-Verhandlungen, die jeweils als Vertragsstaatenkonferenz (VSK) der Konvention stattfinden. Das Sekretariat der Klimarahmenkonvention (UNFCCC-Sekretariat) hat seinen Sitz in Bonn.
Kyoto-Protokoll	Das Kyoto-Protokoll wurde 1997 von der 3. Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention angenommen. In dem Protokoll verpflichten sich die Industriestaaten, ihre gemeinsamen Emissionen der wichtigsten Treibhausgase im Zeitraum 2008 bis 2012 um mindestens 5% unter das Niveau von 1990 zu senken. Dabei haben die Länder unterschiedliche Emissionsreduktionsverpflichtungen akzeptiert. Deutschland hat gemeinsam mit den anderen EU-Mitgliedstaaten das Protokoll im Mai 2002 ratifiziert.
Leckagerate	Bezogen auf die Gesamtfüllmenge pro Jahr emittierender Anteil (= reguläre Emissionen)
MARPOL	Internationales Übereinkommen zur Verhütung der Meeresverschmutzung durch Schiffe aus den Jahren 1973/78.
Mesosphäre	Die Mesosphäre ist die Schicht oberhalb der Stratosphäre und befindet sich in der Höhe von ca. 50 bis ca. 80 km.

Begriff	Erläuterung
Montrealer Protokoll	Das Montrealer Protokoll über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen ist das wichtigste internationale Instrument zum Schutz der Ozonschicht. Es wurde im September 1987 von 25 Regierungen und der Kommission der Europäischen Gemeinschaft unterzeichnet und in London (Juni 1990), Kopenhagen (November 1992), Wien (Dezember 1995), Montreal (September 1997) und Peking (1999) verschärft und durch weitere Maßnahmen ergänzt. Siehe www.unep.org/ozone/.
NMVOC	NMVOC sind flüchtige organische Verbindungen (VOC) außer Methan (das wegen abweichenden Eigenschaften gesondert betrachtet wird)
off-shore Anlage	Anlage, die vor der Küste (auf See) erbaut ist.
OH-Radikale	OH-Radikale bilden sich in der Atmosphäre nach Photolyse von Ozon durch Reaktion des entstandenen O-Atoms mit H ₂ O ($O + H_2O \rightarrow 2 OH$). Die OH-Radikale haben großes Bestreben zur Rückbildung von H ₂ O und reagieren daher mit H-haltigen Verbindungen
Plasma	Ein Plasma ist ein vollständig oder teilweise ionisiertes, elektrisch leitfähiges Gas. Es unterscheidet sich in seinen Eigenschaften deutlich von Gasen, Flüssigkeiten oder festen Körpern. Gas aus Elektronen und Ionen. Der Name Plasma geht auf Irving Langmuir (1928) zurück.
Plasmaätzen	Es handelt sich um ein Trockenätzverfahren, bei dem reaktive Atome oder Ionen (z. B. Fluor) in einer (meistens mit Hochfrequenz betriebenen) Gasentladung erzeugt werden, die dann Strukturen in ein Substrat ätzen.
Plasmaprozesse, -technologien	Sammelbegriff für eine Reihe von industriellen Anwendungen von Plasmaverfahren. Hierzu gehören neben dem Ätzen in der Halbleiter- und Leiterplattenproduktion auch das Abscheiden von Silizium für Solarzellen oder das Schmelzen und Schweißen mit Lichtbögen.
ppb	parts per billion / Mischungsverhältnis von 1 : 10 ⁹
ppm	parts per million / Mischungsverhältnis von 1 : 10 ⁶
ppt	parts per trillion / Mischungsverhältnis von 1 : 10 ¹²
R 404A	Gemisch aus R 125/143a/134a im Mischungsverhältnis 44:52:4

Begriff	Erläuterung
R 407C	Gemisch aus R 32/125/134a im Mischungsverhältnis 23:25:52
R 410A	Gemisch aus R 32/125 im Mischungsverhältnis 50:50
R 413A	Gemisch aus R 134a/218/600a
R 417A	Gemisch aus R 125/134a/600 im Mischungsverhältnis 46.6:50:3.4
R 437A	Gemisch aus R 125/134a/600/601 im Mischungsverhältnis 19.5:78.5:1.4:0.6
R 507	Gemisch aus R 125/143a im Mischungsverhältnis 50:50
Retrofit	Bei einem Retrofit wird ein neues Kältemittel in einer bestehenden Anlage eingesetzt. Im Gegensatz zum drop-in erfordert diese Umstellung mehrmalige Ölwechsel und teilweise einen Anlagenumbau und somit höhere Personal- und Ölkosten.
Stratosphäre	Die Stratosphäre ist die Schicht oberhalb der Troposphäre (bis 12 km) und reicht bis in eine Höhe von ca. 50 km.
transkritisch	Wegen der niedrigen kritischen Temperatur von R-744 (CO ₂) von 31,1 °C treten bei Anlagen mit diesem Kältemittel oft transkritische Betriebsweisen auf. Überkritisches CO ₂ (auch superkritisches Kohlendioxid) ist CO ₂ in einem fluiden Zustand über seiner kritischen Temperatur und seinem kritischen Druck. In Kälteanlagen findet die Wärmeabgabe oberhalb der kritischen Temperatur dann im superkritischen (überkritischen) Bereich statt, was einen höheren Systemdruck im Vergleich mit konventionellen Anlagen zur Folge hat. Ein solcher einstufiger Kreisprozess wird als transkritischer Prozess bezeichnet.
Troposphäre	Die Troposphäre ist die untere Atmosphäre bis ca. 12 km Höhe.
Wafer	Als Wafer bezeichnet man die aus einem gezogenen Silizium-Einkristall gesägten und polierten Scheiben, die das Ausgangsmaterial für die Chipherstellung bilden.
zeotrope Kältemittel	Zeotrope Kältemittel verdampfen und verflüssigen in einem bestimmten Temperaturbereich. Dieser Bereich wird als „Gleit“ bezeichnet.

Begriff	Erläuterung
Zweikreisanlage, Zweikreisystem, indirektes System, Solesystem	Bei diesen Systemen wird die Kälte über einen Kälte­träger (z. B. Sole, CO ₂), also indirekt, an die Kühlstellen abgegeben.