

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungsbericht 201 64 315
UBA-FB 000673



**Risiken und Nutzen von
fluorierten Treibhausgasen in
Techniken und Produkten –
Bewertung technischer
Fallbeispiele unter besonderer
Berücksichtigung der
stoffintrinsischen Eigenschaften**

von

**Dr. Jochen Harnisch, Dipl.-Phys. Niklas Höhne,
Dipl.-Ing. Matthias Koch, Dipl.-W.-Ing. Sina Wartmann**

Ecofys GmbH, Köln & Nürnberg

Dr. Winfried Schwarz

Öko-Recherche GmbH, Frankfurt

Dr. Wolfgang Jenseit, Dipl.-Ing. Ulrike Rheinberger

Öko-Institut e.V., Darmstadt & Berlin

Prof. Dr. Peter Fabian

TU München, Lehrstuhl für Bioklimatologie und
Immissionsforschung

Dr. Armin Jordan

Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Diese Publikation ist auch als Download unter
<http://www.umweltbundesamt.de>
verfügbar.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr
für die Richtigkeit, die Genauigkeit und
Vollständigkeit der Angaben sowie für
die Beachtung privater Rechte Dritter.
Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 33 00 22
14191 Berlin
Tel.: 030/8903-0
Telex: 183 756
Telefax: 030/8903 2285
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet III 1.4
Katja Schwaab

Berlin, Juni 2004

Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB Z 1.6 – 50 422/195	2.	3.
4. Titel des Berichts Risiken und Nutzen von fluorierten Treibhausgasen in Techniken und Produkten unter besonderer Berücksichtigung der stoffintrinsischen Eigenschaften		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Harnisch, Jochen; Schwarz, Winfried; Fabian, Peter; Höhne, Niklas; Jenseit, Wolfgang; Jordan, Armin; Koch, Matthias; Rheinberger, Ulrike; Wartmann, Sina		8. Abschlussdatum 15.12.2003
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) ECOFYS GmbH Eupener Straße 59 50933 Cologne Germany Tel. +49 221 510 907 0		9. Veröffentlichungsdatum 31.12.2003
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt Postfach 33 00 22 D-14191 Berlin		10. UFOPLAN-Nr. 201 64 315
		11. Seitenzahl 136
		12. Literaturangaben 145
		13. Tabellen und Diagramme 44 + 0
		14. Abbildungen 44
15. Zusätzliche Angaben -/-		
16. Kurzfassung Die Studie charakterisiert das vom Einsatz fluorierter Treibhausgase ausgehende Risiko nach aktuellem Forschungsstand und wägt es gegen den Nutzen der Substanzen in exemplarisch ausgewählten Anwendungen ab. Diese Studie kommt zu dem Ergebnis, dass als stoffintrinsische Eigenschaften der untersuchten fluorierten Substanzen insbesondere ihre Klimawirksamkeit und ihre Persistenz negativ hervorstechen. Auf der Positivseite wurden ihre i.d.R. gering ausgeprägte Toxizität und Entflammbarkeit identifiziert. Im Rahmen der in dieser Studie untersuchten Anwendungsbeispielen (PU-Dachdämmplatten, PU-Dämmung im Kühlaufleger und Supermarkt-Verbundkälte) aber auch anderer einschlägiger Analysen zeigt sich, dass bereits heute in vielen früher den FCKW angestammten Anwendungen für fluorierte Treibhausgase die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu neuen Alternativtechnologien nicht oder nur marginal gegeben ist, dass es ebenso weiterhin Anwendungsfälle gibt, in denen fluorierte Treibhausgase gegenüber Alternativsubstanzen deutliche Wirtschaftlichkeitsvorteile aufweisen. Beim Vergleich und der Bewertung technischer Systeme, in denen fluorierte Treibhausgase und entsprechende Alternativstoffe zur Anwendung kommen, zeigt sich eine erhebliche Dynamik, mit der sich technische Eigenschaften und Kostendaten verändern und sich das Portfolio verfügbarer Technologien erweitert.		
17. Schlagwörter Schwefelhexafluorid (SF ₆); Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW); Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC), Emissionen fluorierter Verbindungen in Deutschland, fluorierte Treibhausgase, Risikobewertung		
18. Preis	19.	20.

Report Cover Sheet

1. Report No. UBA-FB Z 1.6 – 50 422/195	2.	3.
4. Report Title Risks and Benefits of fluorinated Greenhouse Gases in Techniques and Products under Special Consideration of the Properties Intrinsic to the Substance		
5. Autor(s), Family Name(s), First Name(s) Harnisch, Jochen; Schwarz, Winfried; Fabian, Peter; Höhne, Niklas; Jenseit, Wolfgang; Jordan, Armin; Koch, Matthias Rheinberger, Ulrike; Wartmann, Sina	8. Report Date 15.12.2003	
6. Performing Organisation (Name, Address) ECOFYS GmbH Eupener Strasse 59 50933 Cologne Germany Tel. +49 221 510 907 0	9. Publication Date 31.12.2003	
	10. UFOPLAN-Ref. No. 201 64 315	
	11. No. of Pages 136	
	12. No. of Reference 145	
7. Sponsoring Agency (Name, Address) Umweltbundesamt (Federal Environmental Agency) Postfach 33 00 22 D-14191 Berlin Germany	13. No. of Tables, Diagrams 44, 0	
	14. No. of Figures 44	
	15. Supplementary Notes -/-	
16. Abstract This study characterises the risk emanating from the application of fluorinated GHG in greater detail and weighs this against the benefit of the substances in example applications. This study comes to the conclusion that especially effects on climate and persistence stand out as negative properties intrinsic to the examined fluorinated substances. On the positive side, their generally low direct toxicity and their very low specific contribution to the formation of photosmog were identified. In the exemplary applications examined in the study (PU-insulation panels, PU insulation in refrigerated vehicles and interconnected supermarket refrigeration systems) but also in other relevant analyses it became clear that already today the use of fluorinated GHG in applications earlier being the domain of CFC is not or only marginally economical in comparison to new alternative technologies. In the comparison and evaluation of technical systems in which fluorinated GHG and relevant alternative substances are applied, a significant dynamic can be observed in the changes of technical properties and cost data as well as in the widening of the portfolio of technologies available.		
17. Keywords Sulfur hexafluoride (SF ₆); fluorinated hydrocarbons (HFC); perfluorinated hydrocarbons (PFC), emissions of fluorinated compounds in Germany, fluorinated greenhouse-gases, risk assessment		
18. Price	19.	20.

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	I
1 ZIEL DER STUDIE	I
2 METHODIK	II
3 HERSTELLUNG, ANWENDUNG UND ENTSORGUNG.....	III
4 FLUORIERTE TREIBHAUSGASE IN DER UMWELT	VI
5 ANWENDUNGSBEISPIELE	VII
6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	XI
1 EINLEITUNG	1
2 ABLEITUNG DES BEWERTUNGSANSATZES	3
2.1 FRAGESTELLUNG	3
2.2 HINTERGRUND	3
2.3 LEITBILDER EINER NACHHALTIGEN STOFFPOLITIK	4
2.3.1 <i>Das Vorsorgeprinzip</i>	6
2.3.2 <i>Risiko und Unsicherheit</i>	7
2.4 VORGEHENSWEISE ZUR RISIKOEINSCHÄTZUNG IN DIESER STUDIE	7
2.4.1 <i>Gewichtung</i>	10
3 HERSTELLUNG, ANWENDUNG UND ENTSORGUNG.....	11
3.1 LEBENSWEG.....	11
3.1.1 <i>Überblick:</i>	11
3.1.2 <i>Anwendung</i>	12
3.1.3 <i>Herstellung</i>	14
3.1.4 <i>Entsorgung</i>	17
3.2 EMISSIONSPROGNOSE	17
3.3 ZUSAMMENFASSUNG	21
4 FLUORIERTE TREIBHAUSGASE IN DER UMWELT	23
4.1 ABBAU IN DER ATMOSPHERE	23
4.1.1 <i>Hauptabbauwege</i>	23
4.1.2 <i>Verbleib der Abbauprodukte</i>	28
4.2 WIRKUNGSKATEGORIEN „UMWELT“	31
4.2.1 <i>Treibhauseffekt</i>	31
4.2.2 <i>Stratosphärischer Ozonabbau</i>	32
4.2.3 <i>Photochemische Oxidantienbildung</i>	34
4.2.4 <i>Umwelttoxizität</i>	35
4.2.5 <i>Versauerung</i>	37
4.2.6 <i>Eutrophierung</i>	37
4.2.7 <i>Naturraumbeanspruchung, Lärm und Emission radioaktiver Isotope</i>	37
4.3 WIRKUNGSKATEGORIEN „MENSCH“	38
4.3.1 <i>Humantoxizität</i>	38
4.3.2 <i>Entflammbarkeit</i>	40
4.4 DATENVERFÜGBARKEIT	40
4.5 SPEZIFISCHE BEITRÄGE	41
4.6 AUSBLICK AUF DIE ANWENDUNGSBEISPIELE	42

5	ANWENDUNG A – PU HARTSCHAUM.....	43
5.1	VORBEMERKUNG ZUR DÄMMWIRKUNG VERSCHIEDENER TREIBMITTEL	43
5.2	DACHDÄMMPLATTEN AUS PU-SCHAUM MIT N-PENTAN UND H-FKW-365MFC.....	44
5.2.1	<i>Vorbemerkung zur Entsorgung</i>	44
5.2.2	<i>Modellierung des Systems: Die alu-kaschierte PU-Dämmplatte als Referenzsystem</i>	45
5.2.3	<i>Die Ausgangsdaten für die Bilanzierung der Dachdämmplatte</i>	46
5.2.4	<i>Bilanz Standardfall für n-Pentan und H-FKW-365mfc.....</i>	50
5.2.5	<i>Sensitivitätsanalyse. CO₂-Bilanz bei Variation verschiedener Parameter.....</i>	52
5.2.6	<i>Zusammenfassung</i>	57
5.3	KÜHLFAHRZEUG-DÄMMUNG MIT C-PENTAN UND H-FKW-365MFC.....	58
5.3.1	<i>Einleitung</i>	58
5.3.2	<i>Ausgangsdaten für die Bilanzierung für Kühlfahrzeuge.....</i>	61
5.3.3	<i>Bilanz Standardfall für Pentan und H-FKW-365 Kühlfahrzeug-Dämmung.....</i>	65
5.3.4	<i>Sensitivitätsanalyse. CO₂-Bilanz bei Variation verschiedener Parameter.....</i>	67
5.3.5	<i>Zusammenfassung</i>	75
5.4	AUSBLICK	77
6	ANWENDUNG B – SUPERMARKTKÜHLUNG (VERBUNDANLAGEN)	78
6.1	EINFÜHRUNG	78
6.1.1	<i>Lebensmitteleinzelhandel</i>	78
6.1.2	<i>Kühlsysteme im Lebensmitteleinzelhandel</i>	79
6.2	KÜHLTECHNIK	82
6.2.1	<i>Kältemittelwahl</i>	82
6.2.2	<i>Modelltechnologien.....</i>	83
6.3	REFERENZMARKT	85
6.4	RELEVANZ DER EMISSIONEN FÜR DEUTSCHLAND.....	87
6.5	MODELLIERUNG	87
6.6	STANDARDFALL.....	88
6.7	SENSITIVITÄTSANALYSE	90
6.8	ZUSAMMENFASSUNG	93
7	ZUSAMMENFASSENDE BEWERTUNG UND DISKUSSION	95
7.1	BEWERTUNGSMATRIX FÜR STOFFINTRINSISCHE EIGENSCHAFTEN	95
7.2	ZUSAMMENFASSUNG: STOFFINTRINSISCHE EIGENSCHAFTEN.....	99
7.3	BEWERTUNG IN DEN ANWENDUNGSBEISPIELEN	99
7.3.1	<i>Anwendungsbeispiele PU-Hartschaum.....</i>	100
7.3.2	<i>Anwendungsbeispiel Supermarktkühlung.....</i>	103
7.3.3	<i>Anwendungsbeispiele: Gewichtung der Wirkungskategorien</i>	107
7.3.4	<i>Übertragbarkeit.....</i>	109
7.4	OFFENE FRAGEN	109
7.5	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	110
8	DANKSAGUNG	113
9	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	114
10	LITERATUR	115
11	ANHANG : HINTERGRUND ZU BEWERTUNGSANSÄTZEN	124
11.1	RISIKOBEWERTUNG	124
11.1.1	<i>Risikobewertung im Rahmen des EU-Chemikalienrechts.....</i>	124
11.1.2	<i>Begriffe: Risiko, Unsicherheit, Unbestimmtheit, Ungewissheit, Nicht-Wissen.....</i>	125
11.1.3	<i>Ansätze einer vorsorgeorientierten Risikobewertung von Stoffen.....</i>	128
11.2	GEWICHTUNG VON WIRKUNGSKATEGORIEN	130

Risiken und Nutzen von fluorierten Treibhausgasen in Techniken und Produkten unter besonderer Berücksichtigung der stoffintrinsischen Eigenschaften

Kurzfassung

1 Ziel der Studie

Fluorierte Treibhausgase finden heute Verwendung in einer Vielzahl technischer Anwendungen. In dieser Stoffgruppe sind neben den in speziellen Anwendungsbereichen eingesetzten Perfluorverbindungen (z.B. CF_4 , C_2F_6 oder SF_6) insbesondere die Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW) mengenmäßig relevant. Die H-FKW stellen den besonderen Schwerpunkt der Studie dar. Sie kommen vor allem als Ersatzstoffe für die wegen ihrer Rolle bei der Zerstörung stratosphärischen Ozons im Rahmen des Montrealer Protokolls international verbotenen Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) zum Einsatz. Seit 1993 wurden verschiedene H-FKW Schritt für Schritt im Rahmen des FCKW-Ausstiegs als Substitute auf den Markt gebracht.

Von Anfang an wurde der Einsatz fluorierter Treibhausgase in der Fachöffentlichkeit kontrovers diskutiert. Es wurde insbesondere befürchtet, dass eine ökologisch problematische Substanzklasse durch die nächste ersetzt würde, ohne dass die spezifischen Probleme ihres Umweltverhaltens richtig eingeschätzt werden könnten.

Es war Ziel des Forschungsvorhabens, das vom Einsatz fluorierter Treibhausgase ausgehende Risiko nach aktuellem Forschungsstand genauer zu charakterisieren und gegen den Nutzen der Substanzen in exemplarisch ausgewählten Anwendungen abzuwägen. Dies schließt Kostenbetrachtungen ein. Das Forschungsprojekt soll damit Entscheidungsträgern in Verwaltung und Wirtschaft Hilfestellung bei der Gestaltung einer langfristigen Produktpolitik in bezug auf die Verwendung von fluorierten Treibhausgasen geben.

Das Vorhaben umfasste folgende Abschnitte:

- Entwicklung einer anwendungsbezogenen Bewertungsmethodik auf der Basis eines Kriterienkataloges
- Übersicht über aktuelle und prognostizierte zukünftige Verwendungsmuster fluorierter Treibhausgase
- Zusammenfassende Diskussion des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstandes zum Umweltverhalten fluorierter Treibhausgase
- Untersuchung ausgewählter Anwendungsbeispiele (Treibmittel in Polyurethan-Hartschäumen sowie Kältemittel in Supermarktkühlungen)
- Schlussfolgerungen für eine vorsorgende Umweltpolitik.

Mit dieser Studie liegt erstmalig eine für private wie öffentliche Entscheidungsträger gleichermaßen relevante Zusammenschau und Diskussion des während der ersten Dekade nach der breiten kommerziellen Einführung fluorierter Treibhausgase akkumulierten wissenschaftlichen und technischen Wissens zu ihrer ökologischen Bedeutung vor. Für die Bewertung wurde ein pragmatischer Ansatz entwickelt, der zwar der Komplexität der

Anwendungsfelder Rechnung trägt, aber zugleich Hilfen in Entscheidungssituation geben kann.

2 Methodik

In dieser Studie sollten die folgenden Fragen untersucht werden:

- Welches sind die umwelt- und gesundheitsbezogenen Risiken, die sich aus dem Einsatz von (H)-FKW unter Berücksichtigung ihrer stoffintrinsischen Eigenschaften ergeben?
- Welche umwelt- und gesundheitsbezogenen Vor- und Nachteile und welche Risiken sind – bei äquivalentem Nutzen – beim Einsatz von H-FKW im Vergleich zu alternativen Substanzen über den Lebensweg hinweg zu erwarten?

Die Studie identifiziert zuerst (Kapitel 2) diejenigen umwelt- und gesundheitsrelevanten Kriterien, denen im Rahmen der Bewertung prioritäre Aufmerksamkeit gewidmet werden soll. Um bei der vergleichenden Bewertung eine Beurteilung von Vor- und Nachteilen in unterschiedlichen Wirkungskategorien zu ermöglichen, sollen Kriterien für eine Gewichtung der relevanten Wirkungskategorien aufgestellt werden.

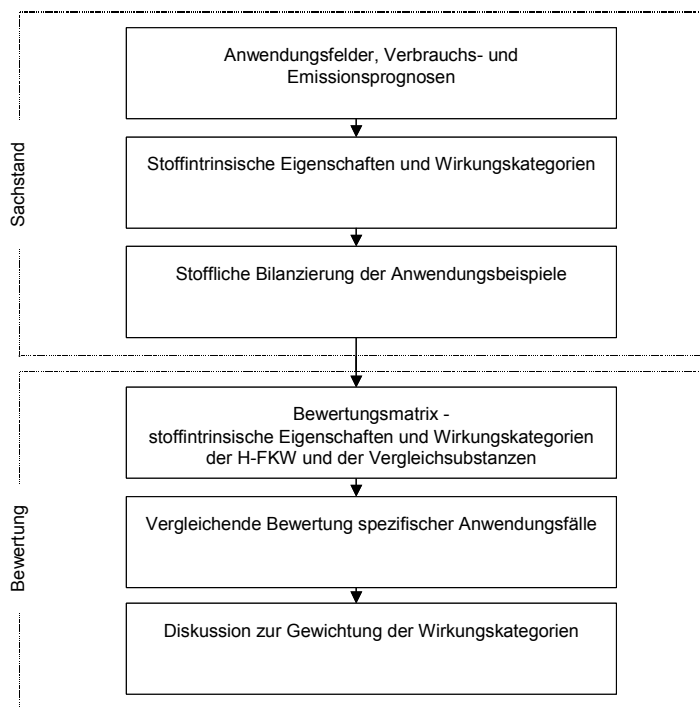


Abbildung 1 Ablaufschema Risikobewertung

Die Bewertung der H-FKW baut auf der Darstellung des Sachstandes zu den stoffintrinsischen Eigenschaften der H-FKW und auf den Ergebnissen der ökologischen Sachbilanz zu ausgewählten Anwendungsfällen auf. Das Ablaufschema der Bewertung ist in Abbildung 1 wiedergegeben.

Nach einer Erläuterung des Bewertungsansatzes werden im anschließenden Kapitel 3 die Anwendungsfelder der H-FKW sowie die aktuellen Schätzungen und Prognosen zu den weltweit eingesetzten Mengen und Emissionen dargestellt und die Herstellung und Entsorgung der H-FKW charakterisiert. Kapitel 4 fasst den Stand des Wissens zu stoffintrinsischen Eigenschaften zusammen.

In den Kapiteln 5 und 6 wird eine vergleichende Bilanzierung gängiger H-FKW-Anwendungen vorgenommen. Die Bilanzierung beschränkt sich dabei auf die Wirkkategorie Klima, deren primäre Relevanz im Kapitel 4 festgestellt wird. Als Anwendungen wurden Polyurethan- (PU)-Hartschäume zur Dachdämmung und zur Dämmung von Kühlfahrzeugen sowie Supermarktkühlungen ausgewählt. In PU-Hartschäumen diente H-FKW-365mfc als Treibmittel (Alternativen: n-Pentan und c-Pentan). In Supermarktkühlanlagen wurde H-FKW-404A als Kältemittel und Kälteüberträger eingesetzt (Alternativen: Propan, Ammoniak und CO₂).

Die eigentliche Bewertung erfolgt in Kapitel 7. Um ein systematisches Verständnis zu erleichtern, wurden die stoffintrinsischen Eigenschaften und Wirkkategorien der hier behandelten H-FKW und der in den Anwendungsbeispielen behandelten Alternativsubstanzen in einer Bewertungsmatrix eingestuft. Die Relevanz der Eigenschaften und Wirkkategorien der Einzelsubstanzen wurden in einem fünfstufigen System als „sehr hoch“, „hoch“, „mittel“, „gering“, „vernachlässigbar“ bewertet. Diese Bewertungsmatrix erlaubt einen Überblick über die wesentlichen Risiken und ermöglicht es, die vergleichende Bewertung auf die relevanten Kriterien zu beschränken.

3 Herstellung, Anwendung und Entsorgung

H-FKW werden über den gesamten Lebensweg von Produkten frei gesetzt:

- während der H-FKW-Produktion
- bei Produktionsprozessen und der Herstellung von Produkten, in denen H-FKW verwendet werden
- während der Nutzung von Produkten
- im Rahmen der Entsorgung von Produkten.

Durch die mögliche Freisetzung über den gesamten Lebensweg von H-FKW-haltigen Produkten hinweg muss eine verzögerte Emission relativ zum Produktionszeitpunkt in Betracht gezogen werden. Dies gilt vor allem bei Produkten mit langen Lebensdauern (z.B. Industriekälte) und hohen Emissionen bei der Entsorgung (z.B. mobile Klimaanlage). Abbildung 2 stellt dar, wie während des mehrjährigen Lebensweges eines H-FKW haltigen Produktes (z.B. eines Haushaltskühlschranks) eine Freisetzung von H-FKW stattfinden kann.

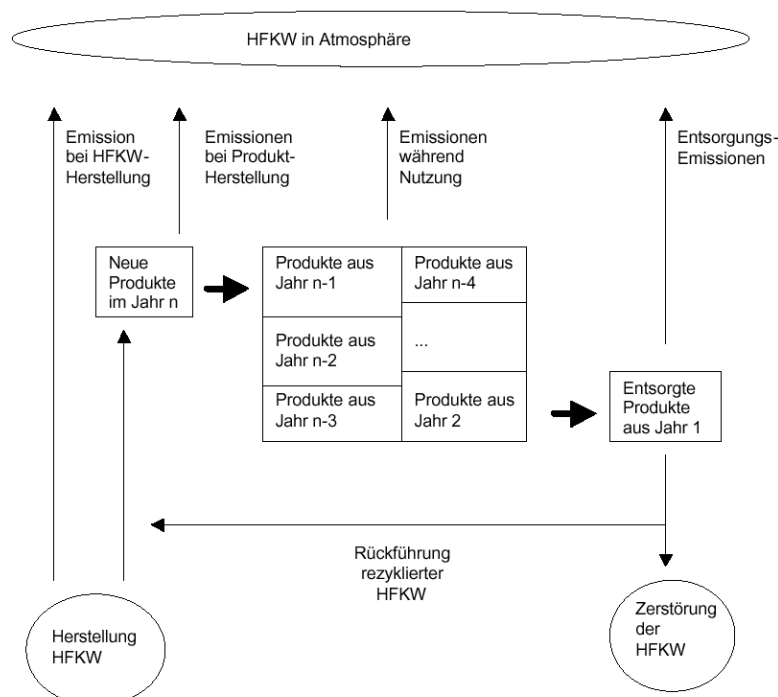


Abbildung 2 H-FKW Emissionen längs des Lebensweges H-FKW-haltiger Produkte. Jahr 1 bezeichnet das erste Jahr der Nutzung, Jahr n den heutigen Zeitpunkt.

Anwendungen:

Fluorierte Treibhausgase werden in der EU hauptsächlich in den folgenden Anwendungsbereichen eingesetzt:

- Kälte- und Klimatechnik
- Treibmittel für Hartschäume
- Lösungsmittel
- Feuerlöschmittel
- Treibmittel für Sprays

Gegenwärtig entfällt der höchste Anteil der Gesamtemissionen auf die Kälte- und Klimatechnik sowie auf Treibmittel für Hartschäume. Der in den Anlagen und Produkten dieser Hauptanwendungen enthaltene H-FKW-Bestand wächst von knapp 200.000 Tonnen in 1996 auf knapp 2 Mio Tonnen bis 2010 und steigt dann auf etwa 4 Mio Tonnen im Jahre 2020.

Verwendung und Emissionen:

Für 2020 kann von einem weltweiten jährlichen Marktvolumen von bis zu 500.000 t fluorierter Treibhausgase ausgegangen werden (vgl. Abbildung 3). Auf Europa entfallen davon maximal 100.000 t. Die Jahresemissionen in die Umwelt können bis zum Jahr 2020 etwa 330.000 Tonnen verschiedener fluorierter Treibhausgase weltweit und etwa 60.000 Tonnen in Europa betragen. Davon würden Fluorkohlenstoffe und SF₆ mengenmäßig etwa 5% ausmachen. Sowohl in der Verwendung als auch auf der Emissionsseite dominieren die H-FKW damit das Gesamtbild. Im weiteren Verlauf konzentriert die Studie sich daher weitgehend auf die H-FKW.

Als Ersatzstoffe für ozonschichtzerstörende Substanzen können fluorierte Treibhausgase in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt werden. Die mengenmäßig bedeutsamsten Anwendungsfälle von Perfluorkohlenstoffen und Schwefelhexafluorid sind die Halbleiterherstellung sowie Schaltanlagen und die Verwendung als Schutzgas bei der Herstellung und Verarbeitung von Magnesium.

In Abschätzungen für die europa- bzw. weltweiten Einsatzmengen von H-FKW, FKW und SF₆ (differenziert nach Einzelanwendungen für die Jahre 2000, 2010 und 2020) fallen die Anwendungen in der Kälte- und Klimatechnik (einschließlich Autoklimaanlagen) sowie die Isolierschäume weitaus am stärksten ins Gewicht. Europaweit ist bis 2020 mit dem höchsten Anstieg im Bereich der Schäume zu rechnen, weltweit im Bereich der Kälte- und Klimatechnik. Diese Differenz ist darauf zurückzuführen, dass weltweit Isolierschäume eine im Vergleich zu kälte- und klimatechnischen Anwendungen geringere Marktbedeutung haben als im klimatisch kühlen Europa.

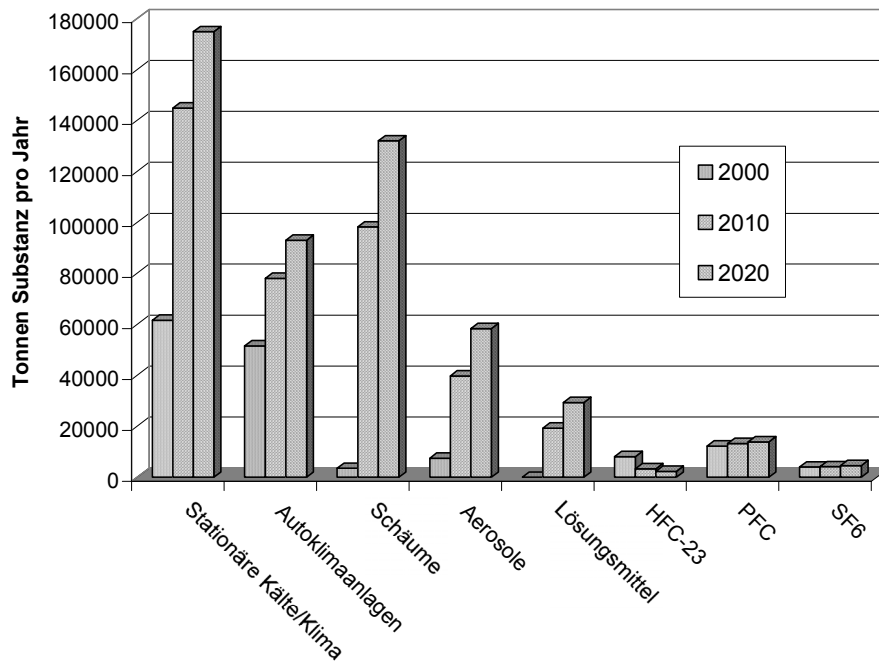


Abbildung 3 Geschätzter weltweiter Einsatz von H-FKW, FKW und SF₆ nach Anwendungsbereichen¹

Produktion:

Fluorierte Treibhausgase werden im allgemeinen über Synthesewege hergestellt, die auf chlorierten Vorläufersubstanzen beruhen. Deren jeweiliger "ökologischer Fußabdruck" (Stichwort: Chlorchemie) einschließlich diffuser Emissionen von halogenierten Zwischen- und Nebenprodukten (inklusive ihrer Beimengung zum Produkt) ist zu beachten. Letztere sind allesamt nur unzulänglich charakterisiert. Der spezifische Energieverbrauch und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen bei der Herstellung von fluorierten Treibhausgasen sind erheblich größer als bei alternativen (halogenfreien) Stoffen.

Entsorgung:

Das Umweltprofil der Entsorgung von H-FKW hängt stark von den jeweiligen Anwendungen ab. Als grundlegende Entsorgungspfade kommen

- das Ablassen in die Umwelt,
- das Absaugen bzw. Extraktion mit anschließender Wiederverwendung, Aufarbeitung oder Vernichtung
- sowie die Entsorgung zusammen mit dem Produkt

in Frage.

Die ökologisch schlechteste Variante stellt das Ablassen dar. Aber auch bei den beiden anderen Varianten besteht die Gefahr, dass H-FKW im Rahmen der Entsorgung in die Atmosphäre entweichen. Auf jeden Fall sollte vermieden werden, dass H-FKW z.B. beim Zerkleinern des Produktes in nennenswertem Umfang in die Umwelt freigesetzt werden. Bei einer thermischen Behandlung von H-FKW-haltigen Abfällen ist eine ordnungsgemäße Abgasbehandlung sicherzustellen, um erhöhte Emissionen von Fluorid in der Abluft zu vermeiden. In den meisten Fällen bestehen diese Entsorgungspfade zur Zeit noch nicht.

¹ Für die Prozessemissionen „HFC-23“ und „PFC“ ist die Anwendung den Emissionen gleichgesetzt.

Emissionsprognose:

Bei Betrachtung des Lebensweges verschiedener Anwendungen zeigt sich, dass die Emissionen während der Herstellung, Verwendung sowie der Entsorgung je nach Anwendung sehr unterschiedlich ausfallen. Den bedeutendsten Anteil macht in den meisten Fällen die Emission während der Anwendung aus.

Prognosedaten für die weltweiten H-FKW-Emissionen in den Jahren 2010 und 2020 finden sich in Abbildung 4. Während Emissionsprognosen für Deutschland und Europa (hier nicht dargestellt) zeigen, dass bei einzelnen Anwendungen für 2020 ein Maximum der Emissionen zu erwarten ist, da die Substitution von ozongefährdenden Substanzen dann weitgehend abgeschlossen sein wird, die spezifischen Emissionsraten aufgrund verbesserter Technik absinken und das Wachstum der Anwendungen so langsam ist, dass diese Gewinne nicht aufgezehrt werden, ergibt sich weltweit ein anderes Bild: Es sind ein stärkeres Anwachsen des H-FKW-Bestandes in den Hauptanwendungsbereichen und ein Anstieg der Emissionen bis weit über das Jahr 2020 hinaus zu erwarten.

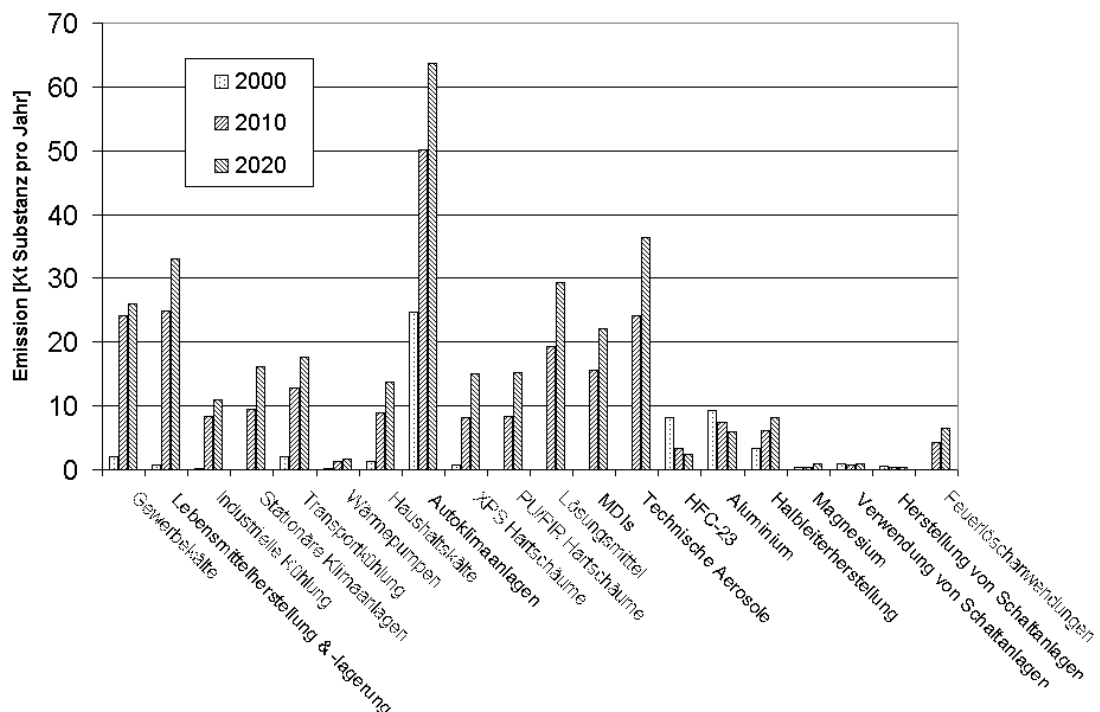


Abbildung 4 Emissionsprognosen weltweit für H-FKW, FKW und SF₆ nach Anwendungsbereichen

4 Fluorierte Treibhausgase in der Umwelt

Die Wirkungskategorien Treibhauseffekt, Ozonzerstörung, Ozonbildung, Umwelttoxizität und Humantoxizität, Versauerung und Eutrophierung wurden im Hinblick auf die Identifizierung besonders aussagekräftiger Wirkungskategorien vertieft betrachtet. Insgesamt werden bei den betrachteten fluorierten Substanzen ihr hohes Treibhauspotenzial (aufgrund ihres ausgeprägten Strahlungs-Absorptionsvermögens und ihrer Langlebigkeit in der Atmosphäre) sowie ihre Persistenz und hohe Reichweite als besonders problematische stoffintrinsic Eigenschaften hervorgehoben. Hierbei dominiert der Beitrag zum Klimawandel. Deshalb werden in den folgenden Kapiteln 5 und 6 ausgewählte Anwendungsbeispiele auf ihren Beitrag zum Treibhauseffekt hin untersucht. Die Vorgehensweise lehnt sich an die in der internationalen Literatur als „Lifecycle Climate

Performance (LCCP)“ verbreitete Betrachtung an, die auf den Klimaschutz fokussiert ist und verschiedene technologische Alternativen unter Einbeziehung der Emissionen über ihren Lebensweg (Herstellung, Verwendung und Entsorgung) vergleicht. Die Anwendungsbeispiele wurden dabei so ausgewählt, dass sie jeweils ein für Europa emissionsseitig bedeutendes Anwendungsbeispiel mit markanten technischen Eigenschaftsmerkmalen abdecken.

5 Anwendungsbeispiele

Anwendung A – PU Hartschaum: Dachdämmung

Bau-Dämmplatten aus PU-Hartschaum werden zunehmend zur Steildach-Dämmung in Wohngebäuden (Neu- und Altbau) eingesetzt. Zur Schäumung wird hauptsächlich n-Pentan verwendet, das seit 1995 FCKW-11 als Treibmittel abgelöst hat. Bei diesem Anwendungsbeispiel werden die Auswirkungen des Einsatzes von H-FKW-365mfc anstelle des Kohlenwasserstoffes n-Pentan untersucht. Im Kern geht es dabei um den ökologischen Vergleich zwischen geringeren Wärmeverlusten durch ein PU-gedämmtes Dach hindurch und höheren Emissionen des zur Schaumherstellung eingesetzten Treibmittels. Hierbei wurden für einen Standardfall bzgl. Schaumdicke, Heizbedarf etc. die Treibmittelemissionen über den Lebensweg der Dämmplatten - d.h. aus Grundstoffen der PU-Herstellung, bei Schäumung, Montage, während der Nutzungsdauer und bei der Entsorgung - ermittelt. Die wesentlichen Verluste entstanden dabei im Rahmen der Entsorgung. Verluste aus Montage und Nutzungsdauer waren geringfügig. Neben den Treibmittelverlusten wurden auch die energiebedingten Emissionen bei der Deckung des Heizbedarfes ermittelt. Dieser variiert bei gleicher Dicke der Dämmplatten aufgrund der unterschiedlichen Dämmeigenschaften je nach eingesetztem Treibmittel (H-FKW vs. n-Pentan). Weiterhin wurden die jährlichen Gesamtkosten für die Dämmplatten und den Heizbedarf ermittelt.

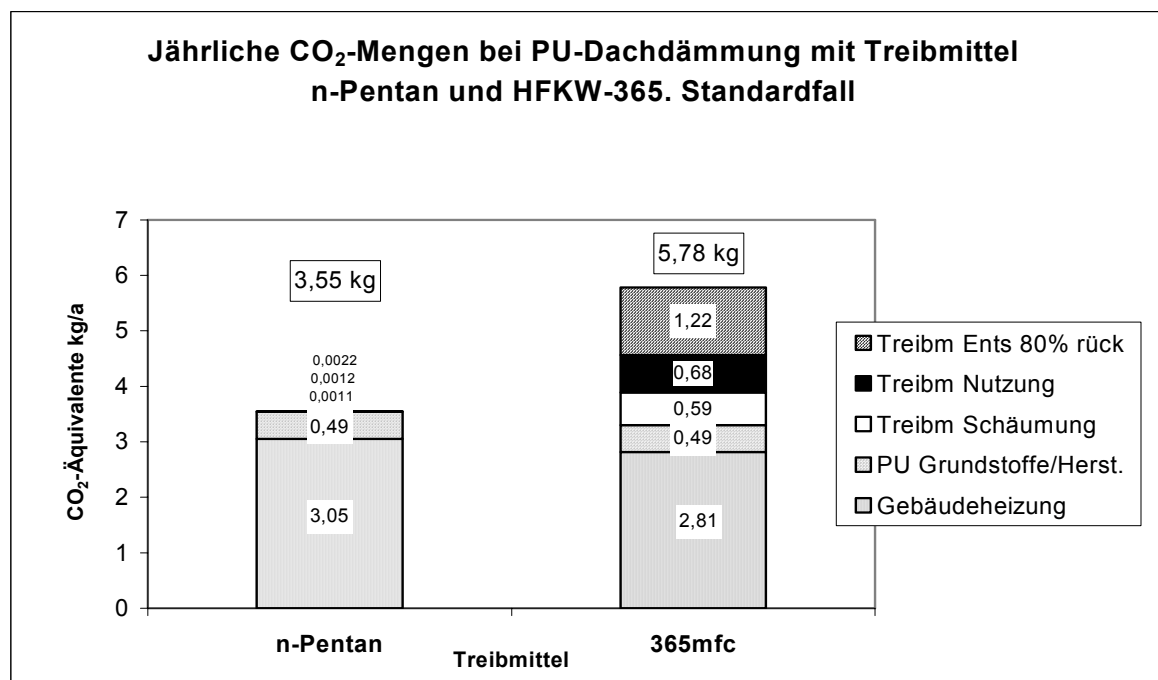


Abbildung 5 Vergleich jährlicher CO₂-Äquivalent-Mengen für PU-Dachdämmung mit Treibmittel n-Pentan und H-FKW-365mfc.²

² Im Rahmen der Entsorgung wird von einer 80%igen Rückführung des Treibmittels ausgegangen.

Wie Abbildung 5 zeigt, fällt bei Dämmung mit H-FKW-365 weniger heizbedingtes CO₂ an. Die Treibmittelemission überkompensiert jedoch bei weitem die rein energiebedingten CO₂-Vorteile. Die treibhauswirksamen Pentanemissionen (das globale Treibhausgaspotenzial von n-Pentan beträgt 4, das von H-FKW 365mfc dagegen 890) fallen so gut wie nicht ins Gewicht.

Bei alleiniger Betrachtung der jährlichen Heizkosten pro m² Dachfläche und die auf ein Nutzzahr umgelegten Anschaffungskosten der 10,5 cm dicken Dämmplatten (ohne Zinsen), betrugen die jährlichen Betriebskosten bei n-Pentan 1,03 Euro, bei H-FKW-365 einen Cent mehr, nämlich 1,04 Euro. Die um 0,04 Euro geringeren Energiekosten werden durch die 0,05 Euro Mehrkosten für das Treibmittel 365mfc im Vergleich zu n-Pentan leicht überkompensiert.

Gegenüber der PU-Dachdämmplatte mit H-FKW weist die Pentan-geschäumte Platte eine deutlich bessere Treibhausbilanz auf. Dies gilt sowohl bei einer Erhöhung der Dämmdicke für den Pentan-Schaum als auch bei geringfügig erhöhtem Heizenergiebedarf bei konstanter Dämmdicke.

Anwendung A – PU Hartschaum: Kühlfahrzeug-Dämmung

In Kühlfahrzeugen zum Transport verderblicher Waren wird generell PU-Schaum zur Isolierung der Laderaumwände eingesetzt. Im Gegensatz zur Dachdämmung handelt es sich nicht um einen flächigen, sondern, bedingt durch die Wärmebrücken im Fahrzeug (Ecken, Dichtungen, Schrauben u. dgl.), um einen dreidimensionalen Dämmaufbau. Zudem kann hier auch die Dicke der Dämmplatten nicht erhöht werden, da dies eine Verringerung des Ladevolumens zur Folge hätte. Als Treibmittel findet üblicherweise ein Verschnitt aus 70 % c-Pentan und 30 % i-Pentan Verwendung. Im Anwendungsbeispiel werden wiederum die Auswirkungen des Einsatzes von H-FKW-365mfc anstelle von c/i-Pentan als Treibmittel untersucht. Ermittelt wurden die Treibmittelverluste über den Lebensweg, d.h. bei Schäumung, Montage, Nutzung und Entsorgung, zudem die energiebedingten Emissionen für die Kühlleistung.

Vor der Fahrt erfolgt üblicherweise eine Vorkühlung mit Strom, während der Fahrt wird die Kühlleistung durch Einsatz von Diesel erbracht. Da die Fahrzeuge meist nach der Hälfte ihrer Lebensdauer ins Ausland verkauft werden, wurde nicht von einer geordneten Entsorgung und daher von einem vollständigen Verlust des Treibmittels zum Ende der Nutzungsdauer ausgegangen. Abbildung 6 zeigt die aggregierten Treibhausgasemissionen für die beiden Dämmverfahren. Der größte Anteil der Treibhausgasemissionen betrifft nicht die Treibmittelemissionen, sondern den Energiebedarf für die Kühlung.

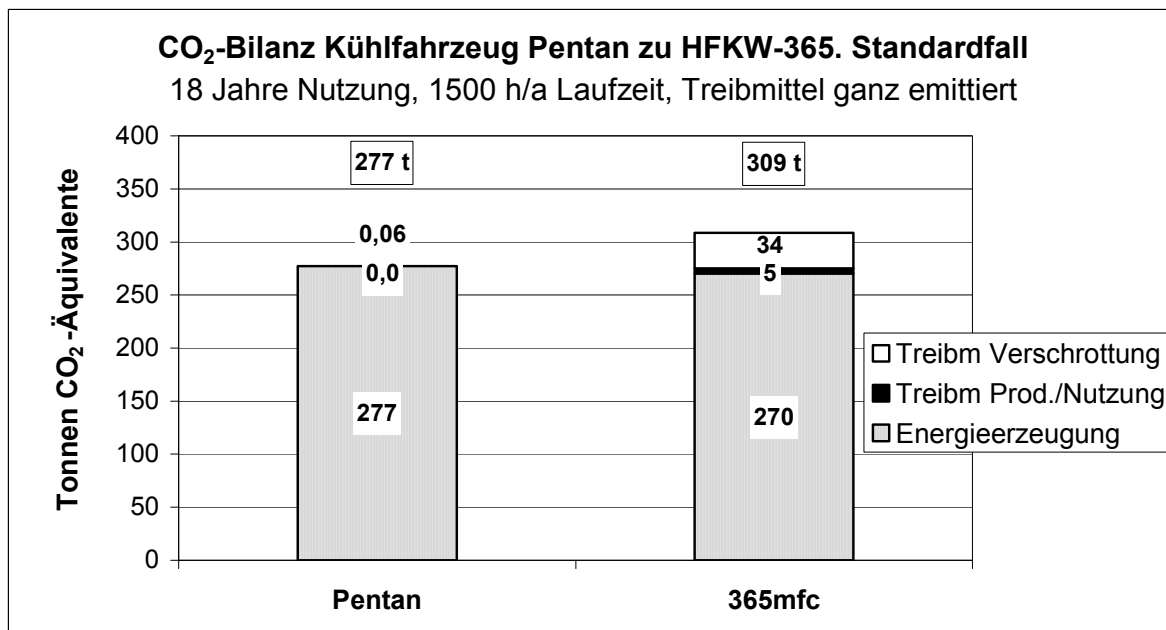


Abbildung 6 Treibhausgas-Bilanz Kühlfahrzeug Pentan zu H-FKW-365mfc.

Die Summe der über die gesamte Lebensdauer emittierten Menge von CO₂ bzw. CO₂- quivalenten betrug bei Pentan 277 t, bei H-FKW-365 dagegen 309 t. Die geringfügig niedrigeren energiebedingten CO₂-Emissionen beim H-FKW-365, wurden durch die Klimawirksamkeit der H-FKW-Treibmittel, die aufgrund des fehlenden Entsorgungsweges als vollständig emittiert angenommen wurden, überkompensiert.

Die jährlichen Betriebskosten für die Kühlung des 18 Jahre eingesetzten Fahrzeugs sind grundsätzlich höher für Pentan- als für H-FKW-Schaum. Beim H-FKW muss nämlich 2,5 % weniger für Diesel und Strom ausgegeben werden. Andererseits gibt es Mehrkosten aus der einmaligen Aufwendung für 43,1 kg H-FKW-365, die auf ein einzelnes Betriebsjahr (ohne Zinsen) umgelegt wurden. Auf der Pentan-Seite fielen dagegen Treibmittelkosten kaum ins Gewicht.

Am Anwendungsbeispiel der Kühlfahrzeugdämmung wurde gezeigt, dass

- Bei gegebenen Entsorgungsbedingungen für Kühlfahrzeuge (Sattelaufleger), nämlich keine Treibmittelr ckgewinnung bei Verschrottung am Lebensende, auch im Falle rigoroser Dickebeschr nkungen die H-FKW-freie Alternative eine bessere Treibhausbilanz aufweist als H-FKW-geschäumte Dämmung
- Die Treibhausbilanz für den untersuchten Kühlaufleger zwar grundsätzlich zugunsten der Pentan-geschäumten Version ausfällt; dieser Vorteil jedoch, anders als im zuvor untersuchten D mmlattenvergleich, relativ knapp ist und sich mit extrem langer Dauer der jährlichen Laufzeit der Kälteanlage bis zum Gleichstand verringern kann.

Anwendung B – Supermarktkühlung (Verbundanlagen)

Zur Kühlung von Lebensmitteln bei ca. –4 Grad (Normalkühlung, NK) und ca. –18 Grad Celsius (Tiefkühlung, TK) werden in Deutschland fast ausschließlich K hlssysteme mit H-FKW-404A als Kühlmittel verwendet. Grundsätzlich kommen drei Systeme zur Anwendung: steckerfertige Systeme, Einzelk hlm bel mit eigenem externem Verfl ssigungssatz und Verbundanlagen mit zentralem Kompressorraum und Kühlmittleitungen zu den

Kühlmöbeln. Der Energieverbrauch dieser Kühlsysteme hängt von verschiedenen Faktoren ab, unter anderem der Verkaufsfläche, dem Kühlbedarf der Produktpalette, den verwandten Kühlgerätetechnologien, der speziellen Auslegung der Kühlanlage und ihrer Regelung, aber auch dem Wartungszustand und der Außen- und Innentemperatur.

Der Referenztechnologie (Direktverdampfer mit H-FKW 404A als Kältemittel) wurden sieben Alternativtechnologien gegenüber gestellt. Damit wurden untersucht:

1. Direktverdampfer H-FKW-404A (Referenz)
2. Sekundärsolesystem mit H-FKW-404A
3. Sekundär-CO₂-System mit H-FKW-404A
4. Sekundär-CO₂-System mit Propan
5. Sekundärsolesystem mit Ammoniak
6. Direktverdampfer CO₂ (TK) und Sekundärsolesystem H-FKW-404A (NK)
7. Direktverdampfer CO₂ (TK) und Direktverdampfer H-FKW-404A (NK)
8. Direktverdampfer CO₂ (TK und NK (überkritisch))

Vier der Alternativtechnologien trennen Kälteerzeugung und Kälteverteilung. Im erzeugenden Primärkreislauf werden H-FKW-404A, Propan bzw. Ammoniak eingesetzt, im verteilenden Sekundärkreislauf eine Sole bzw. CO₂. Drei weitere Systeme unterscheiden zwischen Tiefkühlung und Normalkühlung. Alle Systeme haben mittlerweile Marktreife erreicht, wobei in Europa zur Zeit vor allem die Technologien 1, 2 und 5 nennenswerte Marktanteile besitzen. Die Technologien wurden für einen fiktiven für Deutschland repräsentativen Supermarkt als Standardfall miteinander verglichen.

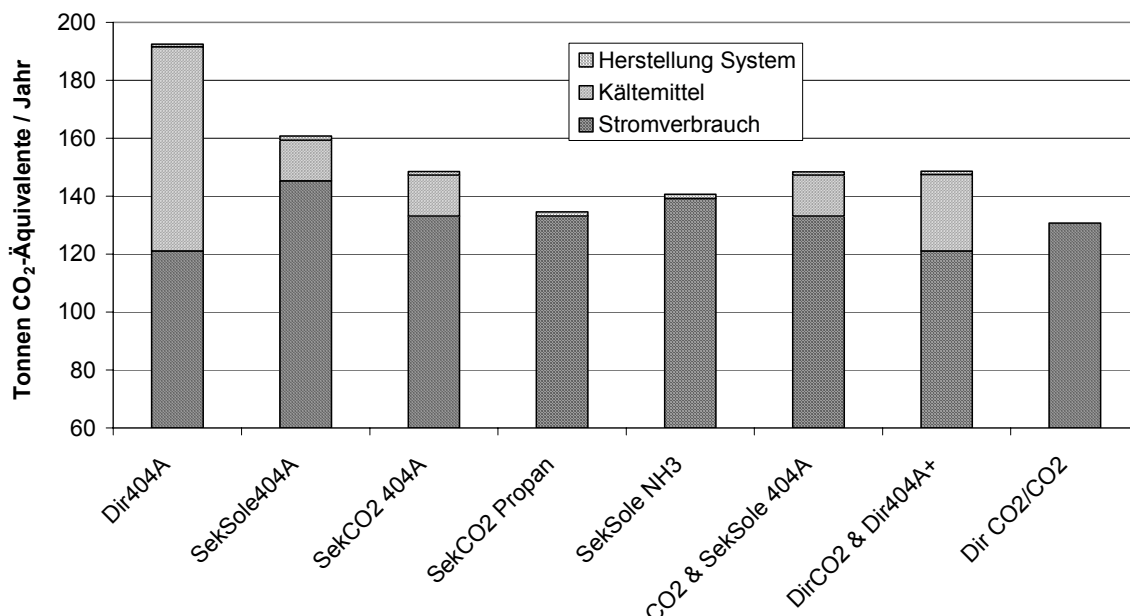


Abbildung 7 Jährliche Treibhausgasemissionen für verschiedene Technologien unter Einbeziehung der Stromerzeugung, der Kältemittelverluste und der Herstellung der Anlage

Wie Abbildung 7 zeigt, wies die Referenztechnologie zwar die geringsten Treibhausgas (THG)-Emissionen aus dem Stromverbrauch, aber die höchsten Emissionen aus Kältemittelverlust und damit insgesamt die höchsten THG-Emissionen auf. Die geringsten Gesamtemissionen ergaben sich für das reine CO₂-System sowie für die Systeme mit Ammoniak und Propan im Primärkreislauf. Letztere wiesen allerdings auch das größte

Gefährdungspotenzial aufgrund ihrer Brennbarkeit bzw. Toxizität auf. Die jährlichen Betriebskosten verhielten sich weitgehend gegenläufig zur Emissionshöhe. Auf der Kostenseite schnitt die klassische H-FKW-404A Direktverdampferanlage 10 bis 25% günstiger ab als die meisten der untersuchten Vergleichstechnologien.

Das Anwendungsbeispiel zeigt unter anderem, dass

- die Nutzungsphase und die Entsorgung die Emissionsbilanz des gesamten Lebensweges mit zusammen mehr als 99,5% dominieren und die mit dem Energieverbrauch bei der Herstellung von Komponenten und Fluiden verbundenen Emissionen unbedeutend bleiben,
- sich die Treibhausbilanz von H-FKW-Lösungen im Vergleich zu Alternativtechnologien in dem Maße verschlechtert, je weniger kohlenstoffintensiv die deutsche Elektrizitätswirtschaft langfristig wird,
- die Emissionsreduktionspotenziale der oben untersuchten Alternativtechnologien zu Direktverdampfer-H-FKW-Lösungen in einen Bereich von 10-30% (0.3-1.0 Mio t CO₂-Äquivalente pro Jahr) der gesamten direkten und indirekten Emissionen der Verbundgewerbekälte in Deutschland fallen,
- die Kosten für die Vermeidung einer Tonne CO₂-Äquivalent bei 20 € für kombinierte CO₂/404A-Direktverdampfer beginnen und z.B. für 404A-Sekundärsole-Systeme bis auf über 200 € ansteigen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Studie kommt zu dem Ergebnis, dass als stoffintrinsische Eigenschaften der untersuchten fluorierten Substanzen insbesondere ihre Klimawirksamkeit und ihre Persistenz negativ hervorstechen. Auf der Positivseite wurden ihre i.d.R. gering ausgeprägte Humantoxizität und ihre geringe Brennbarkeit identifiziert.

Im Rahmen von zwei in dieser Studie untersuchten Anwendungsbeispielen (PU-Dachdämmplatten und PU-Dämmung im Kühlaufleger), aber auch anderer einschlägiger Analysen, zeigte sich, dass bereits heute in vielen früher den FCKW angestammten Anwendungen für fluorierte Treibhausgase deren Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu neuen Alternativtechnologien nicht oder nur noch marginal gegeben ist. Es wurde aber etwa am Beispiel der Supermarkt-Verbundkälteanlage deutlich, dass es ebenso weiterhin Anwendungsfälle gibt, in denen fluorierte Treibhausgase gegenüber Alternativsubstanzen deutliche Wirtschaftlichkeitsvorteile aufweisen.

Bis zu einem gewissen Grad werden heutige Kostennachteile des Einsatzes alternativer Substanzen in gesamtwirtschaftlicher Sicht durch ihre niedrigen spezifischen Vermeidungskosten kompensiert. Die Reduktionen leisten dann einen vergleichsweise kostengünstigen Beitrag zum Klimaschutz. In Einzelfällen sind Alternativtechnologien mit höheren Vermeidungskosten auch unter Einbeziehung dieses Kriteriums zur Zeit allerdings noch zu kostspielig, als dass ihre Verwendung volkswirtschaftlich allein aus Gründen des Klimaschutzes heute angezeigt wäre. Andere ökologische Erwägungen wie etwa die Vermeidung der von persistenten Stoffen ausgehenden Risiken können in Grenzfällen den Ausschlag für eine vom Gesetzgeber eingeleitete Substitution geben.

Jenseits der gebotenen Kosteneffizienz von Klimaschutzmaßnahmen sollte nach Ansicht der Autoren nicht unberücksichtigt bleiben, dass durch einen heute induzierten Systemwechsel später erhebliche Kosten vermieden werden können, wenn die Kosten für die Entwicklung, spätere Anpassung und schließlich folgende Substitution einer nicht langfristig einsetzbaren Technik von Anfang an vermieden werden.

Die Autoren der Studie halten es für angezeigt, dass der Gesetzgeber in dieser Situation vorausschauend die Entwicklung, Erprobung und Verbreitung neuer klimafreundlicher Technologien durch einschlägige Maßnahmenpakete fördert, ohne dabei Anwendern und Konsumenten unvermeidbare zusätzliche Risiken oder Kosten aufzubürden. Dies könnte z.B. innerhalb des durch die Empfehlungen zur Förderung des Einsatzes alternativer Substanzen im Abschlussbericht des Europäischen Klimaschutzprogramms abgesteckten Rahmens erfolgen. Aufgrund der fundamentalen Probleme bei der zeitnahen und anlagenspezifischen Erfassung der Emissionen fluorierter Treibhausgase, werden nach Ansicht der Autoren marktbasierende Instrumente wie der Emissionshandel für fluoridierte Treibhausgase ungeeignet bleiben.

Ordnungsrechtliche Maßnahmen scheinen hier nach Ansicht der Verfasser am ehesten geeignet, um die aus Gründen des Klimaschutzes aber auch der stoffpolitischen Nachhaltigkeit und Vorsorge angezeigte stufenweise Substitution fluorierter Treibhausgase zu ermöglichen und zu beschleunigen. Sie würden nicht zuletzt im internationalen Kontext dazu beitragen, die von der Wirtschaft oft eingeforderte klare Orientierung in Hinblick auf die Richtung der weiteren technologischen Entwicklung zu geben.

1 Einleitung

Verschiedene fluorierte Treibhausgase finden heute Verwendung in einer Vielzahl technischer Applikationen. In dieser Gruppe von Substanzen sind neben speziellen Anwendungsfällen von Perfluorverbindungen (z.B. CF_4 , C_2F_6 oder SF_6) insbesondere die Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW) mengenmäßig relevant. Die H-FKW, die auch den besonderen Schwerpunkt dieser Studie darstellen, kommen dabei vor allem als Ersatzstoffe für die wegen ihrer Rolle bei der Zerstörung stratosphärischen Ozons im Rahmen des Montrealer Protokolls international verbotenen Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) zum Einsatz. Seit 1993 werden so verschiedene H-FKW Schritt für Schritt dem Verbotszeitplan für die relevanten Anwendungen folgend auf den Markt gebracht. Von Anfang an wurde der Einsatz fluorierte Treibhausgase in der Fachöffentlichkeit kontrovers diskutiert. Es wurde insbesondere befürchtet, dass eine ökologisch problematische Substanzklasse durch die nächste ersetzt würde, ohne dass die spezifischen Probleme ihres Umweltverhaltens richtig eingeschätzt werden könnten.

Die in dieser Studie untersuchten fluorierten Verbindungen sind allesamt wirksame Treibhausgase, die deshalb neben Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O) im Protokoll von Kioto in den Korb der zu reduzierenden Treibhausgase aufgenommen wurden. Innerhalb der Europäischen Union haben aus diesem Grunde sowohl die EU-Kommission wie auch verschiedene Mitgliedsstaaten einschließlich Deutschlands damit begonnen, Maßnahmenpakete zur Begrenzung der Emissionen fluorierte Treibhausgase zu schnüren. Einzelne Firmen haben unter dem Druck von Umweltverbänden begonnen, vollständig auf die Verwendung fluorierte Treibhausgase zu verzichten. Neben den Klimaschutzziele, die all diesen Bestrebungen zugrunde liegen, wird bei den radikaleren Maßnahmen von vielen Akteuren implizit oder explizit ein den fluorierten Treibhausgasen ebenso wie den FCKW innewohnendes inhärentes Umweltrisiko vor allem aufgrund ihrer Langlebigkeit in der Umwelt unterstellt.

Es war Ziel dieses Forschungsvorhabens, das vom Einsatz fluorierte Treibhausgase ausgehende Risiko nach aktuellem Forschungsstand genauer zu charakterisieren und gegen den Nutzen der Substanzen in exemplarisch ausgewählten Anwendungen abzuwägen. Das Forschungsprojekt sollte damit Entscheidungsträgern in Verwaltung und Wirtschaft eine klare Hilfestellung bei der Gestaltung einer langfristigen Produktpolitik in Bezug auf die Verwendung von fluorierten Treibhausgasen geben. Sowohl der konventionelle Ansatz der Gefahrenabwehr wie auch vorsorgende Strategien der Risikobewertung und des Risikomanagements von Stoffen fanden dabei Anwendung.

Das Vorhaben umfasste folgende Abschnitte:

- Entwicklung einer anwendungsbezogenen Bewertungsmethodik auf der Basis eines Kriterienkataloges
- Übersicht über aktuelle und prognostizierte zukünftige Verwendungsmuster fluorierte Treibhausgase
- Zusammenfassende Diskussion des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstandes zur Umweltverhalten fluorierte Treibhausgase
- Untersuchung ausgewählter Anwendungsbeispiele (Treibmittel in Polyurethan-Hartschäumen sowie Kältemittel in Supermarktkühlungen)
- Schlussfolgerungen für eine vorsorgende Umweltpolitik.

Die ausgewählten Anwendungsbeispiele wurden im Rahmen der Untersuchung vertieft betrachtet, um praxisnah Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes alternativer Technologien

in Applikationen auszuloten, die als für den Einsatz fluorierter Treibhausgase prädestiniert gelten. Die jeweiligen Ergebnisse wurden mit Fachleuten u.a. in einem Fachgespräch diskutiert und validiert. Die untersuchten Anwendungsbeispiele können selbstverständlich nicht repräsentativ die Situation in sämtlichen Anwendungsfeldern fluorierter Treibhausgase abbilden. Sie wurden jedoch so ausgewählt, dass eine Übertragbarkeit von Kernaussagen auch auf andere Anwendungsfelder möglich ist.

Mit dieser Studie wird eine für private wie öffentliche Entscheidungsträger gleichermaßen relevante Zusammenstellung und Diskussion des während der ersten Dekade nach der breiten kommerziellen Einführung fluorierter Treibhausgase akkumulierten wissenschaftlichen und technischen Wissens zu ihrer ökologischen Bewertung vorgelegt. Für die Bewertung wurde ein pragmatischer Ansatz entwickelt, der zwar der Komplexität der Anwendungsfelder Rechnung trägt aber zugleich auch Hilfen in Entscheidungssituation geben kann.

2 Ableitung des Bewertungsansatzes

2.1 Fragestellung

Die Verwendung von H-FKW ist auf Grund ihrer hohen Flüchtigkeit mit potenziellen Emissionen in die Atmosphäre verbunden. Wegen der gesellschaftlichen Sensibilisierung, die in Hinblick auf hiermit verbundene Gefährdungen und Risiken besteht, sollen in dieser Studie die folgenden Fragen erhellte werden:

- Welches sind die umwelt- und gesundheitsbezogenen Risiken, die sich aus dem Einsatz von (H)-FKW unter Berücksichtigung ihrer stoffintrinsischen Eigenschaften ergeben?
- Welche umwelt- und gesundheitsbezogenen Vor- und Nachteile und welche Risiken sind – bei äquivalentem Nutzen – beim Einsatz von H-FKW im Vergleich zu alternativen Substanzen über den Lebensweg hinweg zu erwarten?

Es werden diejenigen umwelt- und gesundheitsrelevanten Kriterien identifiziert, denen im Rahmen der Bewertung prioritäre Aufmerksamkeit gewidmet werden sollte. Um bei der vergleichenden Bewertung eine Beurteilung von Vor- und Nachteilen in unterschiedlichen Wirkungskategorien zu ermöglichen, sollen Kriterien für eine Gewichtung der relevanten Wirkungskategorien aufgestellt werden.

2.2 Hintergrund

Die Bewertung von Stoffen in Hinblick auf ihre umwelt- und gesundheitsrelevanten Eigenschaften erfolgt in unterschiedlichen Zusammenhängen und mit unterschiedlichen Zielsetzungen. Freiwillige betriebs- oder brancheninterne Ansätze ergänzen die gesetzlich vorgeschriebenen Methoden, um in Verbindung mit technisch-wirtschaftlichen Prüfungen und Bewertungen eine Optimierung der Markchancen von Produkten zu erreichen. Bewertungen von Umwelt- und Verbraucherverbänden richten den Fokus hingegen vorrangig auf die schädlichen Wirkungen auf die Umwelt und die Gesundheit, Arbeitsschützer auf den Schutz der Gesundheit und die Sicherheit am Arbeitsplatz. Ganzheitlich orientierte Bewertungen wie z. B. Öko-Bilanzen berücksichtigen dabei die Primär- und Sekundäreffekte in allen Lebensabschnitten.

Zur Eingrenzung des normativen Rahmens, an dem sich die Bewertung in der vorliegenden Studie orientiert, werden in Abschnitt 2.3 die nationalen und internationalen Leitbilder der nachhaltigen Stoffpolitik zusammengefasst. Abschnitt 2.3.1 erläutert, wie das wesentliche Element einer nachhaltigen Stoffpolitik, das Vorsorgeprinzip, im internationalen, europäischen und nationalen Kontext verankert und umgesetzt ist. In Abschnitt 2.3.2 werden Überlegungen zu Risiko und Unsicherheit in der Chemikalienbewertung diskutiert.

In Abschnitt 2.4. wird, aufbauend auf den derzeit verfügbaren Ansätzen, eine für die Zielsetzung dieser Studie geeignete Vorgehensweise zur Bewertung vorgeschlagen.

Im Anhang zu dieser Studie (Kapitel 11) wird ein Ausblick auf verschiedene vorsorgeorientierte Bewertungsansätze gegeben, der eine Orientierung im Kontext der risikopolitischen Diskussion ermöglichen soll.

2.3 Leitbilder einer nachhaltigen Stoffpolitik

Das von der Brundtland-Kommission entworfene Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung ist mit der Agenda 21 der Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung vom Juni 1992 in Rio de Janeiro formuliert worden. Die OECD hat als Antwort auf den Auftrag der United Nations General Assembly 1997 in der *OECD Environmental Strategy for the First Decade of the 21st Century* vier spezifische Kriterien für eine nachhaltige Umwelt definiert. Kriterium III besagt:

Emissionen gefährlicher oder belastender Substanzen in die Umwelt dürfen deren Assimilationskapazität nicht überschreiten; Konzentrationen müssen unter für die Umwelt und die menschliche Gesundheit kritischen Werten bleiben. Wenn die Aufnahmekapazität tatsächlich Null ist (z. B. für Gefahrstoffe, die persistent und/oder bioakkumulierend sind), dann wird auch eine Nullemission solcher Stoffe gefordert, um ihre Anreicherung in der Umwelt zu vermeiden (OECD 2001)).

Im 6. Umweltaktionsprogramm der Europäischen Gemeinschaft (KOM 2001a) ist das Ziel zu Umwelt und Gesundheit:

Erreichen einer Umweltqualität, bei der vom Menschen hergestellte Schadstoffe, einschließlich verschiedener Arten von Strahlung, nicht zu signifikanten Gesundheitsauswirkungen bzw. Umweltgefahren führen. Erreicht werden soll dies durch ganzheitliche und umfassende Ansätze mit Schwerpunkten auf Vorsorge und Vorbeugung unter besonderer Berücksichtigung anfälliger Gruppen wie Kindern und älteren Menschen.

Ähnlich wird es in der Nachhaltigkeitsstrategie der Europäischen Gemeinschaft (KOM 2001b) formuliert:

Bis zum Jahr 2020 soll sicher gestellt werden, dass Chemikalien nur so hergestellt und verwendet werden, dass sie keine wesentliche Gefahr für die Gesundheit des Menschen und die Umwelt darstellen. Darüber hinaus, zielt die EU darauf ab, ihre Treibhausgasemissionen in die Atmosphäre bis zum Jahr 2020 jedes Jahr um durchschnittlich 1 % (ausgehend von den Werten des Jahres 1990) zu reduzieren.

Im Weißbuch „Strategie für eine zukünftige Chemikalienpolitik“ (KOM 2001c) wird das stoffpolitische Ziel des *Schutzes der menschlichen Gesundheit und der Förderung einer giftfreien Umwelt* um einige konkretisierende Elemente ergänzt:

Neben der Forderung nach Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der chemischen Industrie sollen insbesondere die Wissenslücken, die derzeit für 99 % der in Europa eingesetzten Chemikalien bestehen, geschlossen werden. In Zukunft soll eine verstärkte Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus einer Chemikalie erfolgen und das Vorsorgeprinzip in den Fällen angewendet werden, in denen aus wissenschaftlicher Sicht Ungewissheiten über die genaue Art und Schwere möglicher Schäden durch Chemikalien bestehen. Stoffe, die zu besonderer Besorgnis Anlass³ geben, sollen nur noch nach spezieller Zulassung eingesetzt werden dürfen. Gefördert werden soll die Substitution gefährlicher Stoffe durch weniger gefährliche.

³ Hierzu gehören gemäß Weißbuch Stoffe, die die Kriterien nach Anhang D des künftigen Stockholmer POP-Übereinkommens erfüllen, sowie Stoffe, die krebserzeugend, erbgutverändernd oder fortpflanzungsgefährdend (Kategorie 1 und 2) sind; weiterer Forschungsbedarf wird hinsichtlich persistenter, bioakkumulierender und toxischer Stoffe sowie hoch persistenter und hoch akkumulierbarer Stoffe gesehen.

Während die Konkretisierung stoffpolitischer Ziele und Leitbilder auf europäischer Ebene derzeit in der Diskussion und der Entwicklung ist, gibt es auf der Ebene der Mitgliedstaaten bereits praktische Ansätze: Die schwedischen „Neuen Leitlinien zur Chemikalienpolitik“ (SOU 2000) schlagen zur Erreichung des Ziels einer „chemikalienfreien Umwelt“ vor, dass die Verwendung und Herstellung persistenter, bioakkumulierender, kanzerogener, mutagener, reproduktionstoxischer und als endokrine Disruptoren wirksamer Substanzen innerhalb bestimmter Fristen eingestellt oder eingeschränkt werden.

In Deutschland hat das Umweltbundesamt bereits 1997 in Anlehnung an die Empfehlungen der Enquête-Kommission des 13. Deutschen Bundestages „Schutz des Menschen und der Umwelt“ Grundanforderungen an eine nachhaltige Entwicklung konkretisiert. In der Studie „Handlungsfelder für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC“ (UBA 1999a) hat das Umweltbundesamt die Konzepte und Vorstellungen der Gutachten des Rats von Sachverständigen für Umweltfragen, der Enquete-Kommission und der „Leitlinien Umweltvorsorge“ der Bundesregierung aus dem Jahr 1986 zusammengetragen. Hervorgehoben wird hier, dass sich die Prinzipien der Nachhaltigkeit und der Vorsorge weitgehend decken und somit nicht nur Gefahrenabwehr, sondern auch Risikovorsorge durch die Vermeidung oder Verminderung von Risiken im Vorfeld möglicher Gefahren erforderlich ist.

Anhand der Leitbilder werden stoffbezogene Umweltqualitätsziele vorgeschlagen und fünf langfristige stoffbezogene Umwelthandlungsziele abgeleitet und begründet, die in Tabelle 1 den acht sich ergebenden Kombinationen von Stoffgruppen und Eigenschaften zugeordnet werden.

Tabelle 1 Stoffpolitische Umweltziele des Umweltbundesamtes [nach UBA 1999, UBA 2001]

	Eigenschaften			
Stoffgruppe	persistent und/oder bioakkumulierend	kanzerogen, mutagen, reproduktions-toxisch	in sonstiger Hinsicht toxisch/ökotoxisch	nicht rückholbar
Xenobiotika und deren Metabolite	irreversibler Eintrag ist vollständig zu vermeiden	Eintrag ist vollständig zu vermeiden	Reduktion des Umwelteintrags auf das technisch unvermeidbare Maß	Erhöhung des stofflichen Eintrags ist zu vermeiden
Naturstoffe	keine Erhöhung der geogenen/biogenen Hintergrundbelastung	keine Erhöhung der geogenen/biogenen Hintergrundbelastung	Reduktion des Umwelteintrags auf das technisch unvermeidbare Maß	Erhöhung des stofflichen Eintrags ist zu vermeiden

2.3.1 Das Vorsorgeprinzip

Gemäß dem Vertrag zur Gründung der Europäischen Gemeinschaft müssen zur Erreichung des hohen Schutzniveaus für Umwelt und Gesundheit die Grundsätze des Verursacherprinzips und des Vorsorgeprinzips beachtet werden (EGV 1999). Das Vorsorgeprinzip soll im Rahmen von Risikobewertung, Risikomanagement und Risikokommunikation berücksichtigt werden, und zwar in den Fällen, in denen bei einem Phänomen, Produkt oder Verfahren mit dem Eintritt gefährlicher Folgen gerechnet werden muss und sich das Risiko durch eine wissenschaftliche Bewertung nicht mit hinreichender Sicherheit bestimmen lässt (KOM 2000). Während das Vorsorgeprinzip in der zukünftigen Chemikalienpolitik der Europäischen Union noch nicht abschließend konkretisiert ist, hat es bereits in zunehmendem Maß Eingang in stoffpolitische Konventionen gefunden und wurde in verschiedenen nationalen und europäischen Regelungen umgesetzt.

So äußert sich Artikel 3 der Klimarahmenkonvention (UNFCCC, 1992) folgendermaßen zur Rolle von vorsorgenden Politiken und Maßnahmen des Klimaschutzes:

„Die Vertragsparteien sollen Vorsorgemaßnahmen treffen, um den Ursachen der Klimaänderungen vorzubeugen, sie zu verhindern oder so gering wie möglich zu halten und die nachteiligen Auswirkungen der Klimaänderungen abzuschwächen. In Fällen, in denen ernsthafte oder nicht wiedergutzumachende Schäden drohen, soll das Fehlen einer völligen wissenschaftlichen Gewissheit nicht als Grund für das Aufschieben solcher Maßnahmen dienen, wobei zu berücksichtigen ist, dass Politiken und Maßnahmen zur Bewältigung der Klimaänderungen kostengünstig sein sollten, um weltweite Vorteile zu möglichst geringen Kosten zu gewährleisten.“

Ein weiteres Beispiel ist die OSPAR-Konvention (OSPAR, 2001), die den vorsorgenden Schutz der Meere mit den Instrumenten des Verursacherprinzips und der besten verfügbaren Technik vorsieht.

Mit der Richtlinie über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung ist das Vorsorgeprinzip erstmals in einer europäischen Regelung in die Praxis umgesetzt worden: Es sollen alle geeigneten Vorsorgemaßnahmen gegen Umweltverschmutzungen, insbesondere durch den Einsatz der besten verfügbaren Techniken, getroffen werden; in Anhang IV wird als geeignete Maßnahme u. a. die Substitution gefährlicher Stoffe durch weniger gefährliche genannt (IPPC 1996).

In Deutschland hat sich historisch aus dem Polizei- und Ordnungsrecht ein dreistufiges Sicherheitskonzept entwickelt, das zwischen Gefahr, Risiko und Restrisiko unterscheidet.

Der Gefahr, bei der mit hinreichender Wahrscheinlichkeit ein Schadenseintritt erwartet wird, muss der Staat mit Gefahren abwehrenden Maßnahmen begegnen, unabhängig davon, ob Aufwand und Nutzen in einem angemessenen Verhältnis zueinander stehen.

Risiken, also Verhältnisse, die möglicherweise zu einem Schaden führen, sollten im Vorfeld minimiert werden, wobei unter dem Vorbehalt des technisch Machbaren die Verhältnismäßigkeit von Aufwand und Nutzen berücksichtigt werden sollte.

Das verbleibende Restrisiko, also die Unmöglichkeit, völlig risikofreie Umstände (Null-Risiko) zu erreichen, wird durch die Kategorie des von der Rechtsordnung erlaubten und daher gesellschaftlich hinzunehmenden Risikos gefasst (Öko-Institut 2001).

Dieser Ansatz der Gefahrenabwehr und der Risikovorsorge hat in zahlreichen deutschen Umweltgesetzen seinen Eingang gefunden, so z. B. im Bundesimmissionsschutz-, dem Wasser- und dem Chemikalienrecht.

Eines der Instrumente zur Umsetzung einer vorsorgeorientierten Chemikalienpolitik ist das Substitutionsprinzip, d. h. das Ersetzen gefährlicher Stoffe durch weniger gefährliche. Eine solche Substitutions- und Minimierungspflicht ist in Deutschland in Hinblick auf gesundheitliche Gefahren beim Umgang mit Arbeitsstoffen gesetzlich vorgeschrieben. Im Weißbuch zur Chemikalienpolitik ist die Förderung der Substitution als eines der wesentlichen Ziele genannt (KOM 2001).

Voraussetzung für die Anwendung des Vorsorge- und des Substitutionsprinzips ist allerdings das Vorliegen ausreichender Informationen zu den Stoffeigenschaften als Grundlage für eine differenzierte Risikobewertung (z. B. Ahlers 2001).

2.3.2 Risiko und Unsicherheit

Risiko ist in naturwissenschaftlichem Sinn das Produkt von Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit. Je mehr empirische Daten über mögliche Schäden und über die Anzahl von eingetretenen Schäden vorhanden sind und je eindeutiger Ursache-Wirkungs-Beziehungen sind, desto besser sind die Voraussetzungen für eine hohe Abschätzungssicherheit. Je weiter Ursache und Wirkung zeitlich und räumlich auseinanderücken und je mehr Risikobewertung auf Modellannahmen beruht oder auf Ergebnissen vereinfachender Laboruntersuchungen, desto höher wird die Unsicherheit der Abschätzung. Die Unsicherheit im Bereich der Chemikalienbewertung beruht zum einen auf der unzureichenden Bewertung des größten Teils der Stoffe. Ein hohes Maß an Unsicherheit bleibt aber auch für Stoffe, welche die mit vergleichsweise hohem Aufwand durchzuführende Stoffbewertung im Rahmen der Neustoffbewertung durchlaufen haben, da die realen komplexen Wirkungszusammenhänge im Menschen und in der Umwelt letztlich nicht vollständig erfassbar sind und nur untersucht werden kann, was schon bekannt ist. Das Umweltbundesamt hat diese Grenzen der Chemikalienbewertung in Hinblick auf eine vorsorgende Stoffpolitik in (UBA 1999) ausführlich dargestellt. Die Nutzung chemischer Stoffe wird möglicherweise auch in einer an der Vorsorge orientierten Zukunft mit gewissen Restrisiken behaftet sein. Welche Kriterien beachtet werden können, um bei der Bewertung von Risiken ein Augenmaß für die Bandbreite zwischen akzeptablen und kontrollierbaren Restrisiken und bedrohlichen Blindversuchen im globalen Maßstab zu entwickeln, wird z. B. im Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung zu globalen Umweltveränderungen (WBGU 1998), im ersten Bericht der Risikokommission (Risikokommission (2002)) oder im Gutachten der Europäischen Umweltagentur zur Vorsorge (EEA 2001) diskutiert. Die hier durchgeführte Einschätzung der mit der Verwendung von H-FKW verbundenen Risiken orientiert sich an den dort genannten Maßstäben zur vorsorgeorientierten Einschätzung von Risiken und Unsicherheiten.

2.4 Vorgehensweise zur Risikoeinschätzung in dieser Studie

Die Bewertung der H-FKW baut auf der Darstellung des Sachstandes zu den stoffintrinsischen Eigenschaften der H-FKW und auf den Ergebnissen der ökobilanziellen Sachbilanz zu ausgewählten Anwendungsfällen auf. Das Ablaufschema der Bewertung ist in Abbildung 1 wiedergegeben.

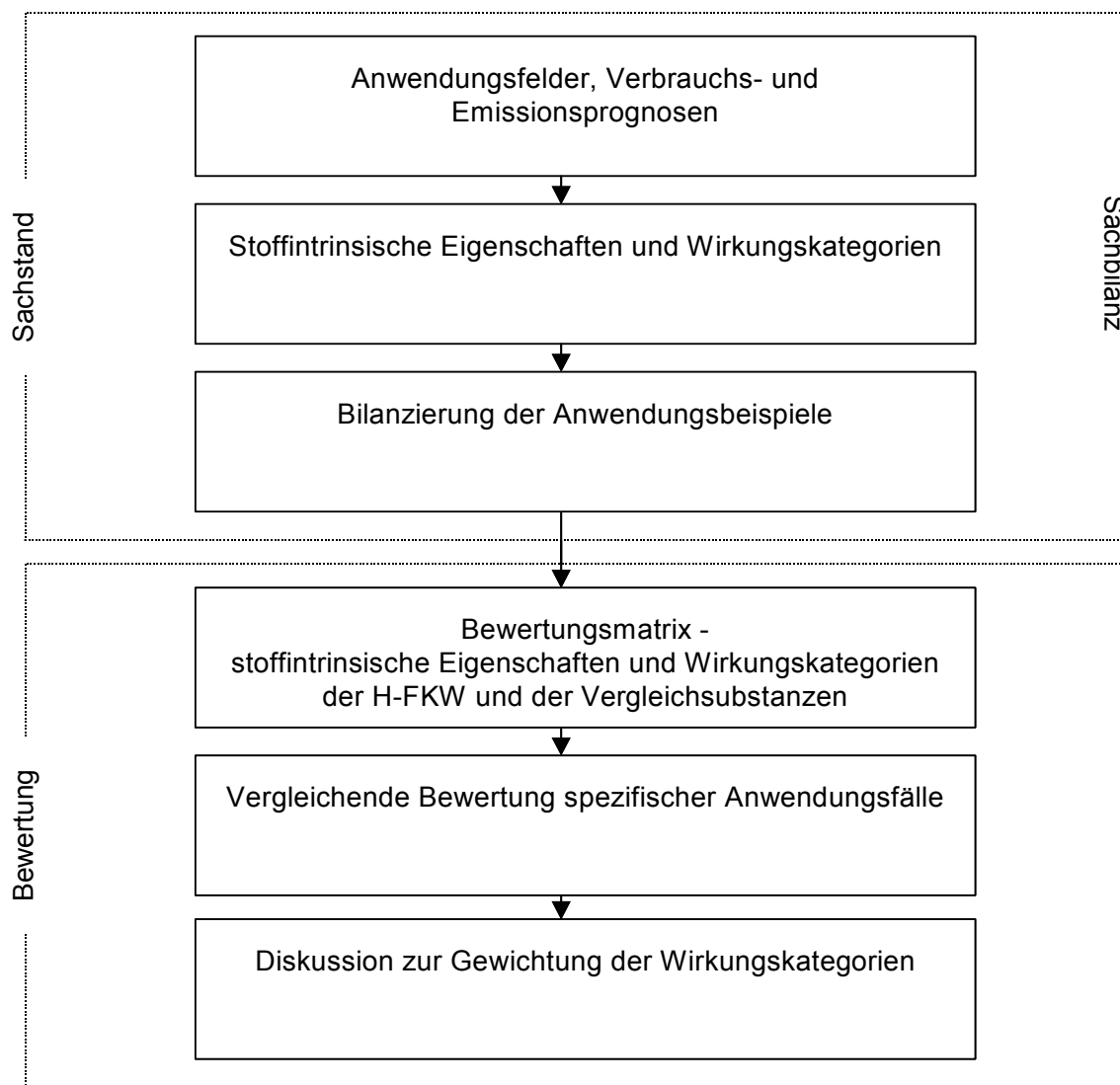


Abbildung 1 Ablaufschema Risikoeinschätzung

Im sich an dieses Kapitel anschließenden Kapitel 3 werden die Anwendungsfelder der H-FKW, die aktuellen Schätzungen und Prognosen zu den weltweit eingesetzten Mengen und Emissionen sowie die Charakterisierung der Herstellung und der Entsorgung dargestellt. Kapitel 4 fasst den Stand des Wissens zu stoffintrinsischen Eigenschaften⁴ zusammen.

In den Kapiteln 5 und 6 wird eine vergleichende Bilanzierung gängiger Anwendungen vorgenommen. Die Bilanzierung beschränkt sich dabei auf die Wirkkategorie Klima, deren primäre Relevanz im Kapitel 4 festgestellt wurde. Als Anwendungen wurden Polyurethan (PU)-Hartschäume zur Dachdämmung und zur Dämmung von Kühlfahrzeugen sowie Supermarktkühlungen ausgewählt. In PU-Hartschäumen dienen H-FKW-365mfc als

⁴ Im Kontext der Gefahrstoffbewertung benennt der Begriff „stoffintrinsische Eigenschaften“ die den Stoffen eigenen Wirkpotentiale. Im Kontext der Ökobilanzierung werden die Wirkpotentiale in Wirkungskategorien zusammengefasst. Da in der vorliegenden Studie beide Bereiche in Betracht gezogen bzw. angewendet werden, wird im Weiteren von „stoffintrinsischen Eigenschaften und Wirkungskategorien“ gesprochen. Die Auswahl der Wirkungskategorien lehnt sich dabei an die quantifizierbaren output-bezogenen Kategorien der SETAC-Systematik an (vgl. UBA 1999d).

Treibmittel alternativ zu n-Pentan und c-Pentan. In Supermarktkühlanlagen wird H-FKW-404A als Kältemittel und Kälteträger alternativ zu Propan, Ammoniak und CO₂ eingesetzt.

Die eigentliche Bewertung erfolgt in Kapitel 7. Um ein systematisches Verständnis zu erleichtern, werden die stoffintrinsic Eigenschaften und Wirkkategorien der hier behandelten H-FKW und der in den Anwendungsbeispielen behandelten Alternativsubstanzen in einer Bewertungsmatrix eingestuft. Die für diese Untersuchung aufgrund ihrer in der Fachwelt etablierten halb-quantitativen Einstufungssystematik gewählte Methodik lehnt sich an das im Rahmen der Substitutionspflicht des Gefahrstoffrechts angewendeten „Spaltenmodell“ der Technischen Richtlinie Gefahrstoffe (TRGS 440) an: Die Relevanz der Eigenschaften und Wirkkategorien der Einzelsubstanzen werden in einem fünfstufigen System als „sehr hoch“, „hoch“, „mittel“, „gering“, „vernachlässigbar“ eingestuft. Dabei werden für die Eigenschaften Humantoxizität, Ökotoxizität sowie Brand- und Explosionsrisiken die auf den R-Sätzen basierenden Einstufungsvorschläge der TRGS 440 übernommen. Für die dort nicht abgehandelten Eigenschaften und Wirkungskategorien wird ein eigenes Einstufungssystem angewendet. Dabei werden für die einzelnen Bewertungskategorien jeweils die niedrigsten bekannten Werte als Grenze für die Stufe „vernachlässigbar“ und die höchsten bekannten Werte als Grenze für die Stufe „sehr hoch“ festgelegt, um daraus die Stufen „gering“, „mittel“ und „hoch“ abzuleiten.

Diese Bewertungsmatrix erlaubt einen Überblick über die wesentlichen Risiken und ermöglicht es, die vergleichende Bewertung auf die relevanten Kriterien zu beschränken. Die Entscheidung, welche Substanz in einem spezifischen Anwendungsfall aus der Sicht des Umwelt- und Gesundheitsschutzes die bessere wäre, ist dann einfach, wenn bereits die Betrachtung der stoffintrinsic Eigenschaften und Wirkungskategorien ein eindeutiges Bild ergibt. Stehen sich Vor- und Nachteile in unterschiedlichen Kategorien gegenüber, erfordert dies eine differenzierte Betrachtung der Risiken, die im spezifischen Anwendungsfall zum Tragen kommen. Dies schließt auch Überlegungen zu bereits angewendeten Risikomanagementmaßnahmen, die zur Minimierung dieser Risiken zur Anwendung kommen oder zur Anwendung kommen könnten oder sollten, ein.

Methodisch wird in der vorliegenden Studie für jedes der Anwendungsbeispiele ähnlich wie bei der Erstellung der Bewertungsmatrix vorgegangen, d. h. es erfolgt eine Klassifizierung in die fünf Stufen „vernachlässigbar“, „gering“, „mittel“, „hoch“, „sehr hoch“. Die Einstufung erfolgt auf der Basis der Einstufungen in der Bewertungsmatrix unter qualitativer Berücksichtigung der Anwendungsmuster und der eingeführten und angewandten Risikomanagementmaßnahmen. Eine in der Bewertungsmatrix als „mittel“ eingestufte Eigenschaft kann daher auf- oder abgewertet werden, je nachdem ob die Anwendungsmuster auf eine Minderung oder auf eine Erhöhung des Risikopotentials hinweisen.

Folgende Kriterien und Aspekte gehen in die Einstufung der Anwendungen ein:

- Ergebnisse der Bilanzierung in Kapitel 5 und 6
- Anwendungsmuster⁵: geschlossen, vorwiegend geschlossen, halb-offen, offen

⁵ In Anlehnung an (UBA 1999b) erfolgt dabei eine Unterscheidung der Nutzungsmuster in vier Risikokategorien: Als geschlossenes Nutzungsmuster mit dem niedrigsten Risiko gilt die industrielle Verwendung eines Stoffes in einem geschlossenen System mit Verlustraten < 0,01%. Als vorwiegend geschlossenes Nutzungsmuster mit entsprechend höherem Risiko gelten industrielle Anwendungen, die innerhalb der Anlagen zwar in offenen Systemen eingesetzt werden, aber bei denen davon auszugehen ist, dass Umweltmanagement und Umwelttechnik ausreichend sind. Die nächsthöhere Risikostufe umfasst halboffene Nutzungsmuster, bei denen es zu Emissionen aus vielen weit gestreuten Einzelquellen bei gewerblichen oder privaten Nutzern kommt. Das höchste Risiko wird offenen Nutzungsmustern zugeordnet, bei denen es zu einem direkten und unbehandelten Eintrag von Stoffen in die Umwelt kommt (s. auch Anhang 11.1.3.4).

- Verteilung der Anwendungen: konzentriert, punktförmig, semi-diffus, diffus
- Risikomanagementmaßnahmen: z. B. üblich und seit langem eingeführt, möglich, aber in der Praxis nicht erprobt oder nicht durchgesetzt, technisch möglich aber nur mit sehr hohem Aufwand, technisch nicht realisierbar, Verantwortlichkeiten eindeutig etc.
- Unbekannte Risiken und Unsicherheiten werden als schwerwiegender eingeschätzt.
- Beschränkungen auf den relativen Vergleich der Alternativsubstanzen im Anwendungsfall

2.4.1 Gewichtung

Eine direkte Aufrechnung von Vor- und Nachteilen in einzelnen Bewertungskategorien wird als nicht angemessen angesehen. Zum einen wird eine Aggregation unterschiedlicher Wirkungskategorien z. B. im Rahmen von Ökobilanzen aus wissenschaftlicher Sicht im Allgemeinen mit Skepsis betrachtet (z. B. UBA 1999d), zum anderen kommt im Rahmen der hier durchgeführten anwendungsspezifischen Bewertung eine qualitative und diskursive Methode zur Anwendung, die eine Aufrechnung von vornherein hinfällig macht.

Um den möglicherweise sehr unterschiedlichen Risikodimensionen der Bewertungskategorien dennoch gerecht zu werden, halten wir es für die Bildung eines abschließenden Urteils für unabdingbar, die unterschiedliche Relevanz der Wirkungskategorien anhand eines Kriteriensatzes zumindest diskursiv herauszuarbeiten. Die im Folgenden angeführten Kriterien wurden auf der Basis der Diskussion zur Bewertung von Ökobilanzen (z. B. UBA 1999), der Risikodiskussion (WBGU 2000), des ersten Berichts über die Arbeit der Risikodimension und der Diskussion einer vorsorgenden Chemikalienpolitik (EEA 2000) entlehnt und werden zu einer abschließenden qualitativen Gewichtung der Wirkungskategorien herangezogen:

Tabelle 2 Kriterien zur Gewichtung der Wirkungskategorien

Kriterium	Geringeres Risiko	Höheres Risiko
räumliche Reichweite	lokale Reichweite	globale Reichweite
zeitliche Reichweite	kurzfristig	langfristig
Reversibilität von Schäden	reversibel; akut	irreversibel; chronisch
Verursachernähe	Schäden verursachernah; Verantwortlichkeit oder Haftung der Verursacher	Schäden verursacherfern; keine Verantwortlichkeit oder Haftung der Verursacher
Schadensebene	eine Ebene betroffen (z. B. eine trophische aquatische Ebene)	viele (alle) Ebenen betroffen (Mensch, Flora, trophische Ebenen der Fauna)
Beziehung von Ursache und Wirkung	eindeutig; bekannt	komplex; unbekannt
Erfahrungshorizont	langfristige Erfahrung in unterschiedlichen Kontexten	keine oder wenig Erfahrungen
Erreichung von Zielen (Umwelt, Sicherheit)	Ziel erreicht; positiver Trend	Ziel nicht erreicht; negativer Trend

3 Herstellung, Anwendung und Entsorgung

3.1 Lebensweg

3.1.1 Überblick:

H-FKW werden über den gesamten Lebensweg von Produkten frei gesetzt:

- während der H-FKW-Produktion
- während Produktionsprozessen, in denen H-FKW verwendet werden
- während der Nutzung von Produkten
- im Rahmen der Entsorgung von Produkten.

Durch die mögliche Freisetzung über den gesamten Lebensweg von H-FKW-haltigen Produkten hinweg muss eine verzögerte Emission relativ zum Produktionszeitpunkt in Betracht gezogen werden. Dies gilt vor allem bei Produkten mit langen Lebensdauern (z.B. Industriekälte) und hohen Emissionen bei der Entsorgung (z.B. mobile Klimaanlage).

Abbildung 2 stellt dar, wie während des mehrjährigen Lebensweges eines H-FKW haltigen Produktes (z.B. eines Haushaltskühlschranks) eine Freisetzung von H-FKW stattfinden kann.

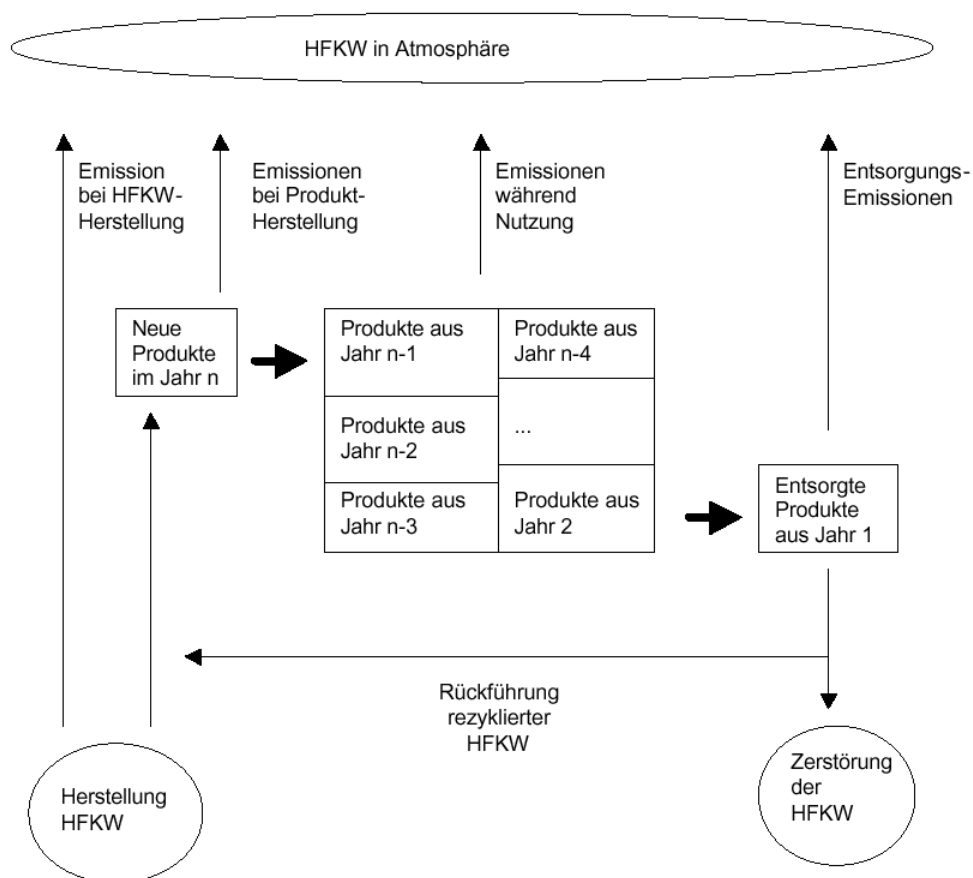


Abbildung 2 H-FKW Emissionen längs des Lebensweges H-FKW-haltiger Produkte

3.1.2 Anwendung

Als Ersatzstoffe für ozonzerstörende Stoffe können fluorierte Treibhausgase in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt werden. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die mengenmäßig wichtigsten Anwendungen und die darin jeweils eingesetzten Substanzen (ozonzerstörende Stoffe, H-FKW sowie alternative Fluide). Die mengenmäßig bedeutsamsten Anwendungsfälle von Perfluorkohlenstoffen und Schwefelhexafluorid sind die Halbleiterherstellung sowie Schaltanlagen und die Verwendung als Schutzgas in der Herstellung und Verarbeitung von Magnesium. In der Praxis werden oft auch Substanzmischungen (Tabelle 4) aus zwei oder drei verschiedenen H-FKW verwendet, um die gewünschten thermodynamischen Eigenschaften zu erzielen.

Tabelle 3 Die Substitution der verwendeten Substanzen⁶ in verschiedenen Anwendungen

Sektor	Ausgangsstoffe		Alternativen	
	FCKW u.ä.	H-FCKW	fluorierte	halogenfrei
Kälte- und Klimatechnik	12	22	134a	Propan
	11	123	143a	Butan
	115	141b	125	CO ₂
	114	142b	32	Ammoniak Wasser "not-in-kind"
Treibmittel für Hartschäume	11	141b	134a	i-Pentan
	12	142b	152a	n-Pentan
		22	365mfc	c-Pentan
			245fa	CO ₂ "not-in-kind"
Lösungsmittel	113	141b	43-10mee	Wasser
			Hydrofluorether	Div. Kohlenwasserstoffe und -derivate
Feuerlöschmittel	Halon-1201		227ea	Wasser, CO ₂ , Pulver, Argon
	Halon-1301			
Treibmittel für Sprays	11	141b	134a	Ether
	12	142b	152a	Butan
			227ea	"not-in-kind"

In Abbildung 3 und Abbildung 4 finden sich Abschätzungen für die europa- bzw. weltweiten Einsatzmengen von H-FKW, FKW und SF₆ differenziert nach Einzelanwendungen für die Jahre 2000, 2010 und 2020. Weitaus am stärksten fallen die Anwendungen in der Kälte- und Klimatechnik (auch Autoklimaanlagen) sowie für die Herstellung von Isolierschäumen ins Gewicht. Europaweit ist bis 2020 mit dem höchsten Anstieg im Bereich der Schäume zu rechnen, weltweit im Bereich der Kälte und Klimatechnik. Diese Differenz ist darauf zurückzuführen, dass weltweit Isolierschäume eine im Vergleich zu kälte- und

⁶ Die Nummerncodierung der Fluor(chlor)kohlenwasserstoffe verläuft nach folgendem Schema: 1. Ziffer (eine 0 wird unterdrückt) = Anzahl der Kohlenstoffatome im Molekül minus eins; 2. Ziffer = Anzahl der Wasserstoffatome plus eins; 3. Ziffer = Anzahl der Fluoratome. Buchstaben hinter der Zahl kennzeichnen den Ort der Substitution; Beispiel: 134a = C₂H₂F₄ bzw. CF₃-CH₂F.

klimatechnischen Anwendungen geringere Marktrelevanz haben als im klimatisch kühlen Europa.

Das Modell (Harnisch et al., 2001) bildet den Einsatz fluorierter Treibhausgase in über 20 technischen Anwendungen ab und berücksichtigt dabei spezifisch für die vier Weltregionen „Europa“, „Nordamerika“, „Japan“ und „Rest der Welt“ den zeitlichen Übergang von ozonschädigenden Substanzen wie FCKW und H-FCKW zu alternativen Stoffen. Der ursprüngliche Zweck des Modells liegt in der Emissionsprognose aus gegebenen Beständen von Stoffen (engl. - den sog. „banks“). Aus den Bestandsveränderungen und den Emissionen lassen sich jedoch auch Abschätzungen für die jeweils eingesetzten Stoffmengen machen. Das Modell wird mit gegenüber der Ausgangsversion von 2001 angepassten Inputdaten (Stand August 2003) betrieben.

Tabelle 4 Auswahl kommerziell relevanter H-FKW-Mischungen (sog. Blends)

Bezeichnung	H-FKW Komponenten	Mischungsverhältnisse [%]
404A	125/143a/134a	44-52-4
407A	32/125/134a	20-40-40
407B	32/125/134a	10-70-20
407C	32/125/134a	23-25-52
410A	32/125	50-50
410B	32/125	45-55
507	125/143a	50-50

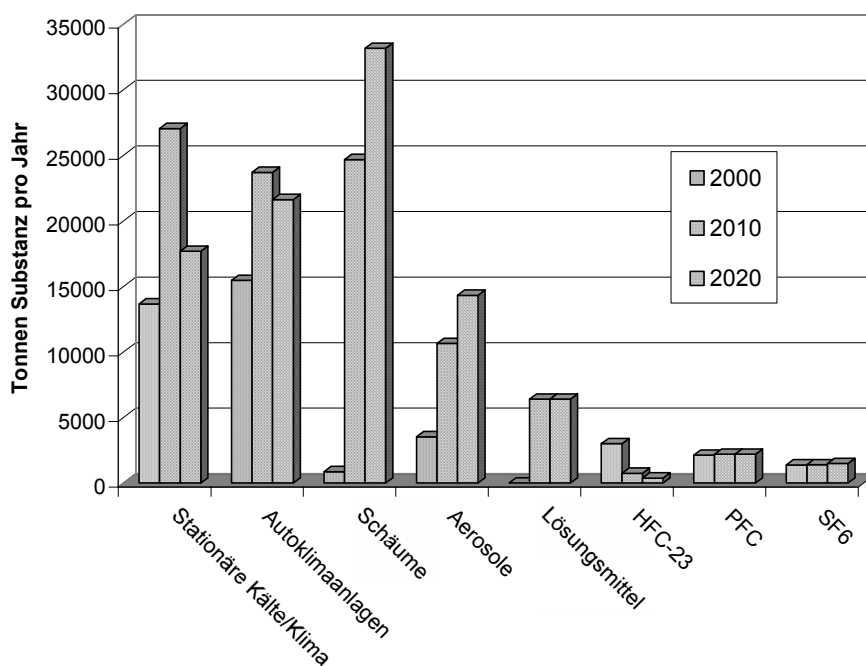


Abbildung 3 Geschätzte europaweite Anwendungsmengen von H-FKW, FKW und SF₆ in verschiedenen Applikation - für die Prozessemissionen „HFC-23“ und „PFC“ ist die Anwendung den Emissionen gleichgesetzt (Modell: Harnisch et al, 2001 – Version: Energy Modeling Forum AUG2003).

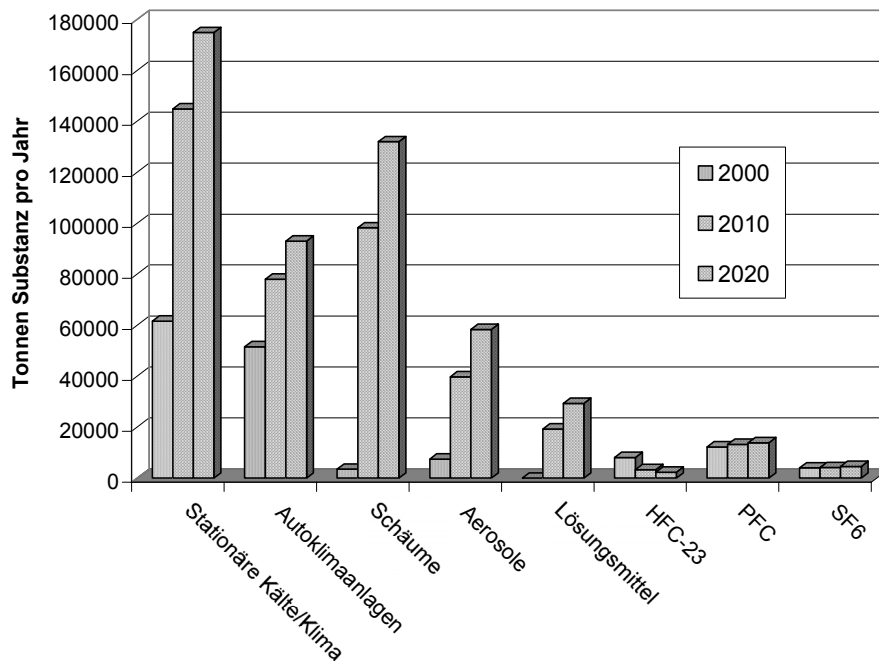


Abbildung 4 Geschätzte weltweite Anwendungsmengen von H-FKW, FKW und SF₆ aus verschiedenen Applikationen - für die Prozessemissionen „HFC-23“ und „PFC“ ist die Anwendung den Emissionen gleichgesetzt (Modell: Harnisch et al, 2001 – Version: Energy Modeling Forum AUG2003).

3.1.3 Herstellung

Zu Energieverbräuchen und Schadstoffemissionen im Zusammenhang mit der Produktion von H-FKW liegen einige Untersuchungen vor. Von zentraler Bedeutung sind die Arbeiten von Banks und Sharrat (1996), Campbell und McCulloch (1998), Banks et al. (1996) sowie von Papasavva und Moomaw (1998). Tabelle 5 listet auf, wie verschiedene H-FKW aus chlorierten bzw. fluorierten Vorläufersubstanzen hergestellt werden. Neben den Energieverbräuchen und Treibhausgasemissionen ist bei Charakterisierung dieser Synthesepfade auf die Emission von Neben- und Zwischenprodukten sowie auf die Beimengung von Nebenprodukten zum Endprodukt zu achten. Soweit sie zum Ozonabbau beitragen, greift hier das Montrealer Protokoll nicht, da es nur Herstellung und Vertrieb von ozonzerstörenden Substanzen für den Endverbrauch, aber nicht für den Weiterverbrauch regelt.

Bei der Reaktion zwischen Trichlorethylen und Fluorwasserstoff entsteht zunächst H-FKW-133a und erst in einem zweiten Reaktionsschritt H-FKW-134a. Hierbei kann es auch zur Entstehung des toxischen ungesättigten H-FCKW 1122 ($\text{CF}_2=\text{CHCl}$) als Nebenprodukt kommen. Abbildung 5 zeigt die in Tabelle 5 genannte 1. Herstellungsrouten für das im Bereich Kälte- und Klimatechnik sowie als Treibmittel für Schäume und Sprays häufig eingesetzte H-FKW-134a.

Tabelle 5 Herstellungsrouten für verschiedene H-FKW

Substanz	Herstellungsrouten	Quelle
H-FKW-134a	1. Hydrofluorierung von Trichlorethen via H-FCKW-133a 2. Isomerisierung / Hydrofluorierung von FCKW-113 zu FCKW-114a mit folgender Dechlorierung 3. Hydrofluorierung von Tetrachlorethen via FCKW-124 4. Hydrofluorierung von Tetrachlorethen via FCKW-114a	Frischknecht (1999b)
H-FKW-32	1. Hydrofluorierung von Dichlormethan 2. Hydrodechlorierung von H-FCKW-22	Frischknecht (1999b)
H-FKW-143a	1. Hydrofluorierung von Trichlorethen 2. Hydrofluorierung von Tetrachlorethen	Frischknecht (1999b)
H-FKW-125	1. Hydrofluorierung von Tetrachlorethen	Frischknecht (1999b)

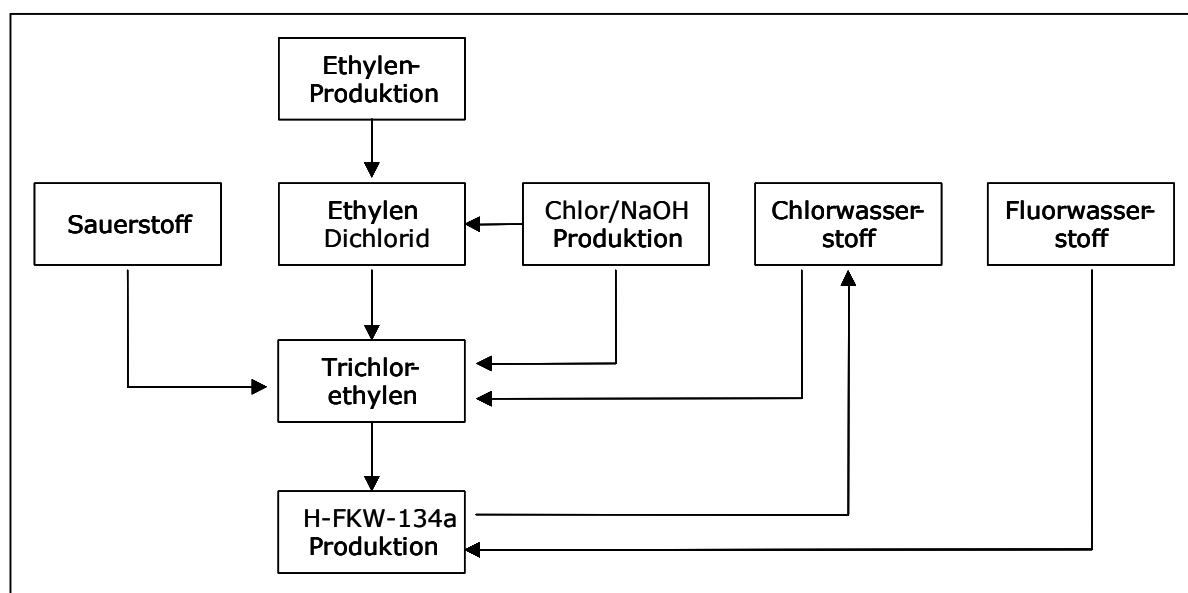


Abbildung 5 Herstellungsrouten für H-FKW-134a

Die Zahlen in Tabelle 6 zeigen recht deutlich, dass die mit dem Energiebedarf der Herstellung von H-FKW verbundenen CO₂-Emissionen gering sind im Vergleich zu dem bei der Freisetzung der Substanz in die Umwelt resultierenden Beitrag zum Treibhauseffekt. Im Vergleich zu den nichthalogenierten Alternativen sind die H-FKW im Bezug auf die Energieintensität ihrer Herstellung klar unterlegen. Die Energieumsätze der Systeme, in denen diese Fluide während ihres Lebenszyklus eingesetzt werden (z.B. Kühl- und Klimaanlage), können jedoch oft erheblich größer sein als der energetisch Herstellungsaufwand für die Substanzen selber (z.B. Campbell und McCulloch (1998), Papasavva und Moomaw (1998) und Frischknecht (1999b)), weshalb eine energetische Bewertung auf Basis des kompletten Lebensweges erfolgen sollte.

Tabelle 6 Spezifische Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen für die Herstellung^a verschiedener H-FKW-134a und Vergleichssubstanzen

	Spez. Energie- verbrauch längs der Prozeßkette [GJ / t]	Treibhausgas- emissionen [t CO ₂ / t]	Direktes Treib- hauspotenzial (100 Jahre)	Quelle
H-FKW-134a	64-105	6-9	1300	Campbell & McCulloch (1998)
Ammoniak	37	2	0	Campbell & McCulloch (1998)
i-Butan	10	0.5	3	Campbell & McCulloch (1998)
c-Pentan	24	1	4	Campbell & McCulloch (1998)

^a Der Brennwert der verwendeten Rohstoffe und das GWP von eventuellen Emissionen von Zwischen-, Neben- und Endprodukten sind nicht mit berücksichtigt

In der Fachdiskussion sind andere ökologisch bedeutsame Aspekte als die zur Herstellung der Substanzen benötigte Energie bislang noch weitgehend unterbelichtet geblieben. Hier sind insbesondere die oben bereits erwähnten Emissionen von Zwischen-, Neben- und Endprodukten während der Herstellung zu nennen, zu denen belastbare Daten leider weitgehend fehlen. Technologische Optionen für eine Minimierung dieser Emissionen (z.B. durch eine zentrale Abgaserfassung und -verbrennung) dürften aber an vielen Produktionsstandorten noch nicht ausgenutzt sein. Banks et al. (1998) schätzen, dass bei der Produktion von H-FKW-227ea aus den verschiedenen Prozessschritten auf die Ausbeute bezogen zwischen 10 und 40% fluoridierte und chlororganischen Nebenprodukten emittiert werden (Tabelle 7). Für die Produktion von H-FKW-134a gibt dieselbe Forschergruppe systematisch geringere Zahlenwerte an (Tabelle 8). Insgesamt ist die Datenlage zu dieser Thematik sehr spärlich. Die Emissionssituation bestimmenden Parameter sind nur unzureichend bekannt.

Tabelle 7 Geschätzte Emissionen (in kg pro t Endprodukt) von Neben- und Zwischenprodukten bei den Produktionsschritten für H-FKW-227ea (Banks et al. (1998)).

Emission	CHCl ₃	CHF ₂ Cl	CHF ₃	CF ₂ =CF ₂	CF ₃ CF=CF ₂	CF ₃ CHFClCF ₃
Produktionsschritt						
HF	-	-	-	-	-	-
Cl₂	-	-	-	-	-	-
CHCl₃	4-39	-	-	-	-	-
CHF₂Cl	4-39	21-63	34-100	-	-	-
CF₃CF=CF₂	-	8-35	-	23-54	18-28	-
CF₃CHFClCF₃	-	-	-	-	5-10	5-10

Tabelle 8 Geschätzte Emissionen (in Kilogramm pro Tonne Endprodukt) von Nebenprodukten bei den Produktionsschritten für H-FKW-134a (Banks und Sharatt (1996)).

	Emission
Trichlorethylen	1,5
Dichlorethylen	22
Tetrachlorethylen	0,4
Vinylchlorid	10
Ethylendichlorid	6
Vinylidenchlorid	0,5
H-FCKW-1122	0,0006
Sonst. Chlorierte KW	4,0
H-FCKW-133a	5,0
H-FKW-134a	1,9
H-FKW-143a	8,0
H-FKW-125	0,5
Gesamt	60

3.1.4 Entsorgung

Die Entsorgung von H-FKW losgelöst von der Anwendung auf ihr Umweltprofil hin zu diskutieren ist wegen der in der Praxis stark variierenden Nutzungsbedingungen nur begrenzt sinnvoll. Grundsätzlich sind folgende Entsorgungswege denkbar:

- a) Ablassen in die Umwelt – in vielen Anwendungen nach wie vor der Regelfall,
- b) Absaugen (oder Extraktion) und Auffangen der H-FKW / H-FKW-haltigen Gemische mit
 - Direkter Wiederverwendung durch Anwender oder Installateur
 - Zentraler Aufarbeitung (Hersteller oder Recyclingfirma)
 - Zentraler Vernichtung (Hersteller oder Sondermüllverbrennungsanlage)
- c) H-FKW werden mit dem Produkt zusammen entsorgt (z.B. Isolierschäume)
 - Deponierung des Produktes
 - Thermische Entsorgung des Produktes
 - Stoffliche Weiterverwendung (vgl. b))

Eine ökologische Bewertung der einzelnen Entsorgungspfade kann im Rahmen dieser Studie nicht erfolgen. Es liegt auf der Hand, dass a) die ökologisch schlechteste Variante darstellt, aber die Verluste von H-FKW in die Atmosphäre auch unter b) und c) z.B. beim Zerkleinern von Isolierschäumen (sofern überhaupt möglich) weitgehend vermieden werden sollten. Die zusätzlichen Kosten, die bei der Rückholung und Behandlung am Ende der Lebensdauer anfallen, sind bei einer Betrachtung der Gesamtkosten eines Systems mit zu berücksichtigen.

3.2 Emissionsprognose

Tabelle 9 zeigt Emissionsfaktoren für die Freisetzung fluorierter Treibhausgase während der Herstellung, Verwendung sowie der Entsorgung. Es zeigt sich, dass die Emissionen während der drei genannten Schritte des Lebensweges für verschiedene Anwendungen sehr unterschiedlich ausfallen. Den bedeutendsten Anteil macht aber in den meisten Fällen die

Emission während der Anwendung aus. Aufgrund von Nachbefüllungen während der Betriebszeit oder eine Rückgewinnung bei der Entsorgung können die Gesamtemissionen über den Lebensweg größer oder kleiner 100% sein.

Tabelle 9 Emissionsfaktoren für den Einsatz von H-FKW in verschiedenen Anwendungen für 2010 (March (1999)).

Anwendungen	Emissionsfaktor Herstellung [% Masse]	Emissionsfaktor Anwendung [% Masse p.a.]	Emissionsfaktor Entsorgung [% Masse]	Lebensdauer [Jahre]
Kälte und Klimatechnik				
Haushaltskühlschränke	1	1	20	13
Gewerbekälte	2	10	5	13
Industriekühlung	2	6	5	25
Mobile Klimaanlage	1	8	25	12
Treibmittel für Hartschäume				
PU-Schäume in Haushaltsgeräten	3	0,25	60	12
PU-Schäume in diskontinuierlichen Panels	10	0,5	25	50
PU-Schäume in kontinuierlichen Panels	5	0,5	20	50
XPS-Schäume	25	4	0	50
Treibmittel für Sprays				
Aerosole Allg.	1	96	3	
Dosieraerosole	1	96	3	

Emissionsprognosen für die Jahre 2010 und 2020 für Bundesrepublik, Europa sowie die ganze Welt finden sich in Abbildung 6, Abbildung 7 und Abbildung 8. Die Daten für die Bundesrepublik sind konsistent mit den Datensätzen der nationalen Berichterstattung [Öko-Recherche, 2003]. Die Daten für Europa wurden mit dem von Harnisch et al. [2001] beschriebenen Emissionsmodell generiert – basierend auf aktualisierten Input-Daten und Annahmen mit Stand 2003.

Es zeigt sich in den Prognosen, dass in einzelnen Anwendungen für 2020 in der BRD und in Europa ein Maximum der Emissionen erwartet wird, da die Umstellung weg von ozongefährdenden Substanzen dann weitgehend abgeschlossen sein wird, die spezifischen Emissionsraten aufgrund verbesserter Technik absinken und das langsame Wachstum der Anwendungen diese Gewinne nicht aufzehrt. Das weltweite Bild ist ein durchaus anderes: es zeigt sich ein Anstieg der Emissionen bis weit über das Jahr 2020 hinaus, was sich auch eindrucksvoll im Anwachsen des H-FKW-Bestandes in den Hauptanwendungen manifestiert (Abbildung 9). Die Industrieländer und hier vor allem Europa wird hier eine wichtige Vorreiterrolle für den verantwortungsvollen Umgang mit diesen Technologien zukommen.

Am Beispiel von Autoklimaanlagen ist in Abbildung 10 dargestellt, wie weltweit der jährliche Einsatz von H-FKW-134a in dieser Anwendung den schrittweisen Aufbau eines vergleichsweise großen Kältemittelbestandes in der PKW-Flotte nach sich zieht, der von entsprechenden Kältemittelemissionen während der Verwendungsdauer und zeitverzögert auch aus der Entsorgung begleitet wird. Eine analoge Entwicklung findet auch bei den anderen kältetechnischen Anwendungen sowie bei den Hartschäumen statt.

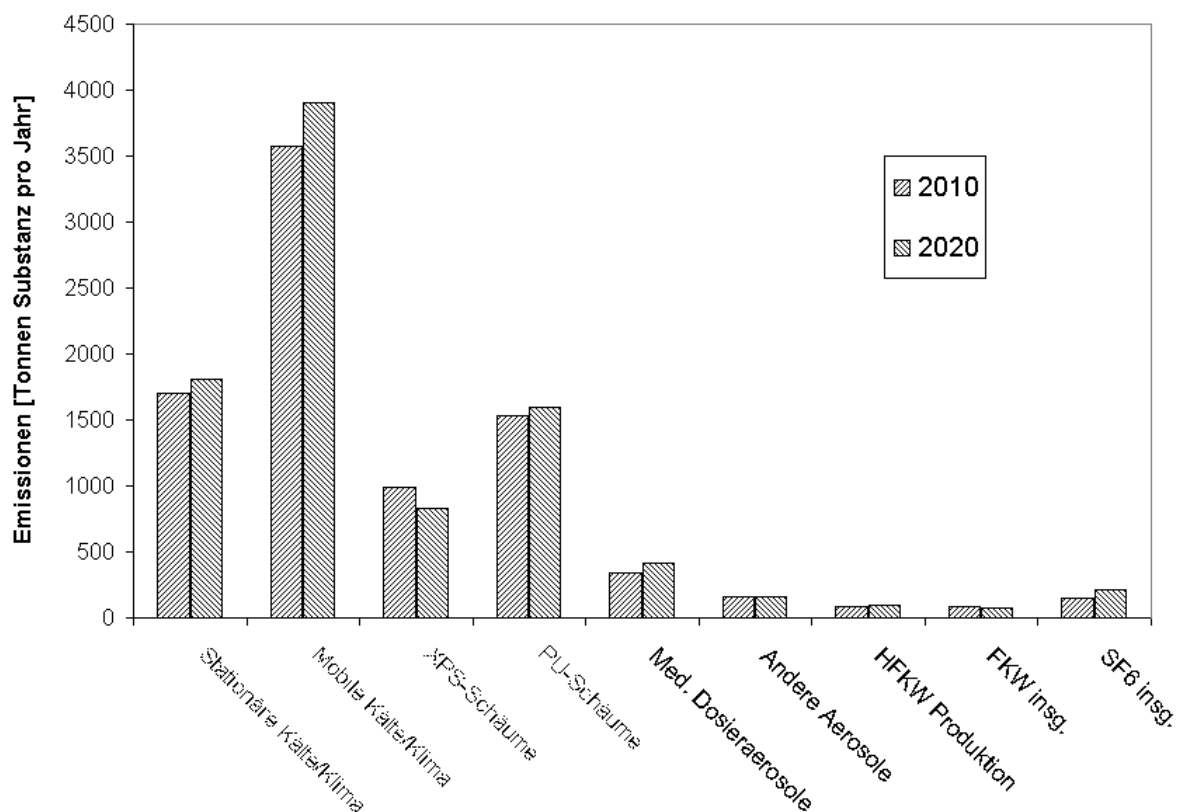


Abbildung 6 Emissionsprojektion („Mit Maßnahmen“) Deutschland für H-FKW, FKW und SF₆ (Öko- Recherche (2003))

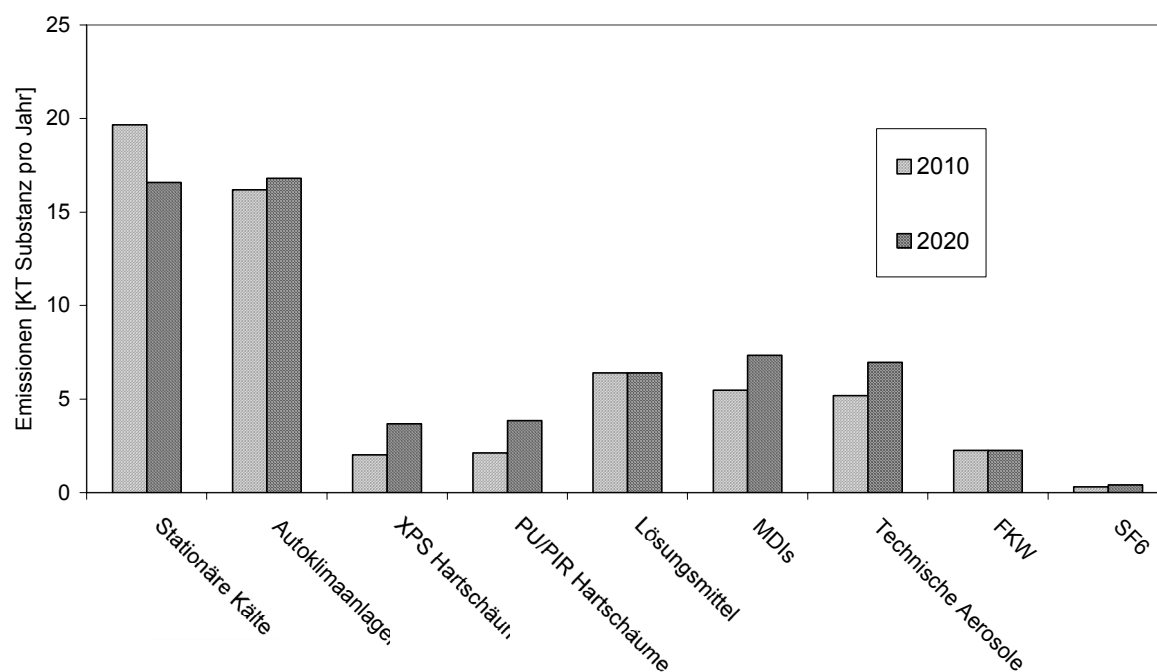


Abbildung 7 Emissionsprojektion Europa für H-FKW, FKW und SF₆ (Modell: Harnisch et al., 2001 – Version: Energy Modeling Forum AUG2003)

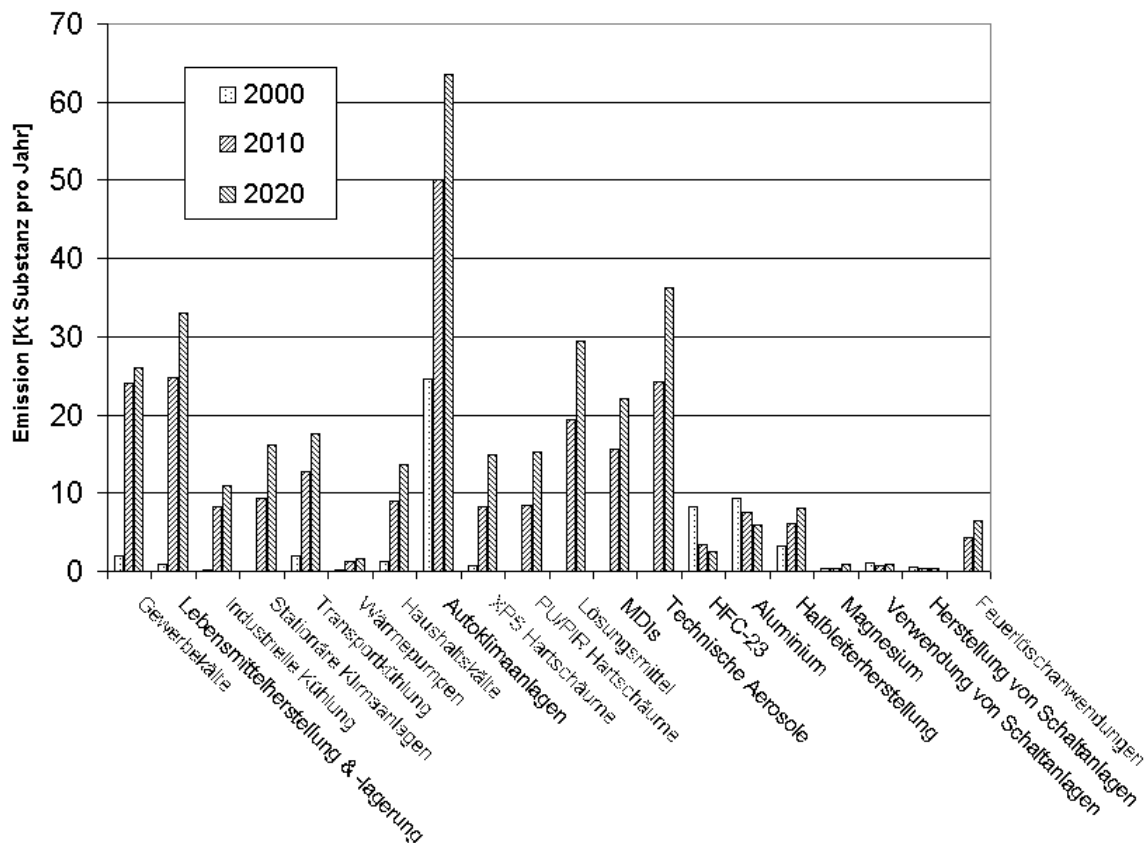


Abbildung 8 Emissionsprojektion weltweit für H-FKW, FKW und SF₆ (Modell: Harnisch et al., 2001 – Version: Energy Modeling Forum AUG2003)

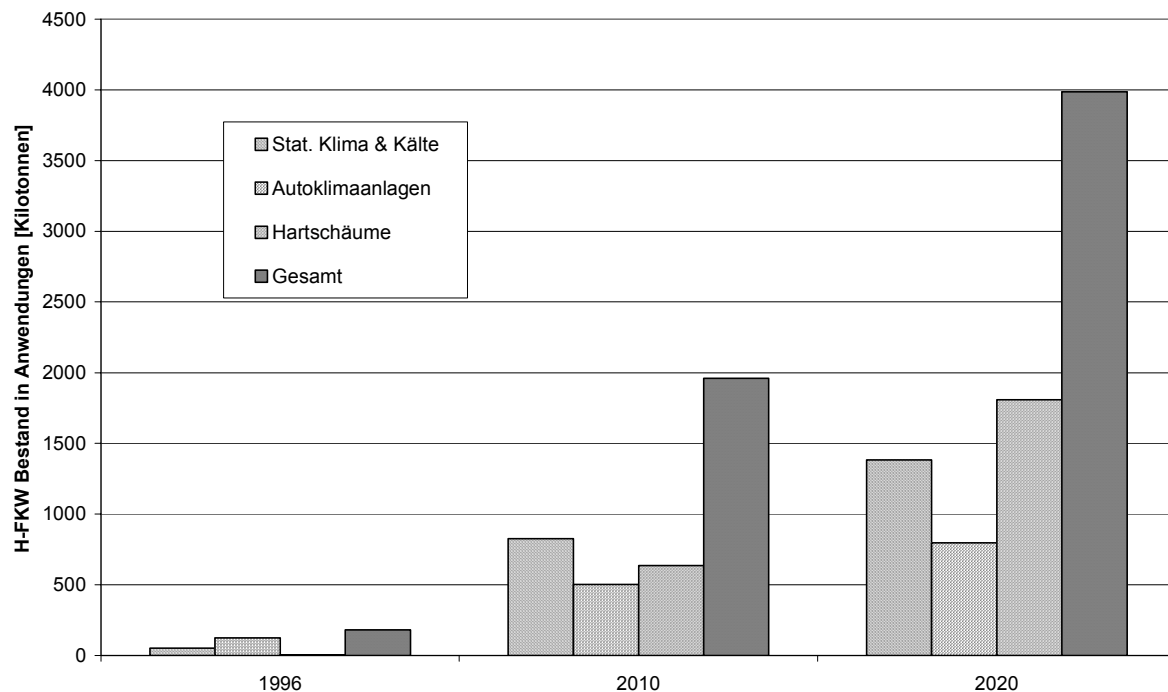


Abbildung 9 Weltweite Entwicklung des H-FKW Bestandes („Banks“) in den Hauptanwendungen (Modell: Harnisch et al., 2001 – Version: Energy Modeling Forum AUG2003)

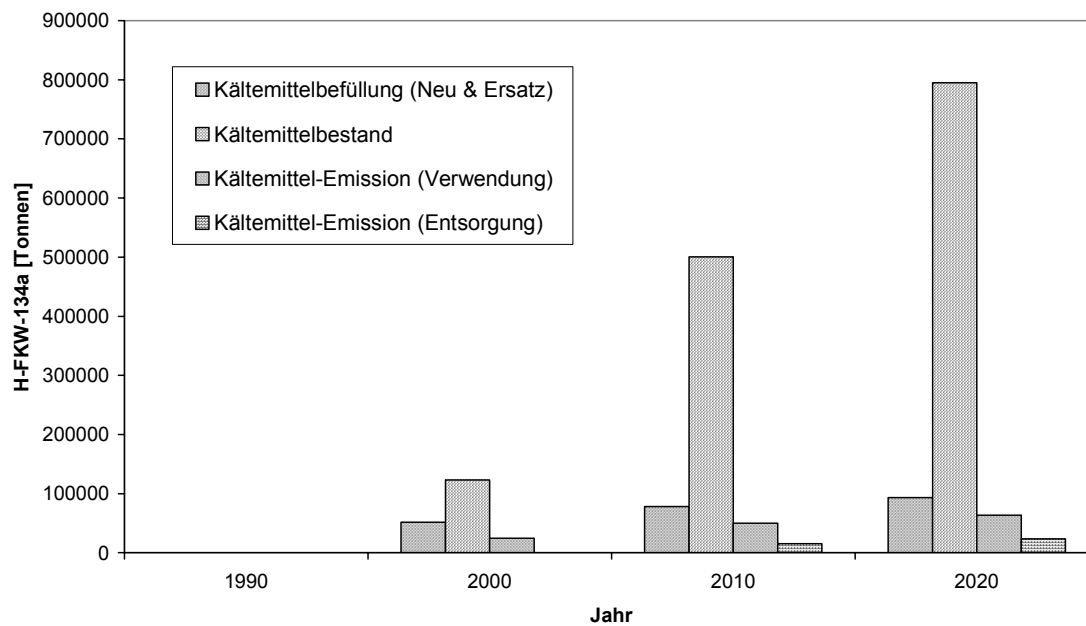


Abbildung 10 Der sich ausdehnende Einsatz von H-FKW-134a in Autoklimaanlagen (weltweit): Gegenüberstellung der Befüllung mit dem Kältemittel H-FKW-134a (Neu & Ersatz), der Entwicklung des Kältemittelbestandes und der Kältemittlemissionen während der Verwendung und aus der Entsorgung. (Modell: Harnisch et al., 2001 – Version: Energy Modeling Forum AUG2003).

3.3 Zusammenfassung

Produktion: Fluorierte Treibhausgase werden im allgemeinen über Synthesewege hergestellt, die auf chlorierten Vorläufersubstanzen beruhen, deren jeweiliger "ökologischer Fußabdruck" (Stichwort: Chlorchemie) einschließlich diffuser Emissionen von halogenierten Zwischen- und Nebenprodukten (inklusive ihrer Beimengung zum Produkt) zu beachten ist. Letztere sind allesamt nur unzulänglich charakterisiert. Der spezifische Energieverbrauch und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen für die Herstellung von fluorierten Treibhausgasen sind erheblich größer als für alternative Kältemittel.

Anwendungen:

Fluorierte Treibhausgase werden hauptsächlich in den folgenden Anwendungsbereichen eingesetzt:

- Kälte und Klimatechnik
- Treibmittel für Hartschäume
- Lösungsmittel
- Feuerlöschmittel
- Treibmittel für Sprays

Gegenwärtig halten hier den höchsten Anteil der Gesamtemissionen die Kälte und Klimatechnik, sowie Treibmittel für Hartschäume. Der Kältemittelbestand in diesen Hauptanwendungen wächst von knapp 200.000 Tonnen in 1996 auf knapp 2 Mio Tonnen bis 2010, um dann auf etwa 4 Mio Tonnen im Jahre 2020 anzuwachsen.

Entsorgung: Bei der Entsorgung von Produkten, die H-FKW enthalten, besteht neben dem sorglosen Freisetzen die Möglichkeit, die H-FKW entweder vor der Entsorgung des Produktes zu extrahieren und separat zu behandeln oder aber das Produkt als ganzes zu entsorgen. Auf jeden Fall sollte vermieden werden, dass H-FKW z.B. beim Zerkleinern des Produktes in nennenswertem Umfang in die Umwelt entweichen. Bei einer thermischen Behandlung von H-FKW-haltigen Abfällen ist eine ordnungsgemäße Abgasbehandlung sicherzustellen, um erhöhte Emissionen von Fluorid in der Abluft zu vermeiden. In den meisten Fällen bestehen diese Entsorgungspfade zur Zeit noch nicht.

Verwendung und Emissionen: Für das Jahr 2020 kann von einem weltweiten Marktvolumen von bis zu 500.000 t fluorierter Treibhausgase pro Jahr ausgegangen werden. Auf Europa entfallen davon maximal 100.000 t. Die damit verbundenen Jahresemissionen in die Umwelt könnten bis zum Jahr 2020 etwa 330.000 Tonnen verschiedener fluorierter Treibhausgase weltweit und etwa 60.000 Tonnen in Europa betragen. Davon würden Fluorkohlenstoffe und SF₆ mengenmässig etwa 5% ausmachen. Sowohl in der Verwendung wie auch auf der Emissionseite dominieren die H-FKW damit das Gesamtbild. Im weiteren Verlauf der Studie wird aus diesem Grunde an vielen Stellen ein klarer Schwerpunkt auf die H-FKW gesetzt.

4 Fluorierte Treibhausgase in der Umwelt

Eine Vielzahl von Untersuchungen wurde während der 90er Jahre zum Verhalten fluorierter Treibhausgase in der Umwelt durchgeführt. Diese Studien wurden zu einem Großteil von einem Konsortium der großen Hersteller von FCKW und H-FCKW unter dem Projektnamen AFEAS (Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study) betrieben. Darüber hinaus hat es aber auch eine beträchtliche Anzahl staatlicher Forschungsvorhaben zu einzelnen Facetten des Umweltverhaltens fluorierter Treibhausgase (meist H-FKW) in speziellen Anwendungen gegeben. Dieses Kapitel wird die relevanten Aspekte der Reihe nach aufgreifen. Das Umweltverhalten der Perfluorkohlenstoffe und von Schwefelhexafluorid, die sehr viel stabiler sind und sich teils schon über Jahrzehnte mit vergleichsweise geringen Volumina am Markt befinden, ist dagegen weniger gut charakterisiert.

Prioritär untersucht wurden in der Vergangenheit ausgewählte Aspekte des Umweltverhaltens fluorierter Treibhausgase und ihrer Substitute, was vor allem auf die Schwerpunktsetzungen innerhalb der AFEAS-Initiative sowie auf die Erfordernisse im Rahmen der Zulassungsverfahren zurückzuführen ist. Publierte Untersuchungen befassten sich deshalb vor allem mit folgender Auswahl aus den Wirkungskategorien der Society of Toxicology and Environmental Chemistry (SETAC) (vgl. UBA 1999d): Treibhauseffekt, Ozonzerstörung, Ozonbildung, Umwelttoxizität und Humantoxizität. Die Wirkungskategorien Versauerung, Eutrophierung, Lärmentstehung, Emission radioaktiver Isotope oder Natur- und Ressourcenbeanspruchung wurden in der Regel für fluorierte Treibhausgase und ihre potenziellen Substitute aufgrund mangelnder spezifischer Relevanz, wie sie sich z.B. in der umfassenden Untersuchung von Frischknecht (1999a und 1999b) zeigt, nicht vertieft untersucht. Vor diesem Hintergrund werden im Rahmen dieses Kapitels die Wirkungskategorien Treibhauseffekt, Ozonzerstörung, Ozonbildung, Umwelttoxizität und Humantoxizität, Versauerung und Eutrophierung in Hinblick auf eine Identifikation spezifisch besonders relevanter Wirkungskategorien vertieft betrachtet.

4.1 *Abbau in der Atmosphäre*

Vor dem Hintergrund des durch die Emission halogener Verbindungen ausgelösten Ozonlochs wurde ein Hauptschwerpunkt der Untersuchungen auf die homogene Luftchemie der Ersatzstoffe gelegt. Als Hauptabbauwege wurden die Reaktion mit dem Hydroxylradikal in der Troposphäre sowie bei ausreichender Stabilität auch Reaktionen mit Sauerstoffradikalen ($O(^1D)$) und Photolyse in der Stratosphäre identifiziert (WMO, 1995; WMO, 1999). Der Abbau extrem langlebiger fluorierter Stoffe wie CF_4 und SF_6 findet dagegen erst in der Mesosphäre z.B. durch Elektroneneinfang statt (Ravishankara et al. 1993). Im Detail sind diese Mechanismen und ihre Kinetik nur höchst unzulänglich bekannt.

4.1.1 Hauptabbauwege

In der Literatur wird davon ausgegangen, dass der Abbau der weniger stabilen fluorierten Treibhausgase in der Troposphäre unabhängig von der Substanz nach einem zunächst einheitlichen Schema verläuft (Abbildung 11), das sich auf relevante Weise nur in der Aufzweigung in Endprodukte nach Bildung des Haloalkoxyradikals unterscheidet. Beispielhaft seien hier die atmosphärische Oxidation von H-FKW-32 (Abbildung 12), von H-FKW-134a (Abbildung 13) und von H-FKW-125 (Abbildung 14) diskutiert, da der Abbauweg von H-FKW-32 vergleichsweise einfach ist, der von H-FKW-134a die Verzweigung zu Trifluoressigsäure enthält, die bei H-FKW-125 trotz der großen Ähnlichkeit fehlt.

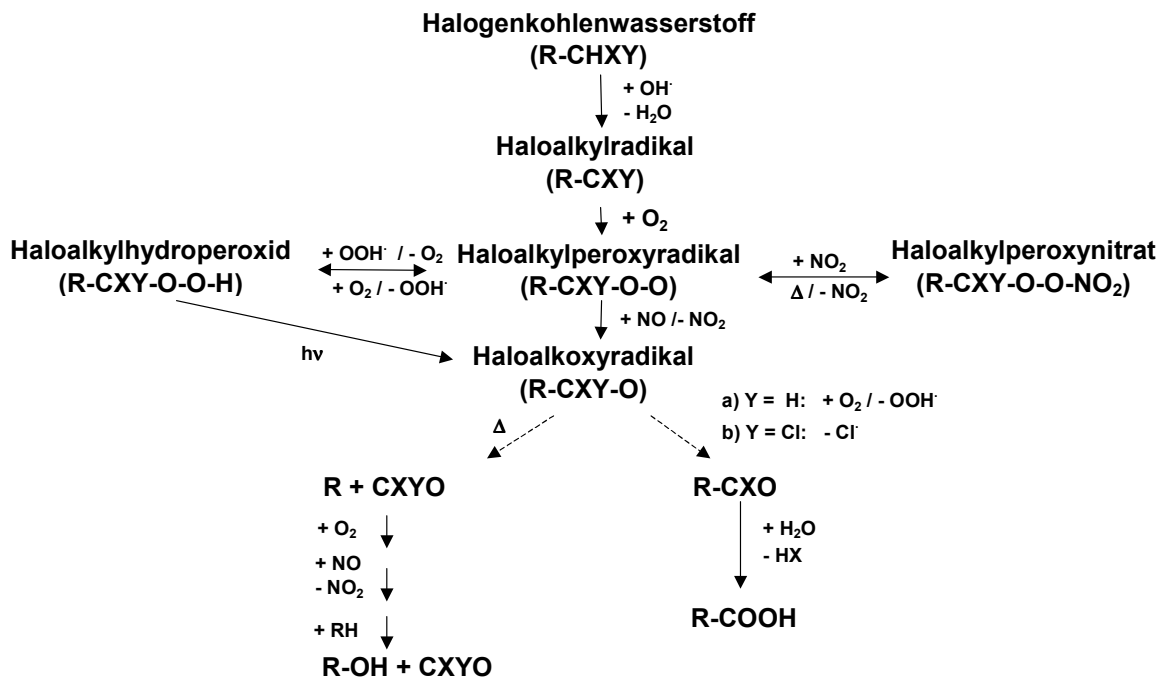


Abbildung 11 Schematische Darstellung des Abbauweges von Halogenkohlenwasserstoffen in der Troposphäre.

Bei allen drei Reaktionswegen ist dabei der erste Reaktionsschritt weitgehend gleich: Nach einer Reaktion des H-FKW mit dem Hydroxyl-Radikal (H-Abstraktion) (in den Abbildungen von der 1. zur 2. Ebene) bildet sich das jeweilige Alkyl-Radikal, das sofort durch Reaktion mit molekularem Sauerstoff zu einem Peroxyradikal weiter reagiert (in den Abbildungen von der 2. zur 3. Ebene). Der Abbau kann nun über drei Wege weitergehen: mit HO₂ (3. Ebene nach links) oder NO₂ (3. Ebene nach rechts) zu dem entsprechenden Hydroperoxid oder Peroxynitrat bzw. durch NO (von der 3. in die 4. Ebene), das zu einem Alkoxyradikal reduziert werden kann. Dieses bildet auch das Zerfallsprodukt des Hydroperoxids und des Peroxynitrats, wenn die Rückreaktion zum Peroxyradikal ausbleibt. Dieses Radikal ist sehr instabil mit einer Lebensdauer von <1ms. Aus seinem Zerfallsweg ergibt sich die Verteilung der Endprodukte. Bei Verbindungen, in denen es ein weiteres Wasserstoffatom an dem Kohlenstoffatom gibt, das benachbart zum Sauerstoffradikal ist, kann sich die Verbindung durch Abgabe eines Wasserstoffatoms an ein Sauerstoffmolekül stabilisieren. Ist an dem Kohlenstoffatom, das benachbart zum Sauerstoffradikal ist, kein Wasserstoff, aber ein Chlor- oder Bromatom gebunden, können diese als Radikale abgespalten werden. Dabei entstehen jeweils Carbonylverbindungen (Aldehyde oder Säurehalogenide). Ist mindestens ein C2-Körper vorhanden, so existiert mit der Spaltung der C-C Bindung ein weiterer Kanal hin zu stabilen Abbauprodukten, der in Konkurrenz zu der Reaktion mit Sauerstoff bzw. der Abspaltung von Halogenradikalen steht. Verbindungen wie CF₃OH und CF₂O zerfallen dabei in Gegenwart von flüssigem Wasser zu HF und CO₂.

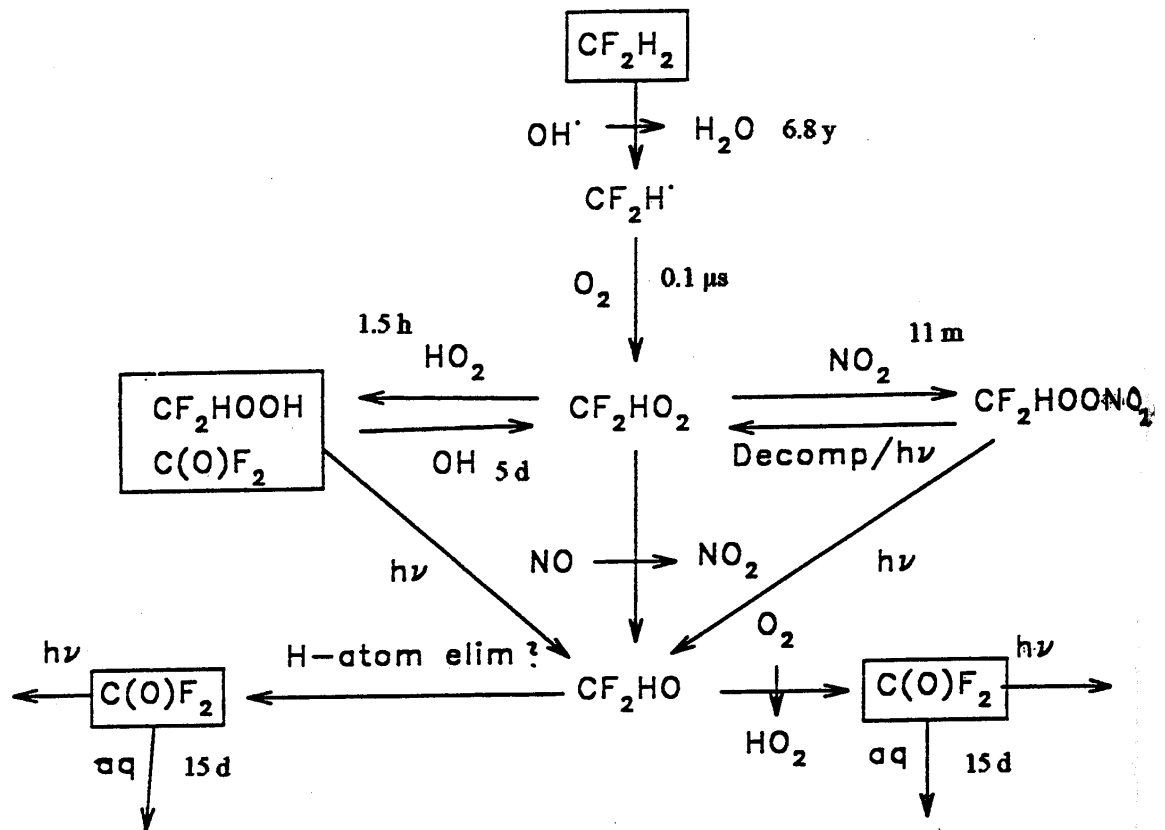


Abbildung 12 Übersicht über Abbauewege von H-FKW-32 (NASA/NOAA/AFEAS, 1993).

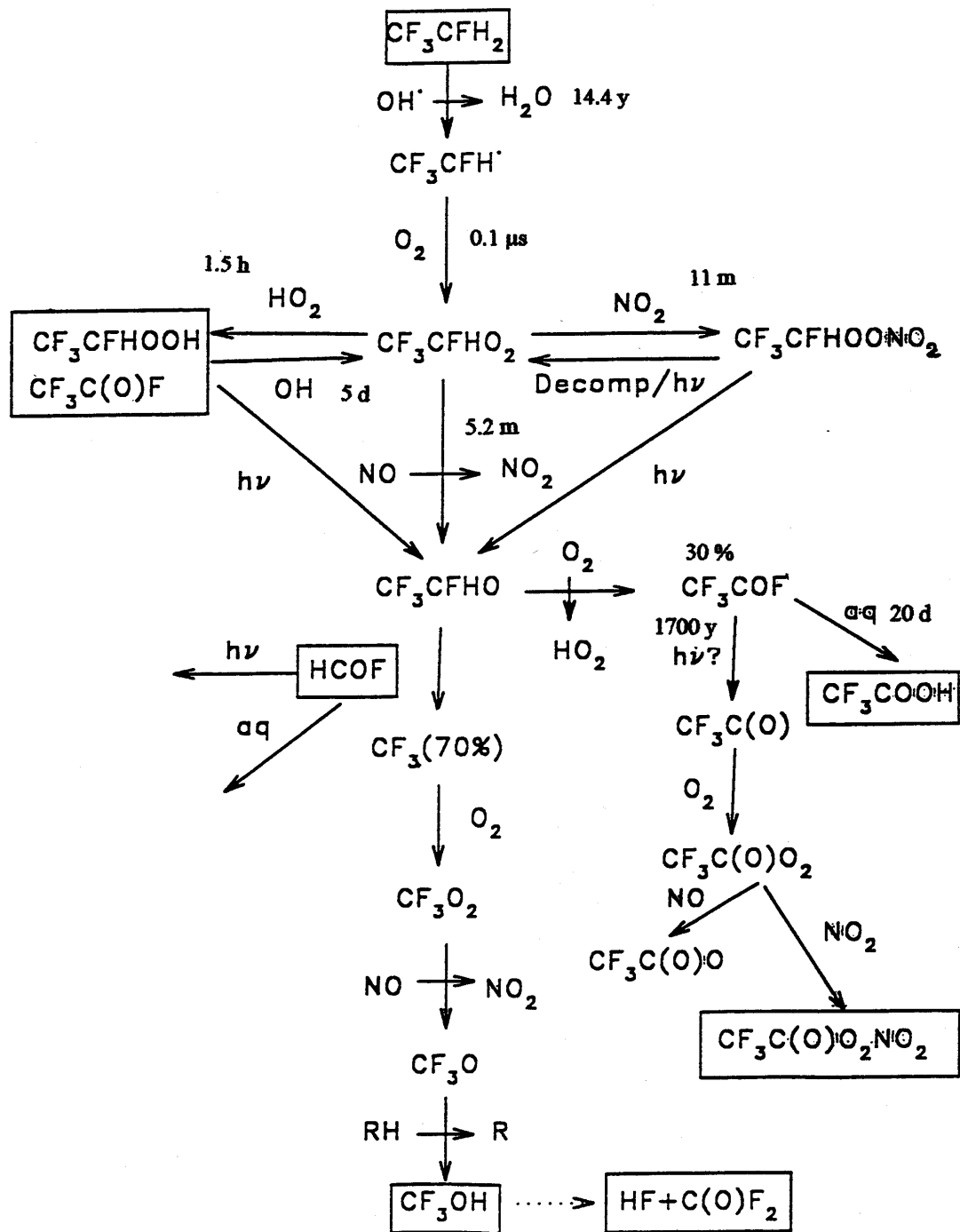


Abbildung 13 Übersicht über Abbauewege von H-FKW-134a (NASA/NOAA/AFEAS, 1993).

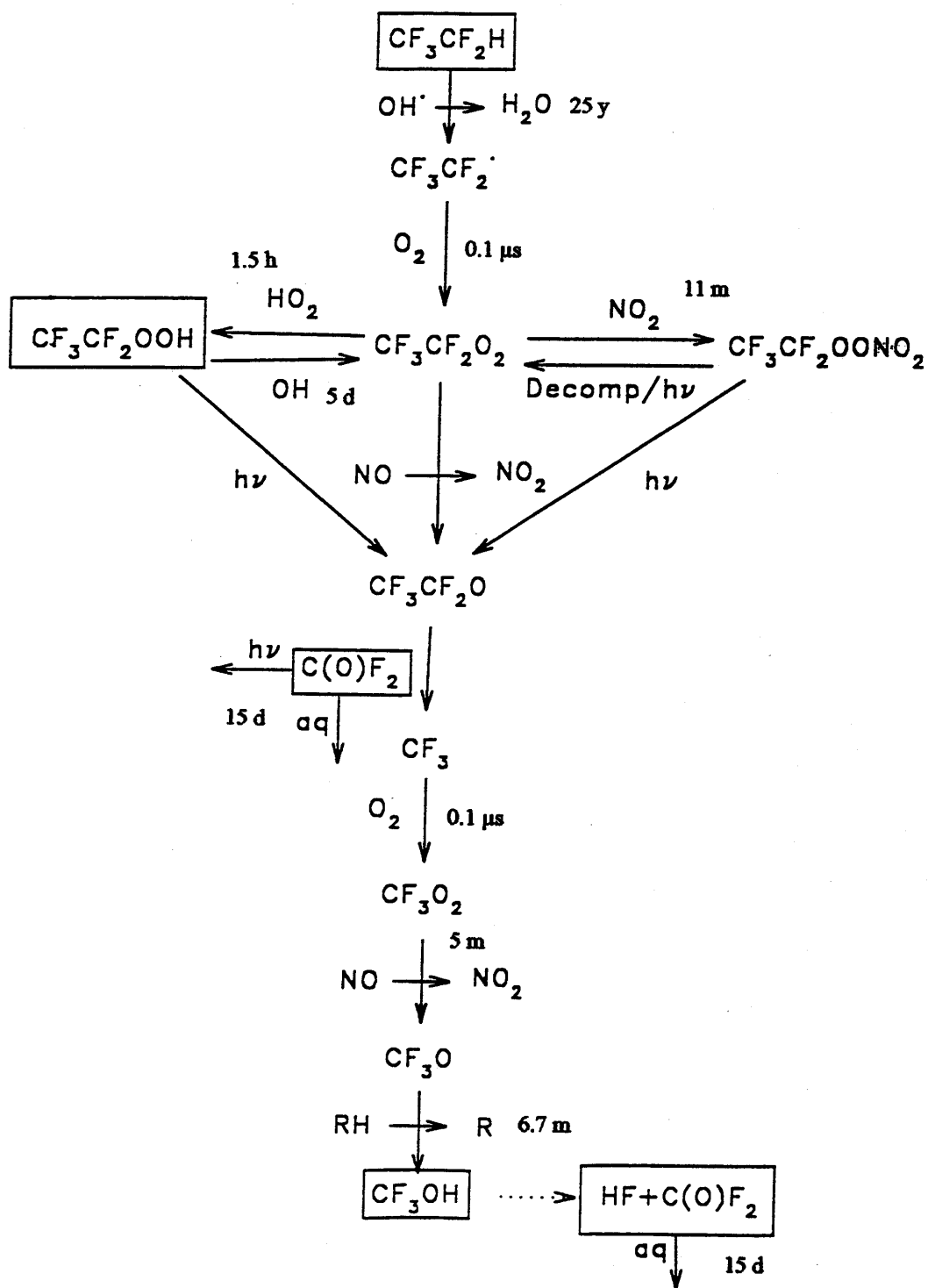


Abbildung 14 Übersicht über Abbaupfade von H-FKW-125 (NASA/NOAA/AFEAS, 1993).

Tabelle 10 Abbauprodukte verschiedener fluorierter Treibhausgase in der Atmosphäre

Substanz	Formel	Fluorierte Abbauprodukte
H-FKW-134a	$\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$	HF, CF_3COOH
H-FKW-365mfc	$\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CF}_2\text{CH}_3$	HF, CF_3COOH
H-FKW-245fa	$\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CHF}_2$	HF, CF_3COOH
H-FKW-245ca	$\text{CH}_2\text{FCF}_2\text{CHF}_2$	HF
H-FKW-143a	CF_3CH_3	CF_3COOH
H-FKW-227ea	$\text{CF}_3\text{CHFCH}_2\text{CF}_3$	HF, CF_3COOH
H-FKW-152a	CHF_2CH_3	HF
H-FKW-32	CH_2F_2	HF
H-FKW-125	CF_3CHF_2	HF
H-FKW-43-10mee	$\text{CF}_3\text{CHFCHFC}_2\text{F}_5$	HF, CF_3COOH
	CF_4	HF
	SF_6	HF

Eine Übersicht über die Hauptabbauprodukte von fluorierten Treibhausgasen gibt Tabelle 10. Es ist hervorzuheben, dass die in diesem Abschnitt beschriebenen Reaktionswege die Hauptabbaupfade in der Gasphase (homogene Chemie) beschreiben. Es ist davon auszugehen, dass mit geringer Ausbeute bei den komplizierteren Vorläufersubstanzen auch andere Produkte entstehen.

4.1.2 Verbleib der Abbauprodukte

Geht man zunächst davon aus, dass die einschlägigen Modellierungen der Luftchemie der H-FKW die Abbauewege der H-FKW im wesentlichen vollständig und qualitativ richtig abbilden, so stellt sich ausschließlich die Frage nach dem Verbleib der beiden fluorierten Abbauprodukte Fluorwasserstoff und Trifluoressigsäure (TFA).

4.1.2.1 Fluorwasserstoff bzw. Fluoride

Fluorwasserstoff bzw. Fluorid sind die Hauptabbauprodukte von H-FKW. Sie gehören zu den klassischen Luftschadstoffen, die in der Vergangenheit auch in Deutschland zu größeren Schadereignissen an Pflanzen und Weidetieren geführt haben. Strenge Auflagen für die Emissionen aus den entsprechenden Betrieben haben das Problem hierzulande aber praktisch zum Verschwinden gebracht. In zahlreichen Ländern sind Fluoridemissionen aus der Verbrennung minderwertiger Kohle von gravierender human-toxischer Relevanz. Die global abregnenden Mengen von HF/F^- , die aus H-FKW stammen, führen maximal zu Konzentrationen im Niederschlag, die um etwa fünf Größenordnungen unter den entsprechenden Schadschwellen für Landpflanzen liegen (vgl. Abbildung 15).

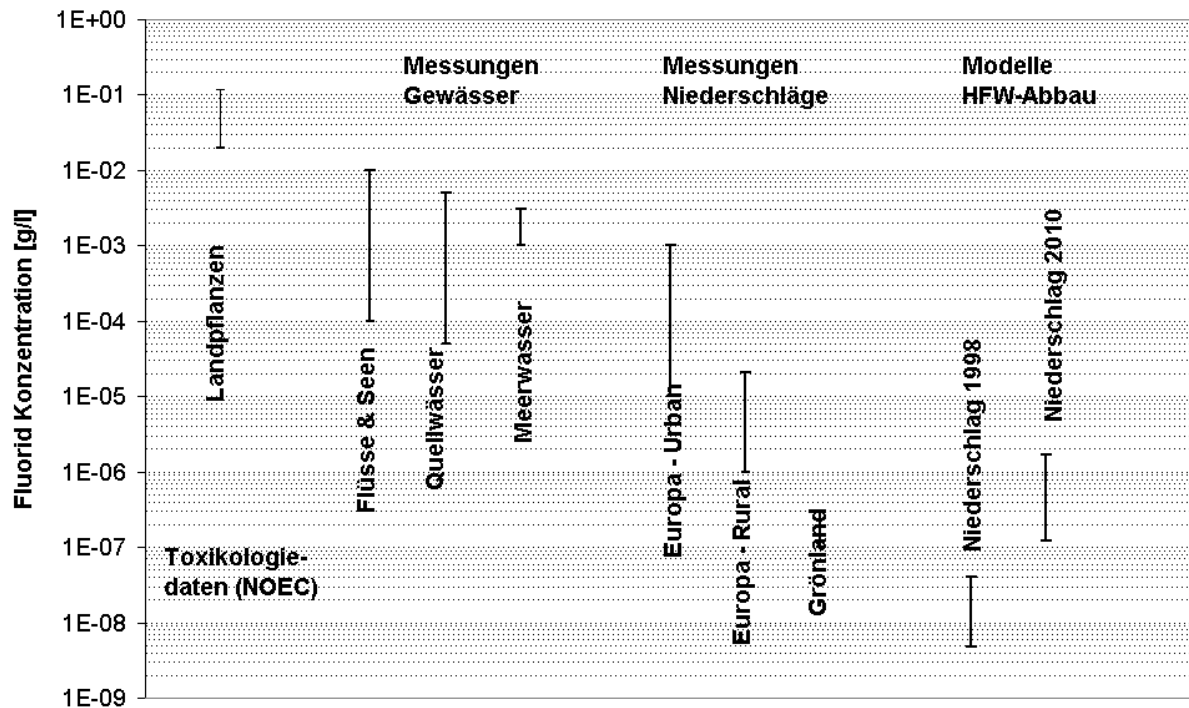


Abbildung 15 Übersicht (schematisch) über umwelttoxikologische Wirkschwellen von Fluoridionen, in der Umwelt gemessene Konzentrationen und von Modellen prognostizierte Fluorid-Gehalte im Niederschlag aus dem Abbau von H-FCKW und H-FKW. Quellen: Allmann und Koritnig (1978); Smith and Hodge (1979)

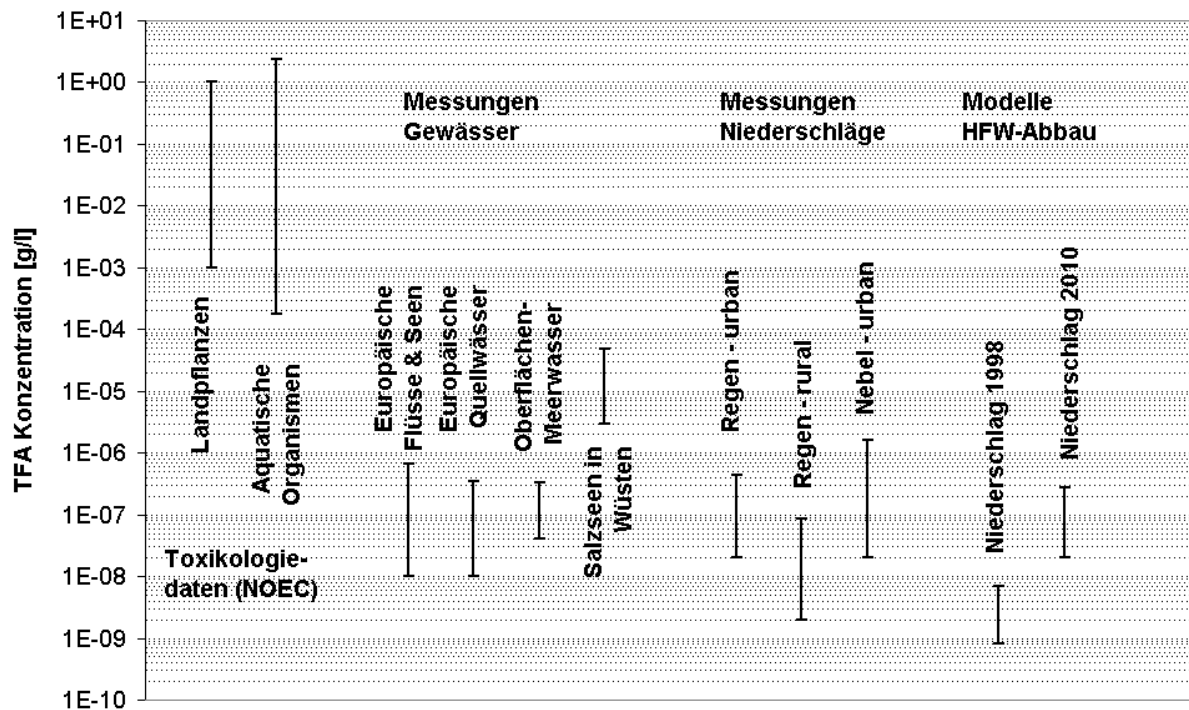


Abbildung 16 Übersicht (schematisch) über umwelttoxikologische Wirkschwellen von TFA, in der Umwelt in den Jahren 1995-98 gemessene Konzentrationen und von Modellen prognostizierte TFA-Gehalte aus dem Abbau von H-FCKW und H-FKW.

4.1.2.2 TFA

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 TFA nach wie vor große Unsicherheiten (Tromp et al. (1995), Frank et al. (1996)).

So blieb es in der Literatur bislang umstritten, ob TFA über biologische Abbauewege verfügt oder sich im wesentlichen in der Umwelt anreichert (z.B. Visscher et al. (1994), Emptage et al. (1997), Kim et al. (2000)). Die Wirkung von TFA auf verschiedene Typen von Organismen ist dank zahlreicher Arbeiten aus den 90er Jahren recht gut charakterisiert (z.B. Boutonnet et al. (1999)). Ungeklärt ist dagegen, aus welchen Quellen die TFA stammt, die heute bereits in Niederschlägen und Oberflächengewässern gefunden wird. Die Hauptquelle von TFA stellt nach heutiger Kenntnis der Abbau von H-FKW-134a dar, wobei die molare Ausbeute etwa 33% beträgt. Weitere TFA-Quellen ergeben sich aus dem Abbau anderer Moleküle, welche die CF_3 -Gruppe enthalten, wie H-FCKW-123 und H-FCKW-124, jeweils mit 100% Ausbeute (Kotamathi et al., 1998). Insgesamt reichen die bislang emittierten H-FKW und H-FCKW aber bei weitem nicht aus, im Niederschlag und im Oberflächenwasser gefundene TFA-Konzentration zu erklären (z.B. Frank et al. (1996), Wujcik et al. (1999), Berg et al. (2000); Römpf et al. (2001)). In Abbildung 16 wird ein Überblick über in den Jahren 1995-1998 gemessene Konzentrationen von TFA in wässrigen Proben gegeben, und diese werden mit Ergebnissen von Modellsimulationen für den Abbau von H-FCKW und H-FKW verglichen sowie Werten gegenübergestellt, die als ökotoxikologisch für verschiedene Spezies als noch unbedenkliche Konzentrationen (NOEC) gelten. Es zeigt sich, dass die in der Umwelt gemessenen TFA-Konzentrationen um einige Größenordnungen unter den Unbedenklichkeitsschwellen auch der empfindlichsten Algenarten besteht. Die meisten der getesteten Spezies zeigten sich dagegen auch gegen hohe TFA-Expositionen unempfindlich (AFEAS, 1999; Wiegand et al. (2000), Benesch und Gustin (2002), Benesch et al. (2002)). Die hohen, in Salzseen nachgewiesenen Konzentrationen stellen hier eine Ausnahme dar - in diesem Milieu heimische Mikroorganismen und Algen dürften aber ohnehin über Anpassungsstrategien gegenüber höheren Salzkonzentrationen verfügen.

Verschiedene anthropogene (Jordan und Frank (1999); Ellis et al. (2001); Ellis et al. (2003)) wie auch natürliche (Harnisch et al. (1999)) Quellen wurden vorgeschlagen, um den Überschuss der in der Umwelt vorgefundenen TFA zu erklären. Die Befunde über ein mögliches natürliches Vorkommen von TFA in altem Firn, Gletschereis und Grundwasserproben sind bislang widersprüchlich geblieben (Sydow et al. (2000) und Nielsen et al. (2001)).

Die Neigung von Pflanzen, TFA in ihren Zellen anzureichern, hängt von einer Anzahl nicht abschließend geklärter Faktoren ab (Boutonnet et al. (1999)). In Experimenten an landwirtschaftlich relevanten Pflanzen wurden selten Anreicherungsfaktoren von über 30 gefunden (Boutonnet et al., 1999). Feldversuche bestätigten diese Werte für Laub- und Nadelbäume (Likens et al. (1997); Benesch und Gustin (2002)). Klein (1997) und Christof (2002) fanden dagegen in Fichtennadeln von verschiedenen bayerischen Standorten Konzentrationen, die auf einen Anreicherungsfaktor von etwa 1000 schließen lassen. Anreicherungsfaktoren in der Größenordnung von 10.000-100.000 und darüber finden sich für 4,4'-DDE, verschiedene PCB Kongenere oder einige Toxaphene und andere sogenannte "Persistent Organic Pollutants (POPs)" (Ballschmiter, 1996).

4.1.2.3 Weitere Abbauprodukte

In der Literatur findet sich vergleichsweise wenig Information zu anderen Abbauprodukten von H-FKW, wie z.B. Mono- oder Difluoressigsäure oder Chlordifluoressigsäure (Martin et al. (2000)). Gleiches gilt für Reaktionsprodukte mit Kohlenwasserstoffen vor allem aus der belasteten Troposphäre. Es ist allerdings wahrscheinlich, dass die Gesamtausbeute für diese Produkte aus dem Abbau gängiger H-FKW eher gering ist und dass sie auch als Abbauprodukte anderer Fluororganika entstehen.

Ebenfalls noch nicht aufgeklärt ist, welche Produkte ggf. beim biogenen Abbau von TFA entstehen. Sollte dabei in der Tat CHF₃ (H-FKW-23) (Visscher et al., 1994) entstehen, so würde dies über sein hohes GWP die Gesamttreibhausbilanz der Vorläufersubstanzen entscheidend verschlechtern.

4.2 Wirkungskategorien „Umwelt“

4.2.1 Treibhauseffekt

Eine bekannte Eigenschaft vieler flüchtiger fluorierter Substanzen ist ihr ausgeprägtes Strahlungs-Absorptionsvermögen im Spektralbereich des sogenannten "Atmosphärischen Fensters" (WMO, 1995). Sie werden damit zu wirkungsvollen Treibhausgasen. Verschiedene Maßzahlen werden heute verwendet, um die spezifische Treibhauswirkung einzelner Substanzen zu vergleichen. Die gängigsten sind dabei der sogenannte "Strahlungsantrieb" (engl.: "radiative forcing") und die Treibhauspotenziale (engl.: global warming potential (GWP)). Während erstere Größe sich auf die Veränderung der Strahlungsbilanz der Erde nach Erhöhung des atmosphärischen Mischungsverhältnisses einer Substanz um ein Part-per-Billion (ppb) in der heutigen Atmosphäre bezieht, muss das GWP als Relativmaß im Vergleich zu CO₂ für bestimmte Zeithorizonte berechnet werden. Es berücksichtigt damit auch den Abbau einer Substanz in der Atmosphäre. Gleichung 1 gibt die zugehörige Berechnungsvorschrift⁷ wieder:

$$GWP_{i,n} = \frac{\int_0^n a_i \cdot c_i(t) \cdot dt}{\int_0^n a_{CO_2} \cdot c_{CO_2}(t) \cdot dt} \quad \text{Gleichung 1}$$

Die entsprechenden Zahlenwerte für fluoriierte Treibhausgase und Vergleichssubstanzen sind in Tabelle 11 wiedergegeben. Dort sind auch Werte für die atmosphärische Lebensdauer der Substanzen eingetragen, die angeben, nach welcher Zeit ihre Konzentration auf 37% (1/e) des Ausgangswertes abgesunken ist. Die internationale Staatengemeinschaft hat sich im Kontext der Klimarahmenkonvention und des Protokolls von Kyoto auf die Verwendung der von IPCC (1996) aufgelisteten GWP-Werte mit Zeithorizont von 100 Jahren geeinigt.

⁷ Dabei ist a_i das Radiative Forcing nach Erhöhung des Mischungsverhältnisses der Substanz i um 1 ppb, $c_i(t)$ ist das verbleibende Mischungsverhältnis von i nach der Zeit t nach seiner Freisetzung und n ist die Zahl der Jahre für die die Integration durchgeführt wird. Im Nenner des Bruches steht der Referenzausdruck für CO₂ [IPCC, 1990], dessen GWP-Werte deshalb definitionsgemäß 1 für alle Zeithorizonte sind.

Tabelle 11 Strahlungsantrieb (engl. Radiative Forcing) und Treibhauspotenziale (engl. Global Warming Potentials (GWP)) für fluoriierte Treibhausgase und Vergleichssubstanzen (IPCC, 2001; Werte für NF₃: WMO, 1999). Die im Rahmen des Protokolls von Kioto gültigen Werte sind in der Spalte „GWP 100 Jahre KIOTO“ aufgeführt und stammen aus IPCC (1996)⁸.

	GWP 100 Jahre KIOTO	GWP 20 Jahre	GWP 100 Jahre	GWP 500 Jahre	Radiative Forcing [W/m²]	Atmosph. Lebens- dauer [a]
H-FKW-134a	1300	3300	1300	400	0,15	13,8
H-FKW-365mfc		2600	890	280	0,21	9,9
H-FKW-245fa		3000	950	300	0,28	7,2
H-FKW-227ea		5600	3500	1100	0,30	33
H-FKW-143a	3800	5500	4300	1600	0,13	52
H-FKW-152a	140	410	120	37	0,09	1,4
H-FKW-125	2800	5900	3400	1100	0,23	29
H-FKW-32	650	1800	550	170	0,09	5,0
H-FKW-43-10mee	1300	3700	1500	470	0,40	17,1
H-FKW-23	11700	9400	12000	10000	0,16	260
CF ₄	6500	3900	5700	8900	0,08	50000
C ₂ F ₆	9200	8000	11900	18000	0,26	10000
SF ₆	23900	15100	22200	32400	0,52	3200
NF ₃		7700	10800	13100	0,13	740
Zum Vergleich						
HFE-7100®		1300	390	120	0,31	5
HFE-7200®		190	55	17	0,30	0,77
N ₂ O	310	275	296	156	0,0031	114
CH ₄	21	62	23	7	0,00037	12,0
CO ₂	1	1	1	1	0,000015	

4.2.2 Stratosphärischer Ozonabbau

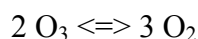
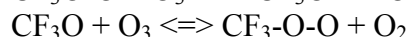
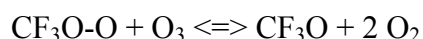
Die Bedeutung der Halogene für die Ozonchemie nimmt mit zunehmender Reaktivität bzw. Elektronegativität vom Iod, über Brom, zu Chlor und schließlich zu Fluor ab, d.h. es wird zunehmend schwerer, das Element aus seinen Verbindungen freizusetzen. Nachdem die Mechanismen der stratosphärischen Ozonzerstörung in Grundzügen verstanden waren, war klar, dass zum Schutze der Ozonschicht nur noch solche Halogenkohlenwasserstoffe zum Einsatz kommen sollten, die folgende Eigenschaften haben. Zum einen sollten sie bereits in der Troposphäre zum Großteil abgebaut werden können, um gar nicht bis in die Stratosphäre zu gelangen. Zum anderen sollte auf die Verwendung der Elemente Jod und Brom verzichtet werden, und ein rein fluorsubstituierter Kohlenwasserstoff wäre im Zweifelsfalle einer gemischt-halogenierten Verbindungen vorzuziehen. Die verbleibende Wirkung solcher fluorierter Verbindungen auf die Ozonschicht haben Ko et al. (1994) und Ravishankara et al. (1994) untersucht. Ein weiter gefasster Überblick ist auch in WMO (1995, 1999) zu finden.

⁸ Die Unterschiede zwischen den im Protokoll von Kioto verwendeten und den neueren Daten resultieren aus verbesserten spektroskopischen Daten und geänderten Werten für die atmosphärischen Lebensdauern.

Die Untersuchungen konzentrierten sich aufgrund der hohen Stabilität von HF im Vergleich zu HCl, HBr und HI auf die Chemie des CF₃-Radikals, das wie oben bereits ausgeführt wurde ein Zerfallsprodukt verschiedener H-FKW sein kann.

Abbildung 17 zeigt die wesentlichen Elemente des Reaktionspfades des CF₃-Radikals hin zum CF₂O, das im wässrigen Milieu zu HF und CO₂ zerfällt. Ganz analog zum Abbauweg der H-FKW bilden sich auch hier wieder das Peroxyradikal, das Hydroperoxid, das Peroxynitrat des CF₃, aus denen sich schließlich das Oxyradikal bildet.

Ist die troposphärische Umwandlung in HF und CO₂ unvollständig und CF₃ gelangt in die Stratosphäre, ist folgender Reaktionszyklus kritisch für einen Abbau stratosphärischen Ozons:



Gleichung 2

Kinetische Untersuchungen dieser Reaktionen legen allerdings nahe, dass diese katalytische Ozonabbaureaktion keine signifikante Bedeutung hat (Ko et al., 1994).

Das Oxyradikal kann wiederum entweder mit NO₂ zum Oxynitrat, mit HO₂ oder CH₄ zum Alkohol reagieren. Daneben kann es durch Reaktion mit NO direkt zu FNO und zu COF₂, zwei direkt hydrolysierbaren Verbindungen reagieren. Mit dem Verbleib von CF₃OH in der Atmosphäre haben sich Huey et al. (1995) in Bezug auf die Gasphase sowie Lovejoy et al. (1995) für Partikel beschäftigt.

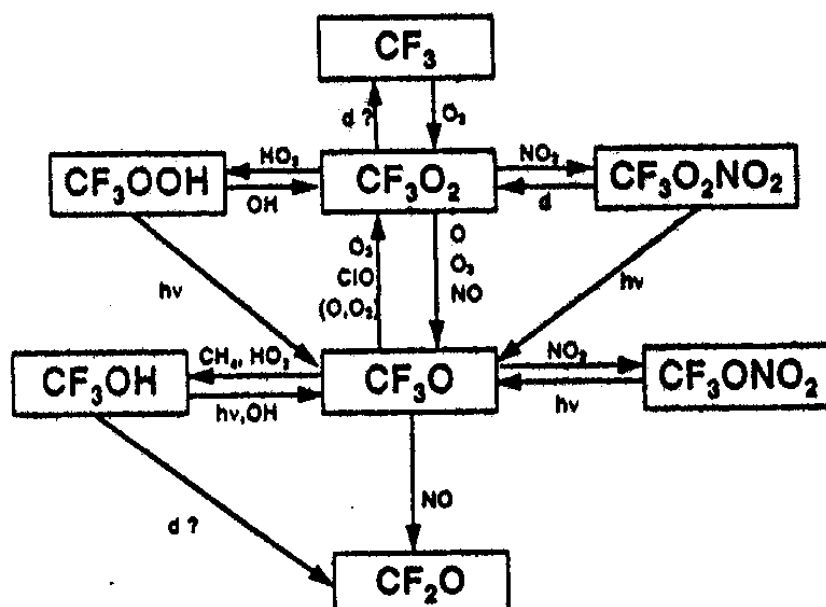


Abbildung 17 Übersicht: CF₃-Chemie nach Ko et al. (1994)

Die Ozonzerstörungspotenziale⁹ (engl. Ozone Depletion Potentials (ODP)) verschiedener H-FKW nebst einiger Vergleichsstoffe sind in Tabelle 12 wiedergegeben. Es wird deutlich, dass sich die H-FKW durch vergleichsweise geringe ODP-Werte auszeichnen.

Tabelle 12 Ozonzerstörungspotenzial verschiedener H-FKW und Vergleichssubstanzen

Substanz	ODP	Quelle
H-FKW-134a	<0,0005	Ravishankara et al. (1994)
H-FKW-23	<0,0004	Ravishankara et al. (1994)
H-FKW-125	<0,00003	Ravishankara et al. (1994)
Zum Vergleich		
H-FCKW-22	0,04-0,05	WMO (1995)
H-FCKW-141b	0,1	WMO (1995)
FCKW-11	1,0	WMO (1995)

4.2.3 Photochemische Oxidantienbildung

Wie oben beschrieben nehmen die meisten fluorierten Treibhausgase und ihre Abbauprodukte intensiv an luftchemischen Prozessen in der Troposphäre teil, z.B. über OH, HO₂, NO und NO₂. In Situationen, in denen ausreichend NO_x zur Verfügung steht und Kohlenwasserstoffe den begrenzenden Faktor darstellen (d.h. urbane Luftchemie), tragen sie zur Bildung von troposphärischem Ozon bei. In ihrem Effekt auf das Gesamtsystem wirken sie also ähnlich den Kohlenwasserstoffen.

Tabelle 13 Ozonbildungspotenzial (urbane Luftchemie) verschiedener H-FKW und von Vergleichssubstanzen

Substanz	Ozonbildungspotenzial	Quelle
H-FKW-134a	0,1	Hayman & Derwent, 1997
H-FKW-365mfc	nicht verfügbar ¹⁰	-
H-FKW-245fa	nicht verfügbar ¹⁰	-
H-FKW-143a	<0,1	Hayman & Derwent, 1997
H-FKW-227ea	<0,1	Hayman & Derwent, 1997
H-FKW-152a	1,0	Hayman & Derwent, 1997
H-FKW-32	0,2	Hayman & Derwent, 1997
H-FKW-125	<0,1	Hayman & Derwent, 1997
Zum Vergleich:		
Ethylen	100	Hayman & Derwent, 1997
NMVOC	42	UN-ECE (1994)
Trichlorethylen	9	Hayman & Derwent, 1997
H-FCKW-123	0,3	Hayman & Derwent, 1997

⁹ Das ODP ist eine aus Modellberechnungen abgeleitete Maßzahl dafür, in welchem Umfang eine in die Atmosphäre emittierte Menge einer Substanz im Vergleich zu FCKW-11 zum Abbau stratosphärischen Ozons beiträgt (vgl. WMO [1995]).

¹⁰ Für die weiteren Berechnungen wird ein Wert von 0,1 angenommen.

Dies wurde von Hayman und Derwent (1997) in einem Chemiemodell für 5 Tage-Trajektorien quantifiziert. Die berechneten Ozonbildungspotenziale sind in Tabelle 13 relativ zu Ethylen (definiert als 100) angegeben.

4.2.4 Umwelttoxizität

4.2.4.1 Direkte Toxizität

Die kommerziell relevanten fluorierten Treibhausgase werden generell als nicht umweltgefährdend eingestuft. Dies ist bei den Substituten auch für Kohlendioxid und Propan der Fall – nicht jedoch für n- und cyclo-Pentan sowie Ammoniak (Tabelle 14), die als wassergefährdend klassifiziert sind.

Tabelle 14 Einstufung nach Umweltgefährdung (R-Sätze) – Herstellerangaben

Substanz	Umweltgefährdung
CF ₄	-
C ₂ F ₆	-
SF ₆	-
NF ₃	-
H-FKW-134a	-
H-FKW-365mfc	-
H-FKW-245fa	-
H-FKW-143a	-
H-FKW-227ea	-
H-FKW-152a	-
H-FKW-32	-
H-FKW-125	-
H-FKW-43-10mee	-
Kohlendioxid	-
Ammoniak	Sehr giftig f. Wasserorganismen (R50)
n-Pentan	Giftig f. Wasserorganismen; kann in Gewässern langfr. schädliche Wirkungen haben (R51 / R53)
cyclo-Pentan	Schädlich f. Wasserorganismen; kann in Gewässern langfr. schädliche Wirkungen haben (R52 / R53)
Propan	-

Vergleichsweise gründlich ist die direkte Wirkung von H-FKW-134a auf einzelne aquatische Organismen untersucht worden (IPCS, 1998). Es zeigt sich dabei, dass die EC₅₀ -Schwellen für das Bakterium *Pseudomonas Putida* bei 730 mg/Liter (48h), für *Daphnia Magna* bei 980 mg/Liter (48h) und für die Regenbogenforelle bei 450 mg/Liter (LC₅₀: 96h) liegen. Das Auftreten so hoher aquatischer Konzentrationen kann unter normalen Umweltbedingungen ausgeschlossen werden. Ähnliche Daten liegen z.B. von Solvay für H-FKW-365mfc und H-FKW-227ea vor. Für die Altstoff H-FKW bleibt zum Teil unklar, inwieweit die Einstufungen zur Umwelttoxizität auf der Basis von Test, Modellierungen oder Analogieschlüssen von Schwestersubstanzen beruht.

4.2.4.2 Bioakkumulierbarkeit

Die Bioakkumulierbarkeit von H-FKW ist nur mäßig ausgeprägt. Der Logarithmus des Verteilungskoeffizienten zwischen n-Oktanol und Wasser als Indikator für eine mögliche Bioakkumulierbarkeit ist für eine Anzahl von Schlüsselsubstanzen in Tabelle 15 wiedergegeben. Ein Wert von 3 gilt oft als Untergrenze für eine relevante Bioakkumulierbarkeit (Streit, 1991). Dieser Wert wird nur für H-FKW-32 übertroffen.

Tabelle 15 Logarithmus des Verteilungskoeffizienten zwischen n-Oktanol und Wasser

Substanz	Log Kow	Quelle
H-FKW-134a	1,06	Produktdatenblatt - Solvay
H-FKW-245fa	1,35	Diverse Quellen – Öko-Recherche
H-FKW-365mfc	1,6	Produktdatenblatt - Solvay
H-FKW-227ea	2,5	Produktdatenblatt - Solvay
H-FKW-125	1,55	Diverse Quellen – Öko-Recherche
H-FKW-32	3,89	Diverse Quellen – Öko-Recherche
H-FKW-152a	1,13	Diverse Quellen – Öko-Recherche
CF ₄	2,7	Diverse Quellen – Öko-Recherche
C ₂ F ₆	2,15	Diverse Quellen – Öko-Recherche
SF ₆	0,23	Diverse Quellen – Öko-Recherche
n-Pentan	2,9	Diverse Quellen – Öko-Recherche
Propan	2,4	Diverse Quellen – Öko-Recherche
n-Butan	2,9	Diverse Quellen – Öko-Recherche

4.2.4.3 Persistenz und Ferntransportpotenzial

Zur Charakterisierung des zeitlichen und räumlichen Verbleibs von Stoffen - unabhängig von ihrer Wirkung - wurden die Konzepte von Persistenz und Reichweite (ausgedrückt als τ [Jahre] und R [z.B. Prozent des Erdradius]) geschaffen [Scheringer, 1999]. Diese modellgestützten Größen dienen als Ergänzung für die konventionellen Bewertungsmethoden aus der Expositions- und Wirkungsanalyse.

Die Persistenz τ wird hier definiert als

$$\tau = \frac{1}{M_0} \int_0^{\infty} M(t) dt \quad \text{Gleichung 3}$$

mit M_0 als der zur Zeit $t=0$ freigesetzten Stoffmenge und $M(t)$ der als der zum Zeitpunkt t in der Umwelt verbleibenden Stoffmenge.

Die Reichweite R hingegen ist ein Maß für die Breite der räumlichen Verteilung eines Stoffes in der Umwelt. Das zugehörige Berechnungsverfahren wird zur Zeit noch abhängig von grundsätzlichen Charakteristika der Verteilung festgelegt [Schlesinger, 1999]. Eine an viele Situationen adaptierbare Definition ist die Entfernung von der Quelle, innerhalb derer im Gleichgewichtsfall 95% der Substanz zu finden sind. Weitere Quellen, unsymmetrische Verteilungen sowie Mehrdimensionalitäten erfordern entsprechende Anpassungen des Konzeptes.

Die Definitionen von Persistenz und der atmosphärischen Lebensdauer gehen äquivalent in einander über, sobald der Abbau einer Substanz wie im Falle der fluorierten Treibhausgase nahezu ausschließlich im Medium Luft stattfindet. Für die Persistenz gelten dem entsprechend die Zahlenwerte wie in Tabelle 11.

Die Reichweite als Maß für das Ferntransportpotenzial einer Substanz kann in diesem Falle auch ohne Modellierung mit etwa 0,95 Erdradien für alle H-FKW (inkl. H-FKW-152a) abgeschätzt werden, da bei Persistenzen bzw. atmosphärischen Lebensdauern von über 1,5 Jahren von einer nahezu homogenen Durchmischung der unteren Erdatmosphäre ausgegangen werden kann.

Mit diesen Zahlenwerten ist das Eigenschaftspaar Persistenz und Reichweite bei den fluorierten Treibhausgasen im Vergleich zu den meisten anderen Umweltchemikalien extrem stark – ähnlich etwa den jüngst in der marinen Nahrungskette nachgewiesenen Perfluoroktansulfonaten (vgl. Kennan et al. [2001a, 2001b]) – ausgeprägt.

4.2.5 Versauerung

In Tabelle 16 ist eine Übersicht von Zahlenwerten für das Versauerungspotenzial einschlägiger H-FKW (über die Abbauprodukte HF und TFA) sowie für Ammoniak und NO₂ wiedergegeben. Die Kennzahlen für die betrachteten Verbindungen liegen in der Nähe des Referenzwertes 1 für Schwefeldioxid. H-FKW leisten ihren Beitrag zur Versauerung weltweit relativ gleichmäßig und unterscheiden sich damit von den klassischen Luftschadstoffen wie SO₂ und NO_x mit regionaler Wirkung.

Tabelle 16 Versauerungspotenzial (als kg SO₂-Äquivalent pro kg Substanz) (Frischknecht, 1999b)

Substanz	Versauerungspotenzial
H-FKW-134a	0,96
H-FKW-152a	0,97
H-FKW-32	1,21
H-FKW-125	1,35
H-FKW-365mfc	nicht verfügbar ¹¹
H-FKW-245fa	nicht verfügbar ¹¹
H-FCKW-22	1,11
H-FCKW-141b	0,82
H-FCKW-142b	0,95
Ammoniak	1,88
Stickoxide als NO ₂	0,77

4.2.6 Eutrophierung

Die fluorierten Treibhausgase tragen direkt nicht zur Eutrophierung von Gewässern und Böden bei. Dies gilt analog für die Kohlenwasserstoffe und Kohlendioxid. Einzig Ammoniak als Substitut fluorierter Treibhausgase in einzelnen Anwendungen weist ein signifikantes Eutrophierungspotenzial von 0,33 Phosphatäquivalenten auf.

4.2.7 Naturraumbeanspruchung, Lärm und Emission radioaktiver Isotope

In der einschlägigen Literatur (Frischknecht, 1999a und 1999b) liegen keine Anzeichen vor, dass die Herstellung fluorierter Kohlenwasserstoffe (z.B. durch den Abbau von Fluorit oder Steinsalz oder für die Gewinnung der Brennstoffe für die Stromherstellung) oder ihrer Substitute mit einer über das für Aktivitäten der chemischen Industrie normale Maß hinausgehenden Naturraumbeanspruchung, Lärmentstehung oder Emission radioaktiver

¹¹ Für die Berechnungen weiter unten wird ein Wert von 1,1 angenommen.

Isotope einhergeht. Aus diesem Grunde, der schlechten Datenlage zu diesen Wirkungskategorien sowie weitgehend fehlender Maßzahlen wurde daher auf eine vertiefte Betrachtung verzichtet.

4.3 Wirkungskategorien „Mensch“

Ein Hauptgrund der weiten Verbreitung fluorierter Substanzen ist zum einen ihre Unbrennbarkeit oder zumindest stark reduzierte Brennbarkeit im Vergleich zu den homologen Kohlenwasserstoffen, sowie zum anderen ihre im Allgemeinen geringe Humantoxizität. Beide Eigenschaften waren naturgemäß bei den vollhalogenierten FCKW stärker ausgeprägt als bei den teilhalogenierten H-FKW. Im Folgenden werden diese beiden Aspekte diskutiert.

4.3.1 Humantoxizität

Wie in Tabelle 17 zu sehen ist, weisen die kommerziell relevanten Fluorkohlenwasserstoffe erst in sehr hohen Konzentrationen eine nennenswerte akute Humantoxizität auf, was dazu führt dass für fluoriierte Treibhausgase außer für NF₃ keine Klassifizierung nach den im Arbeitsschutz gängigen R-Sätzen vorgenommen wurde (Tabelle 18). Dies gilt ebenfalls für die Substitute Kohlendioxid, Propan und cyclo-Pentan nicht aber für Ammoniak und n-Pentan.

Tabelle 17 Daten zur akuten Inhalationstoxizität¹² einschlägiger H-FKW und einiger H-FCKW und Alternativsubstanzen

	Akute Inhalations- toxizität¹³	Quelle
H-FKW-134a	>50 %	Daikin / Honeywell
H-FKW-365mfc	>10 %	Solvay
H-FKW-245fa	>20 %	Honeywell
H-FKW-143a	>54 %	Daikin
H-FKW-227ea	>11 %	Solvay
H-FKW-152a	>6,4 %	Daikin
H-FKW-32	> 76 %	Daikin
H-FKW-125	> 80 %	Daikin
H-FKW-43-10mee	>11,1%	3M
C ₅ F ₁₂	>30 %	3M
NF ₃	>0,7%	Air Liquide
Zum Vergleich:		
H-FCKW-123	3,2%	Daikin
H-FCKW-141b	6,2 %	Daikin / Honeywell
HFE-7100®	>10%	3M
HFE-7200®	>9,2%	3M
Kohlendioxid	>12% ¹⁴	Unister
n-Pentan	>8,8%	BOC
Ammoniak	>0,5%	Potash Corporation

¹² Für die Richtigkeit und Vollständigkeit dieser Daten wird keine Haftung übernommen.

¹³ Die akute Inhalationstoxizität wird mit einer Rattenpopulation bestimmt. Der Schwellenwert gibt die Konzentration in der Atemluft an, bei der nach einer vierstündigen Exposition 50% der Population binnen 24 Stunden sterben. Bei LC50-Werten von über 50% wird der Sauerstoffanteil in der Luft erhöht, um das Ersticken der Versuchstiere zu vermeiden, das sonst unterhalb von Sauerstoffkonzentrationen von etwa 10% eintritt.

¹⁴ Abweichend: tödliche Konzentration für Menschen

Vertiefte toxikologische Untersuchungen liegen vor allem für H-FCKW-123 (Dekant, 1996) und H-FKW-134a (Dekant, 1996; IPCS, 1998) vor. Während die meisten der gängigen toxikologischen Tests für H-FKW-134a negativ verliefen, wurde eine Erhöhung der Bildungsrate gutartiger Hodentumore in Ratten bei chronischer Exposition (50.000 ppm) festgestellt, die einer Wirkung der Substanz bzw. ihrer Metaboliten auf den Hormonhaushalt zugeschrieben werden könnte (Collins et al., 1995; Dekant, 1996). Eine direkt toxische Wirkung auf diese Gewebe hat erwiesenermaßen Trifluoracetaldehyd (CF_3CHO), das ein Metabolit von H-FKW-134a sein könnte (Lloyd et al., 1988; Dekant, 1996). Eine erhöhte Empfindlichkeit des Herzen wurde für H-FKW-134a nur bei sehr hohen Konzentrationen in der Atemluft nachgewiesen (IPCS, 1998).

Auf die Einschränkungen der einschlägigen in der Regel auf Tierversuchen beruhenden Standardtests zu den verschiedenen akuten und chronischen Dimensionen von Humantoxizität soll hier nicht eingegangen werden. Viele von Chemikalien ausgehende Langzeitriskiken wie etwa einer Mutagenität oder Karzinogenität (besonders auch im Zusammenspiel mit anderen Chemikalien oder Faktoren) werden oft erst lange nach erfolgreichem Durchlaufen der Stoffbewertung erkannt. Obwohl diese Risiken auch für als Neustoffe geprüfte H-FKW nicht ausgeschlossen werden können, so weisen diese im Vergleich zu vielen anderen in der Arbeitswelt eingesetzten Chemikalien ein vergleichsweise gutartiges Profil auf.

Tabelle 18 Einstufung¹⁵ nach Humantoxizität (R-Sätze für den Arbeitsschutz) – Herstellerangaben

Substanz	Humantoxizität
CF_4	-
C_2F_6	-
SF_6	-
NF_3	Gesundheitsschädlich beim Einatmen (R20)
H-FKW-134a	-
H-FKW-365mfc	-
H-FKW-245fa	-
H-FKW-143a	-
H-FKW-227ea	-
H-FKW-152a	-
H-FKW-32	-
H-FKW-125	-
H-FKW-43-10mee	-
Zum Vergleich:	
Kohlendioxid	-
Ammoniak	Giftig beim Einatmen (R23)
n-Pentan	Gesundheitsschädlich: kann beim Verschlucken Lungenschäden verursachen (R65)
cyclo-Pentan	-
Propan	-

¹⁵ Für die Richtigkeit und Vollständigkeit dieser Daten wird keine Haftung übernommen.

4.3.2 Entflammbarkeit

Die Tabelle 19 gibt einen Überblick über die Explosionsgrenzen verschiedener Verbindungen in Luft. Vier von acht kommerziell relevanten H-FKW sind demnach brennbar. Allerdings könnten sie oft in Mischungen mit anderen H-FKW eingesetzt werden, die dann als solche unbrennbar würden. Von den Herstellern wird die für H-FKW erheblich höhere Zündenergie bei ähnlichen Entflammbarkeitsgrenzen wie für Kohlenwasserstoffe hervorgehoben.

Tabelle 19 Übersicht über Brennbarkeitsdaten¹⁶ verschiedener Fluide

	Untere Explosions- grenze in Luft [%]	Obere Explosions- grenze in Luft [%]	Quelle
H-FKW-134a	-	-	Solvay
H-FKW-365mfc	3,5	9	Solvay
H-FKW-245fa	-	-	Honeywell
H-FKW-143a	7,1	16,1	Solvay
H-FKW-227ea	-	-	Solvay
H-FKW-152a	3,8	21,5	Solvay
H-FKW-32	13,6	28,4	Daikin
H-FKW-125	-	-	Solvay
H-FKW-43-10mee	-	-	3M
Zum Vergleich:			
HCFC-141b	7,6	17,7	Honeywell
HFE-7100®	-	-	3M
HFE-7200®	2,4	12,8	3M
c-Pentan	1,4	9,4	Honeywell
n-Pentan	1,3	8,0	Honeywell
Ammoniak	15	30	Praxair

4.4 Datenverfügbarkeit

Ein Teil der hier betrachteten fluorierten Treibhausgase (z.B. H-FKW-365mfc, 245fa, 43-10mee) hat die umfassende Risikobewertung im Rahmen der EU-Richtlinie 93/67/EWG durchlaufen. Unbeschadet der in Kapitel 2 angesprochenen Grenzen auch einer umfassenden Stoffbewertung können diese H-FKW als gut untersucht charakterisiert werden. Der andere Teil der H-FKW fällt unter die Gruppe der sogenannten Altstoffe, die bereits vor Inkrafttreten der Richtlinie auf dem Markt waren und daher kein einheitliches Risikobewertungsverfahren durchlaufen haben. Wegen der hohen Sensibilisierung in Hinblick auf eine mögliche Gefährdung von Mensch und Umwelt wurden diese Stoffe im Rahmen unterschiedlicher Untersuchungen und Bewertungen in Hinblick auf ihre stoffintrinsic Eigenschaften betrachtet. Eine fundierte Beurteilung, wie solide und belastbar diese Untersuchungen in allen Einzelaspekten einzuschätzen sind, würde die Zielstellung dieser Studie sprengen. Da in den verschiedenen hier berücksichtigen Quellen zumindest keine eklatanten Widersprüche oder Untersuchungslücken erkennbar sind, erscheint es zulässig, von einem insgesamt hinreichenden Kenntnisstand zu den wichtigsten stoffintrinsic Eigenschaften auszugehen. Bis auch die Altstoffe jeweils ein umfassendes und vergleichbares Bewertungsverfahren durchlaufen haben, sollte jedoch ein gewisser Unsicherheitsfaktor mitbedacht werden. Dies gilt insbesondere, wenn Analogieschlüsse zwischen Schwestersubstanzen gezogen werden, da teilweise auch signifikante Abweichungen innerhalb der Gruppe gegeben sind.

¹⁶ Für die Richtigkeit und Vollständigkeit dieser Daten wird keine Haftung übernommen.

4.5 Spezifische Beiträge

Das Konzept des spezifischen Beitrages [UBA, 1999d] kann helfen, eine Schwerpunktsetzung bei der Untersuchung der Umweltauswirkungen von Anwendungen in den verschiedenen Wirkungskategorien zu treffen. Dabei wird in einer geeigneten Metrik (z.B. dem Treibhauspotenzial) ermittelt, wie groß der quantitative Beitrag der Anwendung bezogen auf eine geeignete Region zu dem Gesamtumwelteffekt durch vergleichbare Emissionen aus anderen anthropogenen Quellen ist.

Im Rahmen dieser Studie wurde diese Abschätzung summarisch für alle Anwendungen fluorierter Treibhausgase (vgl. Kapitel 3) mit Bezug auf Deutschland bzw. in weltweiter Perspektive durchgeführt. Es wurde angenommen, dass Alternativen bei einer vollständigen Substitution aufgrund ihrer geringeren Dichte mengenmäßig 50% der emittierten Masse fluorierter Treibhausgase ausmachen und dass hierbei Kohlenwasserstoffe mit 70% dominieren gefolgt von 10% Kohlendioxid, 10% Ammoniak und 10% Wasser und Luft. Die jährlichen Referenzmengen auf die Emissionen von fluorierten Treibhausgasen sowie deren Substituten sind geschätzte gewichtete Mengen basierend auf statistischem Material von IPCC, UNEP sowie von BMU/UBA.

Tabelle 20 Geschätzter spezifischer Beitrag der Emissionen in 2010 in verschiedenen Wirkungskategorien

	Bezugs- einheit	Bezugs- region	H-FKW	Alternativen (bei 100% Substitution)	Angenommene jährl. Referenz- menge
Treibhauspotenzial	GWP100 [CO ₂ Äq.]	Welt	2 %	0,003 %	33 GT CO ₂ – Äquivalente
Ozonzerstörungspotenzial	Ozon- Zerstörungs- potenzial [FCKW-11 Äquivalente]]	Welt	0,1%	< 0,02%	0,13 MT FCKW-11- Äquivalente
Ozonbildungspotenzial	Ozon- Bildungs- potenzial [Ethylen-Äq]	DEU	0,002%	0,3%	0,84 MT Ethylen- Äquivalente
Versauerungspotenzial	SO ₂ - Äquivalente	DEU	0,3 %	0,03%	4,6 MT SO ₂ - Äquivalente (SO ₂ & NO _x)
Eutrophierung (atmosphärische Route)	Phosphat- äquivalente	DEU	<0,01 %	0,1 %	0,2 MT Phosphat- Äquivalente

Die Ergebnisse sind in Tabelle 20 wiedergegeben. Es zeigt sich, dass sich der spezifische Beitrag der fluorierten Treibhausgase in der Kategorie Treibhauspotenzial in seiner Höhe mit 2 % auffällig von den anderen Wirkungskategorien absetzt. Als nächstes folgen die fluorierten Treibhausgase mit 0.3% Beitrag zur Versauerung und die Substitute mit 0.3% Beitrag zur Ozonbildung.

Zu den anderen Wirkungskategorien, die aufgrund methodischer Lücken nicht auf ihren spezifischen Beitrag hin zu quantifizierbar sind, kann zusammenfassend festgestellt werden:

Umweltoxizität: Eine direkte toxische Wirkung ist für die entsprechend untersuchten fluorierten Treibhausgase auf aquatische Leitorganismen bislang nur bei sehr hohen Konzentrationen nachgewiesen worden. Die Neigung zur Bioakkumulation ist mäßig ausgeprägt. Nach heutigem Kenntnisstand sind die fluorierten Treibhausgase als umwelttoxikologisch vergleichsweise wenig problematische Substanzen einzustufen.

Persistenz: Die Persistenz der hier untersuchten fluorierten Stoffe ist sehr ausgeprägt. Einige der Substanzen besitzen Lebensdauern in der Umwelt von vielen tausend Jahren. Dieser Befund ist im Sinne einer vorsorgenden Chemikalienpolitik als problematisch einzustufen.

Abbauprodukte: In der Literatur wird von hauptsächlich zwei stabilen fluorierten Abbauprodukten der fluorierten Treibhausgase ausgegangen: der Trifluoressigsäure (TFA) und dem Fluorwasserstoff (HF) (bzw. deren jeweiligen Anionen (TFA^- und F^-)). Die für TFA und HF aus dem Abbau von H-FKW um das Jahr 2010 erwarteten Konzentrationen in Niederschlägen liegen aber um mehrere Größenordnungen unter möglichen Schadschwellen selbst für besonders empfindliche Organismen. Tatsächlich liegen aus anderen Quellen stammend bereits heute vergleichsweise hohe Konzentrationen von F^- und TFA^- in urbanen Niederschlägen vor.

Entflammbarkeit: Ein Teil der kommerziell relevanten fluorierten Treibhausgase ist brennbar. In Mischungen verschiedener Substanzen (meist H-FKW) kann bisweilen Unbrennbarkeit erzielt werden in Kombination mit den für die Anwendung gewünschten thermodynamischen Eigenschaften.

Humantoxizität: Die H-FKW stellen sich nach aktuellem Kenntnisstand als humantoxikologisch wenig bedenkliche Substanzen dar. Eine akute Toxizität existiert erst für sehr hohe Konzentrationen. Bei dauerhaft sehr hohen Konzentrationen von H-FKW-134a wurde bei Ratten eine Erhöhung der Bildungsrate von Hodentumoren nachgewiesen, die auf eine Wirkung von 134a auf den Hormonhaushalt zurückgeführt wird. Die Relevanz dieses Befundes für die Praxis ist gegenwärtig umstritten.

Insgesamt sind bei den hier betrachteten fluorierten Substanzen insbesondere das hohe Treibhauspotenzial sowie ihre Persistenz und hohe Reichweite als besonders problematische stoffintrinsic Eigenschaften hervorzuheben.

4.6 Ausblick auf die Anwendungsbeispiele

In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass der spezifische Beitrag der untersuchten fluorierten Substanzen zum Treibhauseffekt im Spektrum ökologischer Wirkkategorien klar dominiert. Deshalb werden in den beiden folgenden Kapiteln ausgewählte Anwendungsbeispiele auf ihren Beitrag zum Treibhauseffekt hin untersucht. Die Vorgehensweise lehnt sich an die in der internationalen Literatur als „Lifecycle Climate Performance (LCCP)“ verbreiteten, auf den Klimaschutz fokussierte vergleichende Betrachtung verschiedener technologischer Alternativen unter Einbeziehung der Emissionen über ihren Lebensweg (Herstellung, Verwendung und Entsorgung). Die Anwendungsbeispiele wurden dabei so ausgewählt, dass sie jeweils ein für Europa emissionsseitig relevantes Anwendungsbeispiel mit markanten technischen Eigenschaftsmerkmalen abdecken. Die Übertragbarkeit der Beispiele auf benachbarte Anwendungen war dabei kein primäres Kriterium. Sie wird aber in den Kapiteln diskutiert.

5 Anwendung A – PU Hartschaum

5.1 Vorbemerkung zur Dämmwirkung verschiedener Treibmittel

Zwei typische Anwendungen von PU-Hartschaum sind Dachdämmplatten (auf Sparren unter Steildächern genagelt) sowie der Einsatz von PU-Hartschaum zur Isolierung gekühlter Transportfahrzeuge. Bei ersterer Anwendung unter dem Dachraum sind Unterschiede der Schaumdicke im Millimeterbereich zur Kompensation höherer Wärmeleitfähigkeitswerte (λ -Werte) unproblematisch. Dies ist anders bei der Anwendung KÜHlfahrzeug, dessen Dämmschaum in Deutschland vornehmlich mit c-Pentan (oft im Verschnitt mit i-Pentan) getrieben wird. Im KÜHlfahrzeug gibt es nur wenig Spielraum, um erhöhte Wärmeleitfähigkeit durch dickere Dämmwände auszugleichen.

In beiden Fällen wird nach den Auswirkungen gefragt, die der Einsatz von H-FKW-365mfc anstelle der Kohlenwasserstoffe n-Pentan bzw. c-Pentan/i-Pentan hätte.

Die Dämmwirkung von PU-Hartschaum ist bei gegebener Dicke umso höher, je niedriger die Wärmeleitfähigkeit λ des in den Schaumzellen eingeschlossenen Treib- und Zellgases ist. Die λ -Werte der Gase als solche steigen zwar in der Reihenfolge FCKW-11, H-FCKW-141b, c-Pentan und n-Pentan in Stufen von ca. 1,5 mW/mK an: von 8,5 über 10,1 zu 12,4 bis hin zu 14 (bei 25°C, Quelle Bayer 2000). Der λ -Wert des fertigen Schaums wird jedoch nicht nur durch die physikalischen Treibmittel beeinflusst, sondern auch durch das - höhere - λ des bei der Reaktion von Polyol und Isocyanat entstehenden „chemischen“ Zellgases CO₂ sowie durch die Wärmeleitung über die Schaumstoffmatrix und durch IR-Strahlung zwischen den Zellwänden. Bei all diesen Prozessen ist auch der Einfluss der Alterung des Schaums zu beachten, was in der Regel in Form eines rechnerischen Zuschlags einkalkuliert wird. Typische λ -Werte solchen Hartschaums, sofern er diffusionsdicht kaschiert ist, sind 21 mW/mK bei H-FCKW-141b, 23 bei c-Pentan und 24 bei n-Pentan.

Laut Hersteller-Angaben (Solvay) liegt der λ -Wert des neuen Treibmittels H-FKW- 365mfc als Gas (10,6 mW/mK) zwischen H-FCKW-141b und c-Pentan. Dies gilt auch für den H-FKW-245fa. Fertiger Schaum weist dann typischerweise ein λ von ca. 22 mW/mK auf. Mehrere Anwender und Rohstoffhersteller konnten bisher bei Verwendung der neuen H-FKW bei den λ -Werten der fertigen Schäumen zwar einen Unterschied gegenüber n-Pentan (Gas- λ : 14) feststellen, aber nicht zu c-Pentan (u.a. Albach 2002; Demharter 2002).

Nachfolgend (Tabelle 21) wird fertiger PU-Schaum mit H-FKW-365mfc (λ =22) fertigem PU-Schaum mit den Treibmitteln c-Pentan (λ =23) bzw. n-Pentan (λ =24) gegenübergestellt¹⁷. Von weitergehenden Vergleichen mit dem H-FCKW 141b wird abgesehen, da die Anwendung dieser Substanz ab 2003/2004 in der EU grundsätzlich nicht mehr erlaubt ist.

Tabelle 21 Verwendete λ -Werte von PU Hartschaum nach Treibmitteln (mW/mK)

H-FCKW-141b	H-FKW-365mfc	c-Pentan	c-/i-Pentan	n-Pentan
21	22	23	>23	24

¹⁷ Bei der Einstufung nach deutscher als auch nach künftiger EU-Norm (s. Bayer 2001) werden die Messwerte, sofern sie zwischen ganzen Zahlen liegen, grundsätzlich auf volle Werte aufgerundet. Aus 23,15, von uns nachfolgend zur Kalkulation für Schaum mit c-/i-Pentan benutzt, würde dann z. B. 24 mW/mK.

5.2 Dachdämmplatten aus PU-Schaum mit n-Pentan und H-FKW-365mfc

5.2.1 Vorbemerkung zur Entsorgung

In der Abfallwirtschaft sind Dämmstoffe z.Z. noch von untergeordneter Bedeutung. In Zukunft werden Dämmstoffe aus dem Bausektor jedoch in großem Maße zur Entsorgung anstehen. Die Dämmstoffe haben dabei im Wohnungsbau mit einer typische Dichte bei ca. 30 kg/m³ nur einen unbedeutenden Massenanteil. Für die Abfallwirtschaft relevanter ist ihr Volumen. Legt man die Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV, 2001) zugrunde, so werden zukünftig jährlich ca. 30 Mio. m³ Dämmstoffe im Wohnungsbau eingesetzt, die dann nach ca. 50 Jahren wieder als Abfälle anstehen. Vergleicht man diese Menge mit den jetzigen Abfallströmen aus dem Wohnungsbau von 30-45 Mio t/a, so sind die Dämmstoffe mengenmäßig von untergeordneter Bedeutung. Betrachtet man hingegen das Volumen, so werden Dämmstoffe ca. 50 % der Abfallströme ausmachen.

Dämmstoffe können grundsätzlich auf folgenden Wegen entsorgt werden:

- Deponierung
- Müllverbrennungsanlage (MVA)
- Recycling

Nach der neuen "Verordnung über die umweltverträgliche Siedlungsabfallentsorgung und über biologische Behandlungsanlagen" (TA Siedlungsabfall) wird die Deponierung von organischen Dämmstoffen in Zukunft nicht mehr möglich sein. Da Dämmstoffe schlecht kompaktierbar sind, würde eine zukünftige Ablagerung auch der Minimierung von Deponieraum entgegen sprechen.

Eine Entsorgung in der MVA ist möglich, allerdings bestehen zur Zeit keine Erfahrungen mit dem Verbrennen von hohen Anteilen von Dämmstoffen. Zum einen haben organische Dämmstoffe einen hohen Heizwert, zum anderen ist das Handling von Material geringer Dichte auf Verbrennungsrosten erschwert. Das Abbrandverhalten unterscheidet sich signifikant von den jetzigen bestimmenden Müllfraktionen. Der Einfluss der Flammschutzmittel ist unklar.

Folgende Punkte sind bei der Analyse der Entsorgung von Dämmstoffen zu berücksichtigen:

1. Das Recycling von organischen Dämmstoffen ist technisch in verschiedenen Formen praktikabel. Es ist jedoch fraglich, ob es bei Dämmstoffen mit langer Umlaufzeit aus dem Bausektor sinnvoll durchgeführt werden kann: Die grosse Innovationsdynamik bei Dämmstoffen lässt eine Wiederverwendung von Altmaterialien als sehr fraglich erscheinen. Ein „closed-loop“ Recycling ist nicht vorstellbar.
2. Für ein „open-loop“ Recycling, d.h. ein Einsatz von Recyclaten in anderen Produkten, fehlen entsprechende relevante Anwendungen.
3. Es werden parallel viele unterschiedliche Dämmstoffe verbaut.
4. Alt-Dämmstoffe sind stark verunreinigt. Dämmstoffe werden (mineralisch) verklebt. Eine Reinigung ist nur unter sehr hohem Kostenaufwand in Relation zur Menge durchführbar.
5. Die geringe Dichte führt zu hohen spezifischen Transportkosten, so dass zentrale Anlagen praktisch nicht wirtschaftlich bedient werden können.

Der sinnvolle Einsatz von Dämmstoffen im Bausektor wird in Zukunft ein hohes Abfallvolumen darstellen. Deponierung oder Recycling erscheint nicht sinnvoll. Durch das hohe Abfallvolumen verändern sich die volumenmäßigen Inputströme in die MVA. Es ist zu erwarten, dass die hohen Transportkosten vermehrt durch ein Vorpressen der Schaumstoffe kompensiert werden, wodurch zusätzlich Treibmittel freigesetzt würden, die dann auch in entsprechenden Modellrechnungen zu berücksichtigen wären.

5.2.2 Modellierung des Systems: Die alu-kaschierte PU-Dämmplatte als Referenzsystem

Etwa 35 % des 65 000 t umfassenden Inlandsverbrauchs von PU-Hartschaum für Dämmzwecke (ohne Elektrogeräte- und Montageschaum) entfallen auf Plattenschaum. Davon wiederum ist nach Auskunft der beiden Marktführer Puren und Bauder (zusammen zwei Drittel des Inlandsmarkts) die Steildachdämmung die wichtigste Anwendung - vor Wand-, Decken- und Fußbodendämmung u. dgl..

Daher ist der Grundansatz dieses Anwendungsbeispiels der Vergleich zwischen den Wärmeverlusten durch ein PU-gedämmtes Dach hindurch und den Emissionen des in der Schaumherstellung eingesetzten Treibmittels. Es wird nicht ein komplettes Haus bilanziert, sondern nur der Wärmeübergang durch ein mit PU-Dämmplatten gedämmtes Steildach. Neben dem für die Dämmung entscheidenden PU-Schaum werden andere Dachkomponenten mit berücksichtigt. Die Betrachtungseinheit ist jeweils 1 m² Dachfläche.

Zur Steildach-Dämmung in Wohngebäuden (Neu- und Altbau) werden zunehmend PU-Hartschaum-Platten eingesetzt. Am gesamten Dämmstoffmarkt hat die PU-Dämmung zwar nur einen Flächenanteil von 6% - weit hinter Mineralwolle und expandiertem Polystyrol (Leisewitz/Schwarz 2000). Allerdings hat PU-Hartschaum bei der hochwertigen Wärmedämmung auf Dachsparren (kaum Kältebrücken!) einen überdurchschnittlichen Flächenanteil, zumal die gewünschte Dämmwirkung mit Platten in einer Dicke unter 14 cm erreicht werden kann, die noch ohne Komplikation auf den üblichen Dachsparren genagelt werden können. (Bei Wärmedämmung zwischen den Dachsparren dominiert Mineralfaser-Material).

Standard - im Sinne von am meisten verwendet - unter derartigen PU-Dachplatten ist die beidseitig mit Aluminiumfolie kaschierte Platte mit einer mittleren Rohdichte von 32 kg/m³ (30 kg/m³ sind das vorgeschriebene Minimum) und einer Dicke von 105 mm. Wegen der Anwendung in Gebäuden muss die Dämmplatte, anders als Kühlfahrzeugschaum, flammgeschützt ausgerüstet werden (Brandklasse B 2).

Die Umstellung auf n-Pentan begann schon 1995 und verlief teilweise direkt von FCKW-11 auf den brennbaren Kohlenwasserstoff, unter Umgehung des H-FCKW-141b. Wegen der in Deutschland geltenden Wärmeleitfähigkeitsgruppen (WLG) für das λ in Fünfer-Stufen konnte die gemeinsame WLG 025, die von $\lambda=0,019$ bis 0,024 W/mK reicht, jedoch beibehalten werden, ohne dass die Dicke der Platte (105 mm) erhöht wurde. Die Dämmwirkung pro Quadratmeter (u-Wert) hat sich durch n-Pentan allerdings vermindert, und zwar theoretisch um 14 %. Die bevorstehende EU-Normung (vgl. Bayer, 2001), welche die Wärmeleitfähigkeiten λ in Einer-Schritten klassifiziert, wird die gemeinsame Zuordnung beenden. Zum Zeitpunkt ihres Inkrafttretens wird allerdings das Treibmittel H-FCKW-141b nicht mehr erlaubt sein. Andererseits dürfte dann auf dem Markt der um nur 1 mW/mK im λ höhere H-FKW-365mfc als Treibmittel allgemein zur Verfügung stehen.

5.2.3 Die Ausgangsdaten für die Bilanzierung der Dachdämmplatte

1. Rezeptur: Treibmittel und Flammschutzmittel

Die typischen Rezepturen für die Herstellung der Standard-Bau-Dämmplatten werden in Tabelle 22 präsentiert. Empirisch besser abgesichert ist diejenige mit dem Treibmittel n-Pentan. Die Formulierung für den H-FKW-365mfc lehnt sich an diejenige des H-FCKW-141b an, wobei die für die Mengenbestimmung des einzusetzenden Treibmittels wichtige geringere Polarität und damit Matrix-Löslichkeit von 365mfc gegenüber 141b (Solvay 2001) berücksichtigt ist.

Tabelle 22 Mittelwerte der Rahmenrezepturen für 30-33 kg/m³ PU-Plattenschaum zur Steilwanddämmung in Gewichtsteilen

	Formulierung mit n-Pentan	Formulierung mit 365mfc
Isocyanat	240	240
Polyol	100	100
Wasser	1	1
Additive	5	5
Flammschutzmittel	12	11
Treibmittel	19	50 ¹⁸
Teile gesamt	377	407

Der Treibmitteleinsatz macht bei den gängigen n-Pentan-Schäumen 5 % (19 Teile) aus, beim H-FKW-365mfc ist der Gewichtsanteil mit 12 % (50 Teile) deutlich höher.

Erstens: Für das Aufschäumen des PU-Reaktionsgemischs wird das Treibmittel als Gas benötigt, das, bezogen auf einen Kubikmeter Schaum, in beiden Fällen vom Volumen her gleichgroß sein muss. Da sich die Gewichte gleicher Gasvolumina wie ihre molaren Massen zueinander verhalten, muss von 365mfc (MG: 148) etwa die doppelte Masse wie von n-Pentan (MG: 72) eingesetzt werden. Zweitens: Dank der höheren Polarität gegenüber dem (unpolaren) n-Pentan lösen sich vom 365mfc etwa 20 bis 30 % in der Schaummatrix. Es ist daher eine entsprechende Zusatzdosis erforderlich, um genug Gas für die eigentliche Zellbildung zur Verfügung zu haben.

Ein wichtiger Punkt bei Bau-Dämmschaum ist, dass er Flammschutzmittel enthalten muss, um die Kriterien der Baustoffklasse 2 zu erfüllen. Die Zugaben der Flammschutzmittel (Tris(chlorisopropyl)phosphat und/oder Triethylphosphat) müssten im Falle von n-Pentan etwas größer sein als bei der Verwendung des schwerer brennbaren H-FKW-365mfc: 12 Teile gegenüber 11 Teilen. Flammschutzmittel werden quantitativ grundsätzlich auf die brennbaren Substanzen (Brandlast) bezogen (Demharter 2002). Das sind Isocyanat, Polyol, Additive (Zellstabilisatoren, Aktivatoren) im Fall von 365mfc. Bei n-Pentan kommt das Treibmittel selber zur Brandlast dazu, so dass die Flammschutzmittelzugaben geringfügig erhöht werden müssen.

¹⁸ Möglicherweise werden in der Praxis wegen der höheren Treibmittelkosten Formulierungen mit geringeren Anteilen an H-FKW-365mfc größere Bedeutung erlangen (R. Albach (Bayer Polymers, August 2003). Die Dämmwerte dürften sich bei solchen Rezepturen dann in Richtung von Pentan-geschäumten Systemen entwickeln.

Da der H-FKW-365mfc aber nicht unbrennbar ist, sondern nur schwerer brennbar, ist nicht sicher, ob der Flammenschutzmittelgehalt des Schaums in der Praxis überhaupt gesenkt werden kann. Mit Flammenschutzmitteln befasst sich diese Studie nachfolgend nicht weiter.

2. Herstellung der Dämmplatten und Treibmittelverluste

Die mit flexibler Aluminiumfolie beschichteten PU-Dämmplatten werden im kontinuierlichen Verfahren auf Doppeltransportanlagen hergestellt. Diese bestehen aus zwei übereinander angeordneten, gegeneinanderlaufenden Endlosförderbändern, deren Abstand auf die Dicke der Dämmplatte eingestellt ist.

Schäumprozess

Alufolie wird von Rollen abgewickelt und in den Raum zwischen die gegeneinander laufenden Transportbänder geführt. Das Reaktionsgemisch wird auf die Innenfläche der unteren Folie aufgetragen und während des Aufschäumens zwischen den beiden ca. 10 m langen Transportbändern hindurchgeführt. Hinter den Transportbändern tritt die bedeckte PU-Bahn ausgehärtet heraus und wird nach Passieren der Abkühlstrecke auf die gewünschten Längen geschnitten. Eine Seitenbegrenzung verhindert das Ausdringen von Schaum. Die Treibmittelverluste während der Schäumung werden vom Hersteller auf 3 bis 4 % der eingesetzten Menge angegeben. Im Rahmen der weiteren Berechnungen im Rahmen dieser Studie wird der Mittelwert von 3,5 % verwendet.

Konfektionierung

Die fertigen Platten werden danach am Rand begradigt. Außerdem werden Nut und Federn eingefräst. Dabei kommt es zu gasförmigen Treibmittelverlusten durch Aufreißen von Schaumzellen. Auch die abgeschnittenen und abgefrästen Bruchstücke und Mehle geben Treibmittel frei: Die Bruchstücke werden innerbetrieblich zermahlen und zusammen mit dem mehlhaltigen Abfall zu Pressplatten für den Verkauf recycelt. Der Treibmittelschwund durch die Konfektionierung wird gleichfalls auf 3-4 % (Mittelwert 3,5 %) geschätzt.

Montage

Beim Einbau der fertigen Platten unter das Dach können Abfälle durch optimiertes Zuschneiden zwar minimiert, aber nicht auf Null gebracht werden, da an den Rändern oder etwa bei einem Kamin u. dgl. immer gewisse Schnittreste anfallen. Die Größenordnung wird vom Hersteller auf etwa 1 % geschätzt. Diese Reste werden meist an der Baustelle dem Bauabfall oder Hausmüll zugeführt.

Nutzphase

Die jährlichen Diffusionsverluste von Treibmittel werden hier, den Herstellerangaben (Demharter 2002; Ehret 2002) zufolge, mit 0,2 % veranschlagt, obwohl die Fachliteratur höhere Werte nennt (AFEAS 2000: 0,5 %/a; IPCC 1999: 0,5 %/a).

3. Dämmplatten-Entsorgung am Lebensende: 80% Rückhaltung des Treibmittels

Zur grundsätzlichen Entsorgungsproblematik von Dämmstoffen sei auf Abschnitt 5.2.1 weiter oben verwiesen. Im Speziellen gilt: Solange Häuser wie heute gebaut werden und für das Lebensende die Abbruchbirne statt gezielter Demontage vorgesehen ist, ist es technisch sehr aufwendig (und wird bisher nicht praktiziert), alten Dämmschaum separat zu entsorgen und evtl. einer Verbrennung zuzuführen. Bei einem Wohnhaus normaler Größe macht die PU-Dämmung des Steildachs etwa 10 bis 15 m³ oder 300 bis 450 kg aus, was im gesamten Bauschutt nur eine vergleichsweise geringe Rolle spielt – ähnlich einem darin enthaltenen organischen Fußbodenbelag.

Stoffliches Recycling ausgebauter alter Dämmplatten ist wegen Feuchtigkeit nur schwer möglich. Trockener Schaum, wie bei homogenen Produktionsabfällen von der Neumontage, kann zu den oben erwähnten Pressplatten verarbeitet werden, die aber nur das PU-Material, nicht das Treibmittel rückgewinnen (Demharter 2002).

Der Entsorgungsweg alten Dach-Dämmschaums ist bislang die Bauschuttdeponie. Mit der "Verordnung über die umweltverträgliche Siedlungsabfallentsorgung und über biologische Behandlungsanlagen" (TA Siedlungsabfall) entfällt die Deponiemöglichkeit für unbehandelten organischen Abfall. PU-Dämmplatten dürften Teil des "gemischten" Bauschutts werden, der vom – weiterhin preiswert deponierbaren - anorganischen Bauschutt zu trennen und einer Verbrennung zuzuführen ist. Bei der Verbrennung werden Resttreibmittel im Altschaum mitzerstört.

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass im Zuge des Gebäudeabrisses zuvor ein großer Teil der in den Dachdämmplatten befindlichen Treibmittel freigesetzt wird. In der nachfolgenden Analyse werden 20% als Freisetzung beim Abriss und 80% Vernichtung durch Verbrennung für das im Altschaum noch enthaltene Treibmittel (82% der Ausgangsmenge) angesetzt. Die 80% können als optimistischer Wert gelten.

4. Treibmittelverluste über den Lebensweg

In Tabelle 23 sind die für die Berechnung der Treibhausgasbilanz der PU-Dämmplatten im Spitzdach verwendeten Werte wiedergegeben. Über die gesamte Lebensdauer entweicht unter günstigen Bedingungen über ein Drittel (rechnerisch 34,4%) des ursprünglich eingesetzten Treibmittels unverändert in die Atmosphäre.

Tabelle 23 PU-Dach-Dämmplatte: Treibmittelverluste in unterschiedlichen Phasen der Lebensdauer in % der bei der Herstellung eingesetzten Menge

Erstjahrverluste		Nutzphase-Emission		Entsorgungsverlust 20% vom Rest	
Schäumung	3,5	Diffusion pro Jahr	0,2	Abriss-Verlust	16,4
Konfektion	3,5				
Montage	1,0				
Gesamt	8,0	Gesamt*	10,0	Gesamt	16,4
Totalverlust über die gesamte Lebensdauer: 34,4					

* Es wird eine Nutzphase von 50 Jahren unterstellt.

Quellen: Puren 2002, Bauder 2002.

5. Die Dämmwerte: Wärmedurchgangskoeffizient (u-Wert, früher: k-Wert):

Der für den kompensatorischen Heizenergiebedarf entscheidende u-Wert eines Quadratmeters Dachfläche, die mit 10,5 cm dickem PU-Schaum gedämmt ist, beträgt im Fall n-Pentan ($\lambda=24$ mW/mK) 0,214 W/m²K, bei H-FKW-365 ($\lambda=22$ mW/mK) 0,197 W/m²K.

$$u - Wert = \frac{1}{\left(\sum_1^n \frac{d_n}{\lambda_n}\right)} \quad \text{Gleichung 4}$$

u-Wert: Wärmedurchgangskoeffizient

d_n : Dicke der Schicht n

λ_n : λ -Wert der Schicht n

Für das hier betrachtete Steildach mit Dämmung errechnet sich der u-Wert:

$$u - Wert_{Dach} = \frac{1}{\left(0,17 \frac{m^2 K}{W} + \frac{d_{Dach}}{\lambda_{Dach}} + \frac{d_{Dämmung}}{\lambda_{Dämmung}} + \frac{0,02}{0,7} \frac{m^2 K}{W}\right)} \quad \text{Gleichung 5}$$

Es werden folgende Komponenten berücksichtigt:

Summand1: Wärmeübergangskoeffizient

Summand2: Steildach mit einer Holzschicht von 2 cm Dicke, mit $d_{Dach} = 2$ cm, $\lambda_{Dach} = 0,2$ W/(m·K)

Summand3: Dämmung, mit einer Standarddicke von 10,5 cm und λ -Werten von 24 W/(m·K) für n-Pentan-Dämmplatten und 22 W/(m·K) für 365mfc-Dämmplatten

Summand4: Putz

6. Die Heizung: Transmissionsverluste, Anlagenaufwandszahl und Heizgradstunden

Die Heizung hat die Transmissions- bzw. Wärmeverluste durch das Steildach auszugleichen. Dabei werden Grundannahmen bezüglich des eingesetzten Brennstoffs und Heizungssystems sowie der Anzahl der Heizstunden getroffen. Als Heizgradstunden werden im Standardfall 66 khK/a angenommen. Die Heizung besteht aus einem Gas-Brennwert-Kessel mit Fensterlüftung. Die Grundlage für die Berechnung ist die DIN-V 4701-10 bzw. DIN-V 4108-6 mit einem reduzierten Heizgradstundenwert.

Der Endenergiebedarf lässt sich wie folgt ableiten:

$$q_{Dach} = HzSt \times u - Wert_{Dach}$$

q_{Dach} : Energiebedarf zum Ausgleich der Transmissionsverluste durch das Dach, Angaben in kWh/m² Dachfläche/a

HzSt: Heizgradstunden, Angaben in khK/a

u-Wert_{Dach}: Wärmedurchgangskoeffizient des Dachs

Der Endenergiebedarf q_E wird wie folgt berechnet:

$$q_E = (q_H + q_V) \times e_g$$

q_E : Endenergiebedarf, um die Wärmeverluste durch das gedämmte Dach auszugleichen,
Angaben in kWh/m² Dachfläche/a

q_H : Heizenergiebedarf, beschränkt auf die Transmissionsverluste (hier: $q_H = q_{\text{Dach}}$)

q_V : Energieverluste aus Speicherung, Verteilung und Übergabe

e_g : Aufwandszahl für die Erzeugung der Heizenergie

Da die Energieverluste aus Speicherung, Verteilung und Übergabe im wesentlichen unabhängig von der Wärmedämmung bzw. der Dicke der Dämmung sind, wird q_V für die vergleichende Betrachtung gleich Null gesetzt.

Die CO₂-Emissionen zum Ausgleich der Wärmeverluste durch das gedämmte Dach werden dann wie folgt berechnet:

$$E_{CO_2} = EF_{CO_2} \times q_E$$

Gleichung 6

E_{CO_2} : CO₂-Emissionen zum Ausgleich der Wärmeverluste durch das gedämmte Dach

EF_{CO_2} : Brennstoff- bzw. Erzeugungs-spezifische Emissionsfaktoren

q_E : Endenergiebedarf

Um den Endenergieverbrauch für den Standardfall zu bestimmen, wird als Anlagenaufwandzahl 1,08 für eine Gas-Brennwert-Heizung (70/55 °C) eingesetzt. Pro kWh werden 0,2 kg CO₂ emittiert.

7. Energiebedingte CO₂-Emissionen bei der Herstellung der Dämmplatte

Für die Energie, die zur Herstellung der Dämmplatten einschließlich aller Grundstoffe und Vorketten (ohne Treibmittel) benötigt wird, auch graue Energie genannt, werden folgende Annahmen getroffen: Für die Grundstoffe einschließlich Herstellung von 1 m² PU-Dämmplatte mit einer Dicke von 10 cm werden ca. 23 kg CO₂ (23.421 g) emittiert (Eigenberechnungen auf Basis von Kräling/Krömer 2000). Dieser Wert wird nachfolgend nicht nach Art des Treibmittels variiert.

5.2.4 Bilanz Standardfall für n-Pentan und H-FKW-365mfc

1. CO₂-Bilanz für n-Pentan und H-FKW-365

Im Standardfall (1 m² Dachfläche, 10,5 cm Dicke des PU-Schaums, 50 Jahre Nutzungsdauer, 80% Rest-Treibmittel-Rückhaltung bei Entsorgung, 66khK jährliche Heizwertstunden und Einsatz einer Erdgas-Brennwert-Heizung) beträgt die jährliche äquivalente CO₂-Emission im Falle von n-Pentan 3,55 kg. Im Falle von H-FKW-365 ist die Menge (CO₂ plus CO₂-Äquivalente) mit 5,78 kg deutlich höher.

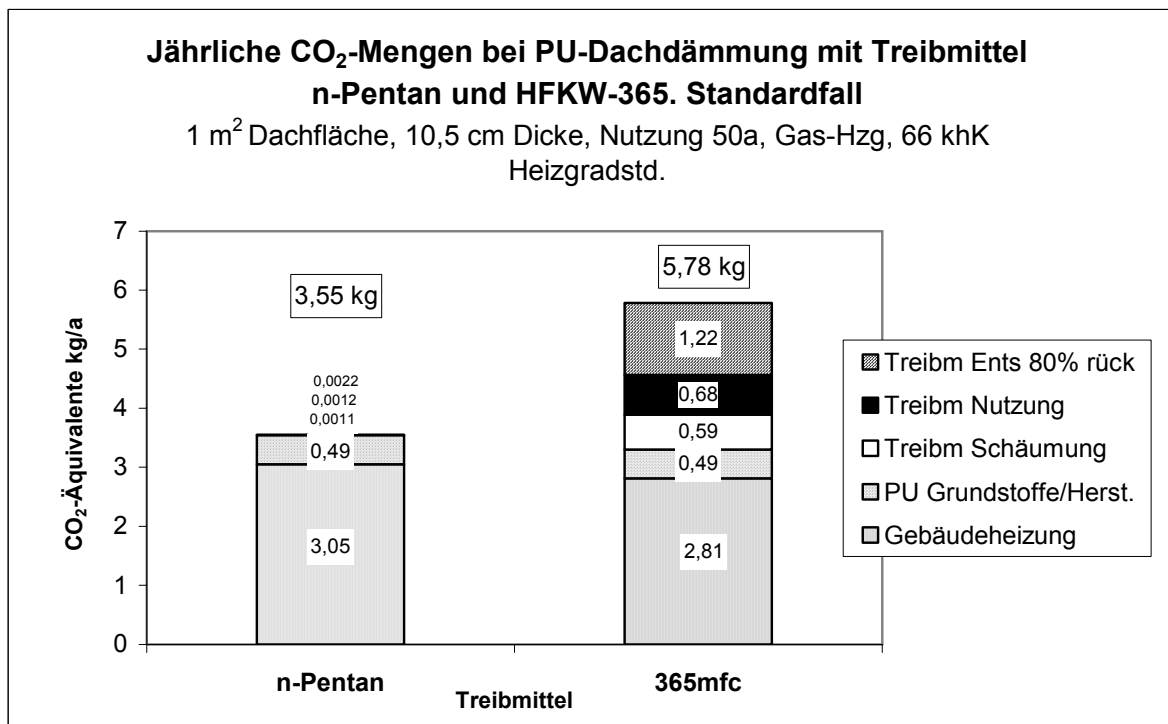


Abbildung 18 Vergleich jährlicher CO₂-Äquivalent-Mengen für PU-Dachdämmung mit Treibmittel n-Pentan und H-FKW-365. Standardfall (1 m² Dachfläche, 10,5 cm Dicke, Nutzung 50a, Gas-Brennwert-Heizung, 66 khK Heizgradstunden). Bei n-Pentan entstehen jährlich insgesamt 3,55 kg CO₂, bei H-FKW-365 dagegen 5,78 kg CO₂-Äquivalente.

Wie Abbildung 18 zeigt, entsteht bei H-FKW-365 zwar weniger heizbedingtes CO₂ (2,81 gegen 3,05 kg), allerdings überkompensiert die auf 1 Jahr umgelegte Treibmittelemission (in CO₂-Äquivalenten) mit 2,49 kg (0,59 + 0,68 + 1,22) bei weitem jene rein energiebedingten CO₂-Vorteile. (Die 0,49 kg CO₂ aus der Plattenherstellung sind in beiden Fällen gleich groß). Die treibhauswirksamen Pentanemissionen (GWP n-Pentan: 4) fallen so gut wie nicht (< 0,01 kg) ins Gewicht. (In künftigen Grafiken werden sie nicht mehr gesondert ausgewiesen.)

2. Teil-Kostenbilanz für n-Pentan und H-FKW-365 (10,5 cm Dicke)

Werden nur die jährlichen Heizkosten pro m² Dachfläche und die auf ein Nutzzjahr umgelegten Anschaffungskosten der 10,5 cm dicken Dämmplatten (ohne Zinsen) bewertet, betragen diese jährlichen Betriebskosten bei n-Pentan 1,03 Euro, bei H-FKW-365 einen Cent mehr, nämlich 1,04 Euro. Die um 0,04 Euro geringeren Energiekosten werden durch die 0,05 Euro Kosten für das Treibmittel 365mfc leicht überkompensiert. Pentan als Treibmittel fällt mit jährlich 0,003 Euro pro Platte und Jahr kaum ins Gewicht, wie auch aus Abbildung 19 hervorgeht.

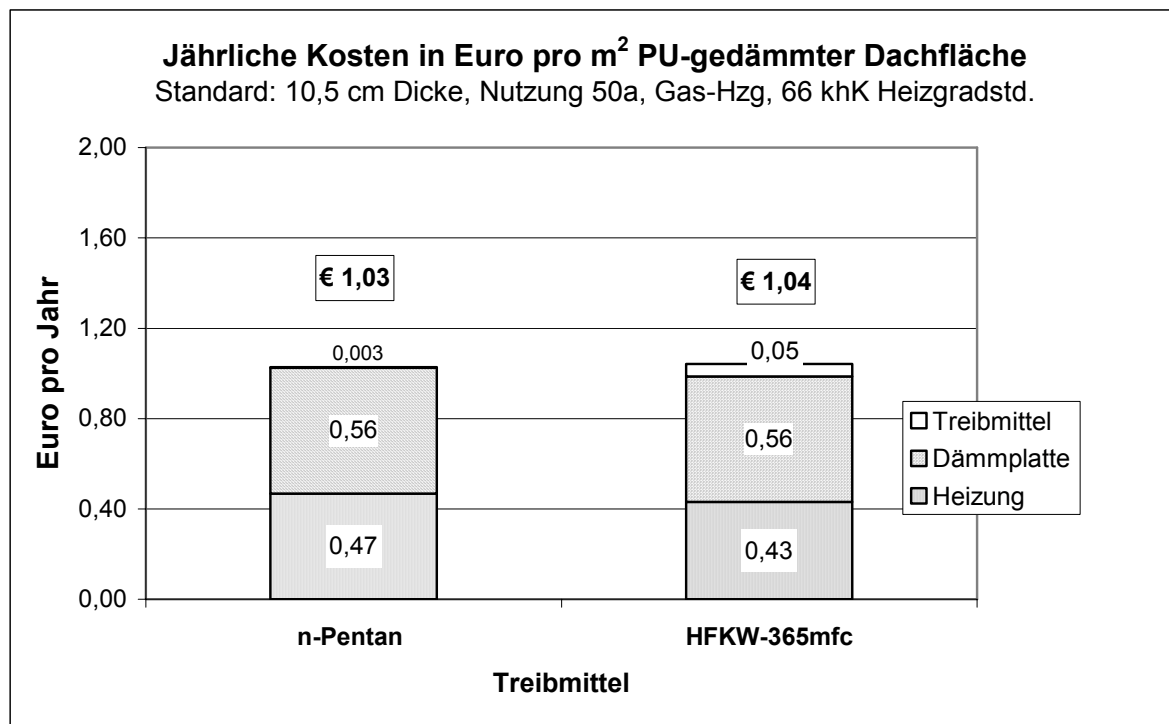


Abbildung 19 Jährliche Kosten in Euro pro m² PU-gedämmter Dachfläche. Standard: 10,5 cm Dicke, Nutzung 50a, Gas-Heizung, 66 khK Heizgradstunden. Die addierten Teilkosten betragen bei n-Pentan 1,03 Euro, bei H-FKW-365 sind es 1,04 Euro. Der Grund für die geringen Mehrkosten bei H-FKW-365 ist das mit 6,50 Euro pro kg teurere Treibmittel, von dem außerdem eine größere Masse als im Falle von Pentan benötigt wird.

Tabelle 24 Verwendete Preise im Betriebskosten-Modell

1 kWh Erdgas	0,031 Euro (0,306 Euro pro m ³)
1 m ² PU-Dämmplatte Dicke 10,5 cm (RG 32)	27,82 Euro
1 kg H-FKW-365mfc (rein)	6,50 Euro
Einsatz H-FKW-365 für 1 Dämmplatte 10,5	413 Gramm
1 kg n-Pentan	1,00 Euro
Einsatz n-Pentan für 1 Dämmplatte 10,5	170 Gramm

5.2.5 Sensitivitätsanalyse. CO₂-Bilanz bei Variation verschiedener Parameter

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse werden der Heizungstyp, die Nutzdauer der Dämmung, die Heizstunden und die Dicke der Dämmschicht variiert. Der Vergleich zwischen n-Pentan- und H-FKW-365-Dämmplatte erfolgt in zwei Stufen: Erstens wird die Dicke der Dämmschicht mit 10,5 cm konstant gehalten, um die Treibmittelemissionen der 365mfc-Dämmplatten mit den Wärmeverlusten aufgrund der schlechteren Dämmwirkung von n-Pentan-Dämmplatten zu vergleichen. Zweitens wird die Dicke der n-Pentan-Dämmplatte vergrößert, um die Dämmwirkung der 365mfc-Dämmplatte zu erreichen. Hier ist der zusätzliche Materialbedarf der n-Pentan-Dämmplatte zu bilanzieren.

1. Variation der Heizsysteme und CO₂-Bilanz

In Abbildung 20 werden die Auswirkungen von drei verschiedenen Heizsystemen auf die CO₂-Bilanz untersucht. Erstens: Gas-Brennwert-Heizung (bisher Standardfall), zweitens: Niedertemperatur-Ölheizung mit Fensterlüftung, drittens Elektro-Direktheizung mit Fensterlüftung.

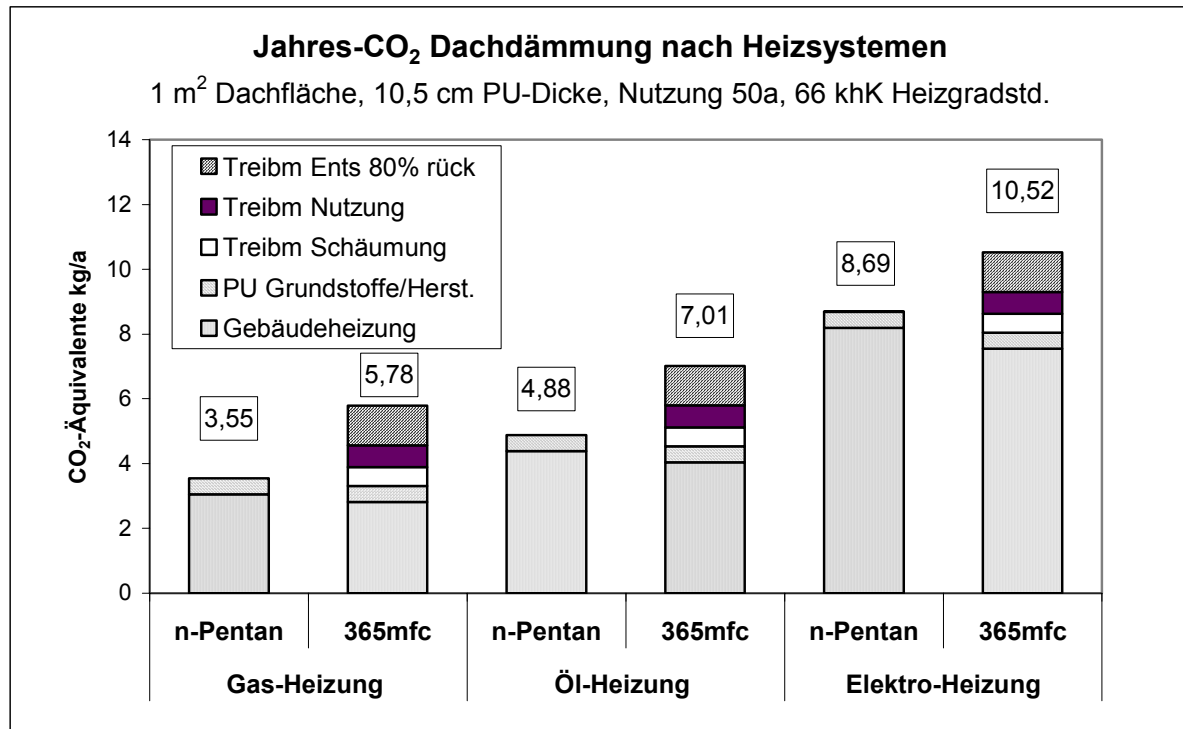


Abbildung 20 Einfluss der Heizsysteme auf die CO₂-Bilanz PU-Dämmung. 1 m² Dachfläche, 10,5 cm PU-Dicke, Nutzung 50a, 66 khK Heizgradstunden. Die Gas-Brennwert-Heizung (links – hier der Standardfall) erzeugt absolut die geringsten CO₂-Emissionen, am meisten entstehen bei der Elektro-Direktheizung (rechts). Aufgrund der Treibmittelverluste schneiden H-FKW-Systeme (rechte Säulen) stets schlechter ab als die Pentan-Systeme (linke Säulen).

Wie zu erwarten, sind die reinen Heiz-CO₂-Emissionen im Falle der Gas-Heizung am niedrigsten (3,55/5,78 kg CO₂/a). Am höchsten sind sie bei der Elektroheizung mit 8,69/10,52 kg. Dazwischen liegt die Ölheizung mit 4,88 bzw. 7,01 kg. Da nur die Heizsysteme variiert werden, nicht aber die Laufzeit der Heizung (Nutzdauer, Heizgradstunden), sind die durch das H-FKW-Treibmittel bedingten CO₂-äquivalenten Emissionen in allen drei Fällen gleich groß und sorgen für die schlechtere CO₂-Bilanz der H-FKW-Systeme. Die relative Differenz des Gesamt-CO₂ zum entsprechenden Pentan-System ist bei der Gas-Brennwert-Heizung am höchsten (+ 63 %), bei der Elektroheizung mit + 21 % am niedrigsten, aber immer noch sehr groß.

2. Variation der Nutzdauer und CO₂-Bilanz

Die zuvor für den Standardfall der Modellierung angenommene Nutzungsdauer beträgt 50 Jahren. Wird unter Annahme der Standardbedingungen (Gas-Heizung, 66 khK Heizgradstunden, 10,5 cm-Dicke und 1 m² Dämmfläche) die Nutzphase des Dämmschaums variiert, zeigt sich grundsätzlich das gleiche Bild wie bisher für den Vergleich der H-FKW- und Pentan-Säulen. gilt: je kürzer die Nutzdauer der Dämmplatte, desto größer die jedem Nutzungsjahr zuzuordnenden Emissionsmengen, die aus dem - einmaligen – Einsatz dieser Dämmplatte resultieren – und umgekehrt. Die einmaligen Schäumungs- und Entsorgungsverluste des H-FKW-Treibmittels schlagen umso stärker auf die Bilanz durch, auf je weniger Jahre sie sich verteilen. Dies gilt auch für die mit der einmaligen Herstellung der Platte (Grundstoffe u. dgl.) verbundenen CO₂-Emissionen. Lediglich die jährlichen Treibmittelemissionen während der Nutzung bleiben voraussetzungsgemäß in allen drei Fällen gleichgroß (0,2 % jährlich).

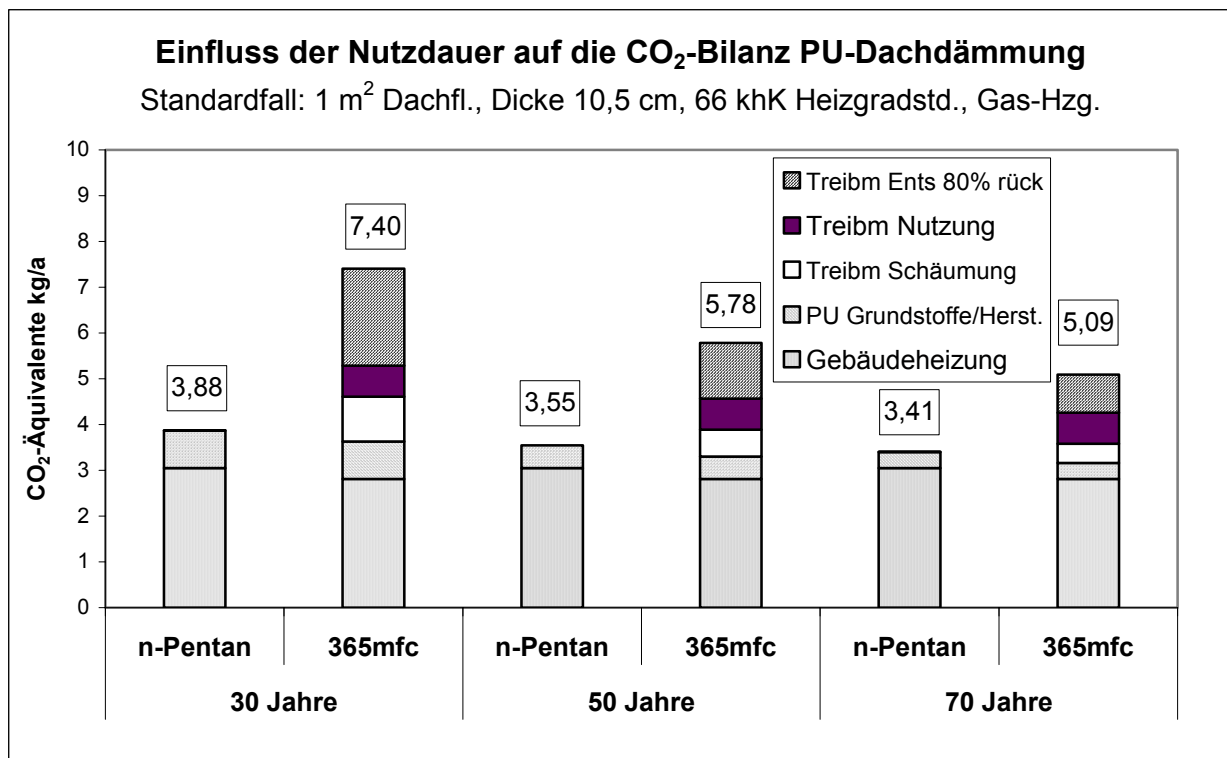


Abbildung 21 Einfluss variabler Nutzdauer (Standardfall: 50 Jahre) auf die CO₂-Bilanz PU-Dämmung. 1 m² Dachfläche, Dicke 10,5 cm, 66 khK Heizgradstunden, Gas-Brennwert-Heizung. Je kürzer die Dämmplatte genutzt wird, desto größer ist, auf ein Jahr verteilt, der Treibmittelverlust bei Schäumung und Entsorgung. Ebenfalls stärker wirkt das CO₂ aus der PU-Grundstoffe & Herstellung.

3. Variation der Heizgradstunden und CO₂-Bilanz

Aus Abbildung 22 geht hervor, dass die Zahl der Heizgradstunden das CO₂ aus der Gebäudeheizung merklich anhebt – im Pentanfall von 2,94 kg (bei 53 khK/a) auf 4,16 kg (bei 79 khK/a). Die mit den Treibmitteln verbundenen äquivalenten CO₂-Emissionen bleiben voraussetzungsgemäß von der Heizdauer pro Jahr unberührt.

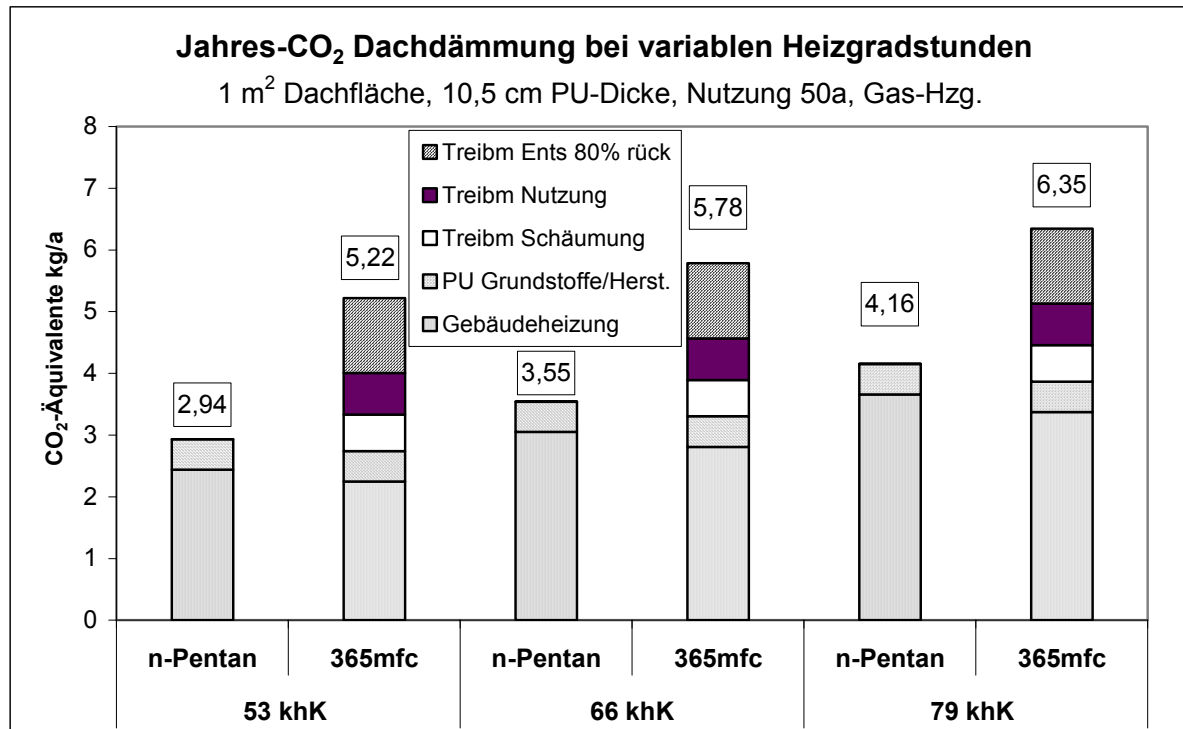


Abbildung 22 Jahres-CO₂ Dachdämmung bei variablen Heizgradstunden (Standardfall: 66 khK): 1 m² Dachfläche, 10,5 cm PU-Dicke, Nutzung 50a, Gas-Brennwert-Heizung. Je länger im Jahr geheizt wird, desto geringer wird der Abstand zwischen den Gesamt-CO₂-Mengen von Pentan und H-FKW-365, ohne dass er sich wirklich signifikant verkürzt.

4. Erhöhte Dicke der Dämmschicht zwecks gleichen u-Werts

Um gleiche Dämmwirkung pro m^2 Dachfläche wie mit H-FKW-365mfc zu erzielen, muss bei n-Pentan mehr Schaum als bisher eingesetzt werden. Platzprobleme (wie beim Kühlfahrzeugbau) sind im Dachraum bei einer Materialverdickung um maximal 1 cm nicht zu erwarten. Um den u-Wert aufgrund der 10,5 cm dicken n-Pentan-Platte von $0,214 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf den bisher dem Einsatz der H-FKW-365-Platte vorbehaltenen u-Wert von $0,197 \text{ W/m}^2\text{K}$ abzusenken, muss die Plattendicke bei n-Pentan-Schäumung um 9 % auf 11,455 cm erhöht werden. Das ist eine Zunahme um knapp 1 cm.

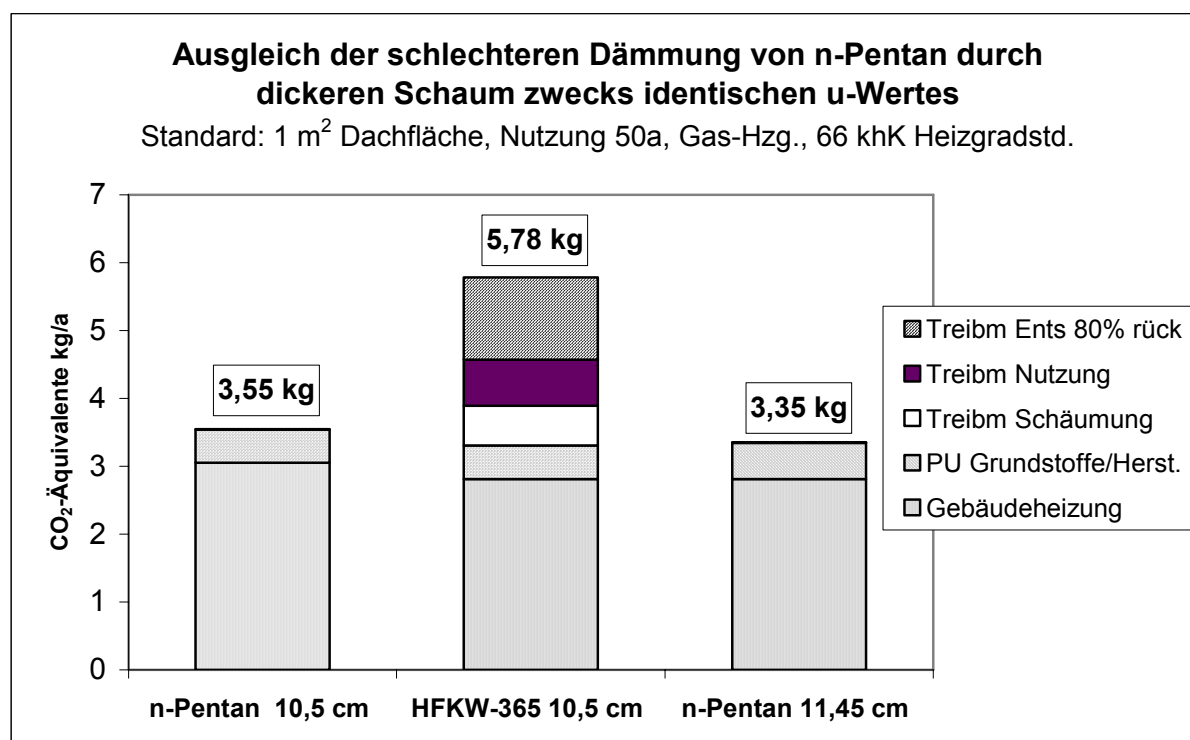


Abbildung 23 Ausgleich schlechterer Dämmung von n-Pentan durch dickeren Schaum, um identischen u-Wert zu erreichen: 1 m^2 Dachfläche, Nutzung 50a, Gas-Heizung, 66 khK Heizgradstunden. Schaumdicke 11,45 statt 10,5 cm. Der Vergleich der rechten Säule (Pentan, 11,45 cm) mit der mittleren (H-FKW) zeigt, dass die CO_2 -Emissionen aus der Gebäudeheizung mit $2,81 \text{ kg/a}$ in beiden Fällen identisch sind. Leicht erhöht, $0,54$ statt $0,49 \text{ kg CO}_2/\text{a}$, ist das CO_2 aus der Herstellung der PU-Platte (Grundstoffe/Herstellung). Der gesamte äquivalente CO_2 -Ausstoß bei der verdickten Pentan-Dämmplatte ist mit $3,35 \text{ kg CO}_2/\text{a}$ mit Abstand am niedrigsten.

Vom ökologischen Standpunkt her ist die Verdickung der n-Pentan-geschäumten Dämmplatte von 10,5 auf 11,45 cm eine gute Lösung. Der entsprechende CO_2 -Ausstoß ist mit $3,35 \text{ kg}$ jährlich viel geringer als die $5,78 \text{ kg CO}_2$ Äquivalente im Falle von 10,5 cm dicker Dämmung mittels H-FKW, aber auch noch deutlich niedriger als die $3,55 \text{ kg CO}_2$ im Falle der nur 10,5 cm dicken n-Pentan-Dämmplatte. Darum sei abschließend noch ein Blick auf die Kosten geworfen.

5. Teil-Betriebskostenvergleich der drei verschiedenen Dämmplatten

Abbildung 24 zeigt, dass die zusätzlichen Kosten der um knapp 1 cm dickeren PU-Dämmplatte, die mit n-Pentan geschäumt wird, weniger als 1,5 Cent jährlich betragen. Statt 1,026 Euro sind es im Falle der 11,45 cm dicken Platte 1,04 Euro, so viel wie die H-FKW-geschäumte Platte (10,5 cm) kostet. Die unmittelbaren Heizkosten sinken um 3,7 Cent, die dickere Pentan-geschäumte Platte kostet 5 Cent jährlich mehr in der Herstellung.

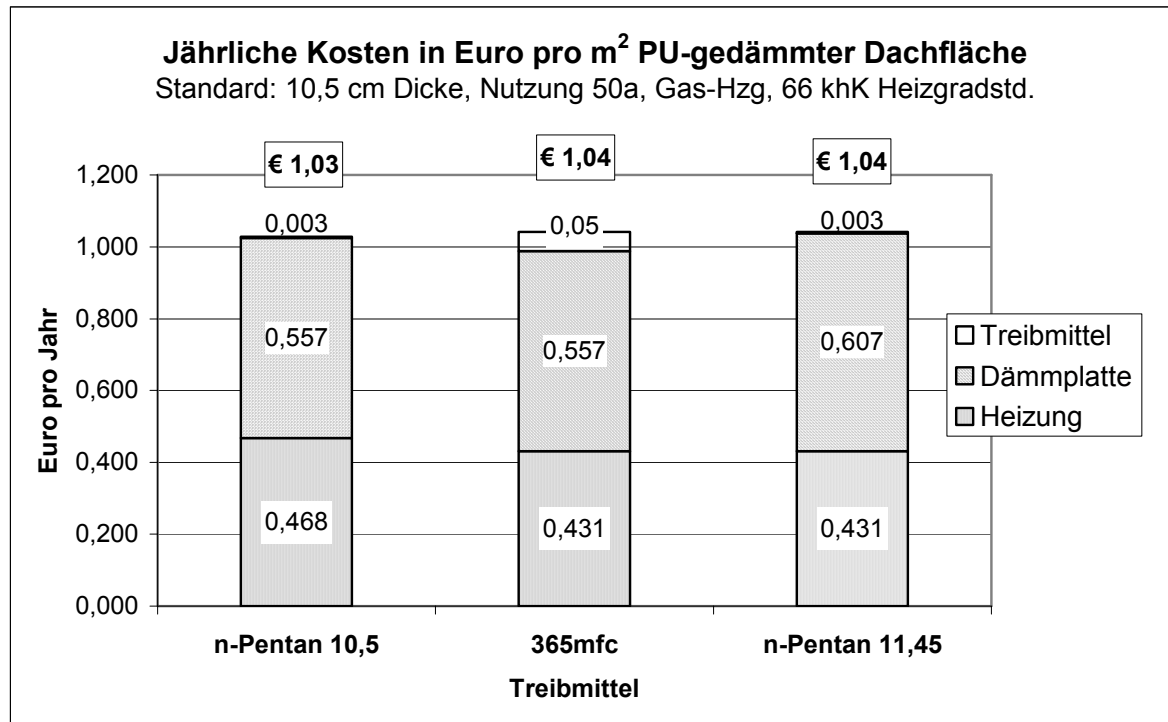


Abbildung 24 Jährliche Kosten in Euro pro m² PU-gedämmter Dachfläche. Standard: 10,5/11,45 cm Dicke, Nutzung 50a, Gas-Heizung, 66 khK Heizgradstunden. Infolge der Verdickung von 10,5 auf 11,45 cm (rechte Säule) steigt der Gesamtpreis der Dämmung von 1,03 auf 1,04 Euro jährlich, auf das Preisniveau der H-FKW-geschäumten Platte. Die Zusatzkosten setzen sich zusammen aus etwa 3,7 Cent weniger Kosten für Energie und 5 Cent mehr Kosten für die Dämmplatte.

5.2.6 Zusammenfassung

Es wurde im Rahmen dieses Abschnittes von Kapitel 5 gezeigt, dass für das Anwendungsbeispiel der PU-Dachdämmplatte die Pentan-geschäumte Platte eine robust deutlich bessere Treibhausbilanz aufweist als die H-FKW-geschäumte Alternative (sowohl bei einer Erhöhung der Dämmdicke für den Pentan-Schaum als auch bei geringfügig erhöhtem Heizenergiebedarf bei konstanter Dämmdicke).

Die Sensitivitätsanalyse, in welcher (1) das Heizsystem, (2) die Nutzdauer der Dämmung, (3) die Heizgradtage und (4) die Dicke der Dämmschicht jeweils für sich genommen variiert wurden, bestätigte diesen Befund zugunsten der Pentan-geschäumten Platte für alle Parameter:

- Wird der Heizungstyp geändert, steigen zwar die CO₂-Emissionen in der Reihenfolge Gasheizung, Ölheizung, Elektroheizung generell an. Aufgrund gleichbleibender

Treibmittelverluste trägt der H-FCKW-Fall wegen der höheren Triebhauswirksamkeit der Substanz jedoch stets um einen identischen Betrag mehr zu den CO₂-äquivalenten Gesamtemissionen bei als die Pentan-geschäumte Dämmung (unter sonst konstanten Bedingungen).

- Wird die Nutzdauer der Dämmung von 50 Jahren auf 30 Jahre verkürzt bzw. auf 70 Jahre verlängert, sinkt zwar mit der Länge der Nutzung der Mehrbeitrag zum Treibhauseffekt durch die H-FKW-geschäumte Dämmplatte relativ zur Pentan-geschäumten; die Treibmittelverluste verteilen sich dann auf mehr Jahre. Absolut betrachtet bleiben die CO₂-äquivalenten Gesamtemissionen im H-FKW-Fall jedoch grundsätzlich immer über dem Pentan-Fall.
- Vergleichbares gilt für die Variation der Heizgradstunden. Je länger im Jahr geheizt wird, desto geringer wird der Abstand zwischen den äquivalenten CO₂-Gesamtbeiträgen von H-FKW- und Pentan-geschäumter Dämmplatte. Allerdings vermindert sich der Mehrbeitrag bei H-FKW-Anwendung nicht wirklich signifikant.
- Wird, um die schlechtere Dämmwirkung von n-Pentan auszugleichen, die Schaumdicke angepasst, um den selben u-Wert wie durch H-FKW-365 bei unveränderter Plattenstärke zu erzielen, wird 9% mehr Polyurethan benötigt. Vom ökologischen Standpunkt erscheint dies als die beste Lösung, weil im Referenzfall (Gasheizung, 50 Jahre Nutzdauer, 66 khk Heizgradstunden) der äquivalente CO₂-Gesamtausstoß um 5-6% niedriger ausfällt als bei Anwendung der unverdickten Dämmplatte mit n-Pentan.

Kostenseitig ist die Pentan-geschäumte Platte etwa gleich mit der H-FKW-geschäumten positioniert. Selbst infolge der Verdickung um 9% steigt der Gesamtpreis der Dämmung durch den Mehrbedarf an Polyurethan gerade auf das geringfügig höhere Preisniveau der H-FKW-geschäumten Platte. Es ergeben sich also Vermeidungskosten von 0 € / t CO₂ eq.

Der Entsorgungsweg ist von erheblicher quantitativer Bedeutung für das Gesamtergebnis. Allerdings führt selbst die im Referenzfall angenommene, unter gegenwärtigen Bedingungen wie unter mittelfristigen Perspektiven sehr optimistische, Rate einer 80%-igen stofflichen Zersetzung der in zu entsorgenden Platten enthaltenen H-FKW noch zu Nachteilen für die H-FKW-Lösung.

Es muss angemerkt werden, dass selbst bei 100%-iger Rückhaltung und anschließender vollständiger Zersetzung (Verbrennung, Spaltung) der H-FKW der ökologische Gesamt-Bonus der mit n-Pentan geschäumten Platte zwar geringer ausfällt, aber keineswegs entfällt.

5.3 Kühlefahrzeug-Dämmung mit c-Pentan und H-FKW-365mfc

5.3.1 Einleitung

In Kühlefahrzeugen zum Transport verderblicher Waren wird generell PU-Schaum zur Isolierung der Laderaumwände eingesetzt. Hoher Dämmwert und daher geringe Materialdicke erlauben sowohl Minimierung eindringender Außenwärme als auch Maximierung des Ladevolumens.

Grundsätzlich können zum Erhalt der Dämmwirkung eines Gesamtsystems (u-Wert - ausgedrückt in W/m²K) höhere λ -Werte des Treibmittels durch dickeren Schaum kompensiert werden. Die Außenwände von Kühlefahrzeugen sind jedoch nur begrenzt variabel. Eine

Verstärkung nach außen scheidet in der Regel aus, weil die maximal zulässige Fahrzeugbreite schon ausgenutzt ist. Eine Verstärkung nach innen verengt insgesamt die Breite des Laderaums und ist nur begrenzt möglich, da Fracht mit normierten Maßen aufnehmbar sein muss.

Darum ist die Kühlfahrzeugdämmung, für die in Deutschland jährlich etwa 3000 t PU-Hartschaum (4 % des inländischen Gesamtverbrauchs ohne Elektrogeräte- und Montageschaum) eingesetzt werden, ein geeigneter Testfall auf die Notwendigkeit halogenierter Treibgase, deren λ -Wert für Schaum mit FCKW und H-FCKW zweifellos niedriger ist als der von Pentan, auch von Cyclopentan. Nachfolgend wird davon ausgegangen, dass auch Schaum mit H-FKW-365mfc Vorteile in der Dämmwirkung gegenüber Schaum mit c-Pentan aufweist.

Das Referenz-Kühlfahrzeug: Sattelaufleger für 33 Europaletten

Im Jahre 2001 wurden lt. KBA in Deutschland 8728 Kühlfahrzeuge im Bereich 3 t bis 26 t und mehr zulässiges Gesamtgewicht neu zugelassen. Davon waren 5079 selbstfahrende Fahrzeuge und 1250 Anhänger, jeweils unter 26 t zulässiges Gesamtgewicht, die überwiegend im lokalen und regionalen Verteilerverkehr eingesetzt werden. Nach Transportleistung (Fahrstrecke, Frachtmenge) sind die im Langstreckenverkehr eingesetzten, von Zugmaschinen "gezogenen" Sattelaufleger bedeutender. Die Neuzulassungsziffer solcher "Anhänger mit Isolieraufbau und Kühlung" mit zulässigem Gesamtgewicht von 26 t und mehr betrug 2001 lt. KBA 2399 Stück. Ein solcher großer Kühlaufleger bildet nachfolgend das Referenzfahrzeug.

Der typische Sattelaufleger nutzt alle Spielräume der Straßenverkehrsordnung aus. Die Außenmaße seines Laderaums sind bei den führenden europäischen Herstellern (Schmitz, Lamberet, Kögel, Cherau) identisch. Maximale Breite: 2,60 m, maximale Höhe: 4,00 m (was eine Ladehöhe von 2,65 m gestattet), maximale Länge 13,60 m. Außen an der Stirnwand ist das Kühlaggregat mit einer Tiefe von ca. 0,43 m befestigt. Dieses Kühlaggregat wird typischerweise von einem eigenen Dieselmotor unabhängig vom Zugmaschinen-Motor betrieben, um auch ohne ihn Kälte zu erzeugen. In Deutschland kann typischerweise die Kälteanlage außerdem auch über einen Anschluss an das Stromnetz betrieben werden, vor allem um preiswerten Nachtstrom für die Vor-Kühlung außerhalb der Fahrzeit zu nutzen.

Dem oben beschriebenen Kühlfahrzeug wird (von der inländischen ATP¹⁹-Prüfstelle beim TÜV Bayern Sachsen) die höchste Kategorie FRC (F = Frigerated, R = Reinforced insulation, C = Temperatur bis minus 20°C) nur zertifiziert, wenn es bei Außentemperaturen von +30°C dauerhaft -20°C Innentemperatur halten kann. Dafür muss seine gesamte Aufbaufläche²⁰ von ca. 150 m² einen mittleren u-Wert von unter 0,4 W/m²K aufweisen. Dieser wird nach sechs Jahren und danach alle drei Jahre kontrolliert.

Kritische Größe des Laderaums ist seine Innenbreite, die sich aus der Außenbreite von 2600 mm abzüglich der mindestens zwei mal 40 mm dicken Seitenwände ergibt. Der Grund ist die Notwendigkeit, drei Europaletten (je 800 mm breit, 1200 mm lang) nebeneinander platzieren zu können - mit einem gewissen Zwischenraum. Ein solcher typischer Sattelaufleger kann 33 Europaletten laden, je drei in elf Reihen.

¹⁹ ATP = Accord relatif aux Transports internationaux de denrées Périssables et aux engins spéciaux à utiliser pour ces transports. Oder englisch gelesen: Approved for Transport of Perishable Foodstuffs.

²⁰ Die DIN 8959 schreibt als mittlere Oberfläche das geometrische Mittel aus Innen- und Außenfläche vor.

Das ausgewählte Referenzfahrzeug ist typisch für den Langstreckenverkehr. Der Kälteleistungs- und damit Energiebedarf ist hier in entscheidendem Maße vom u-Wert des Isolieraufbaus abhängig. Bei kleineren Kühlfahrzeugen und solchen, die im Verteilerverkehr/Kurzstrecke fahren, sind Türöffnungszeiten beim Be- und Entladen des Frachtraums für den Kälteleistungsbedarf wichtiger als der Dämmwert. Auch ist für die Dicke der Isolierung häufig ein gewisser Spielraum gegeben. Der große Kühl-Sattelaufleger ist daher nicht repräsentativ für die Gesamtheit aller Kühlfahrzeuge. Wohl aber steht er für Anwendungsfälle, wo es auf gute Isolation ebenso ankommt wie auf geringst möglichen Platzverbrauch durch eben diese.

Dickere Seitenwände bei der Umstellung von H-FCKW-141b auf c-Pentan

Der mit H-FCKW-141b getriebene Dämmschaum hatte bei dem in Deutschland mit über 50 % Marktanteil führenden Sattelaufleger-Typ eine Stärke der Seitenwände von je 45 mm. In diesem Wandmaß enthalten waren außen und innen je 0,6 mm dicke diffusionsdichte Stahlbleche. Dazu kamen noch zwei jeweils 3,5 mm dicke Aluminium-Profil-Beschichtungen. Die Wanddicke betrug mit der Aluminiumverkleidung folglich links und rechts 52 mm (davon 43,8 mm PU-Schaum). Die Dicke des Daches und der Hecktüre war - jeweils mit Stahlblech - 80 mm, die der Stirnwand 50 mm. Der Bodenschaum war nicht aus PU, sondern aus 100 mm dickem XPS mit Holzauflage.

Im Zuge der beim Marktführer vorgenommenen Umstellung auf das Treibmittel c-Pentan (Investitionskosten 3 Mio. DM) wurde die Schaumdicke der Seitenwände (je 39 m² oder 49 % der Aufbaufläche einschließlich Boden) von 45 mm auf 60 mm erhöht. Die reine PU-Dicke wuchs um 15 mm - von 43,8 mm auf 58,8 mm. Die Dicke von Dach, Stirnwand, Hecktüre sowie XPS-Boden blieben unverändert, um Ladehöhe von 2,65 m und Ladetiefen von 13,33 m erhalten zu können. Auch die PU-Raumdicke blieb gleich (im Durchschnitt 65 kg/m³).

Die Innenbreite des Laderaums verringerte sich durch diese Maßnahme um insgesamt 30 mm. Sie beträgt statt knapp 2,50 m nunmehr 2,46 m. Das Fahrzeug ist weiterhin "palettengerecht". Es können nach wie vor drei 0,8 m breite Paletten nebeneinander geladen werden, wenngleich mit etwas geringerem Zwischenraum als früher.

Wird die Verstärkung der Seitenwände um 1,17 m³ oder um 34 % gegenüber vorher auf den gesamten Schaum des Fahrzeugs umgelegt, d.h. auch auf die nicht verdickten Flächen (einschließlich des Bodens), ist das Schaumvolumen auf 8,1 m³ oder um 10,2 % gestiegen. Diese Erhöhung liegt in der Größenordnung der Verschlechterung des λ -Wertes des Schaums um etwa 10,5 %. Das neue Treibmittel ist ein Verschnitt aus 70 % c-Pentan und (zur Siedepunkt-Senkung) 30 % i-Pentan. Der Einfachheit halber ist nachfolgend oft nur von Pentan die Rede.

Der Fahrzeughersteller gibt an, die wichtigste Kenngröße der Dämmung, der mittlere u-Wert des ganzen Aufbaus, werde mindestens gehalten. Grund seien auch konstruktive Maßnahmen, wie Verbesserungen der Türdichtung (fünflippig statt vierlippig), sorgfältigere Abdichtung aller Ecken und exaktere Stoß-auf-Stoß-Montage der PU-Sandwichplatten - kurz eine deutliche Reduzierung von Wärmebrücken.

5.3.2 Ausgangdaten für die Bilanzierung für Kühlfahrzeuge

1. Gleiche technologische Ausgangsbasis für Pentan und H-FKW

Bei der Gegenüberstellung von H-FKW-365mfc und c-Pentan/i-Pentan dienen die im Zuge der H-FCKW-141b-Substitution durchgeführten Modifikationen am Laderaum, im wesentlichen die Verdickung der Seitenwände, als gemeinsame technische Ausgangsbasis. Tabelle 25 enthält außer den gemeinsamen Daten zum Kühlkoffer auch die technischen Daten für die beiden meistverwendeten Kälteaggregate.

Tabelle 25 Technische Basisdaten für die Bilanzierung Kühlfahrzeug

Kühlfahrzeugaufbau		
Volumen PU-Schaum pro Fahrzeug	8,1 m ³	
Rohdichte des Schaums	65 kg/m ³	
PU-Schaumgewicht pro Fahrzeug	527 kg	
u-Wert des Aufbaus bei c-/i-Pentan	0,370	
u-Wert des Aufbaus bei 365mfc	0,361	
Nutzungsdauer im Inland	9 Jahre	
Zusätzl. Nutzungsdauer im Ausland	9 Jahre	
Kälteaggregate		
Modell	Thermo King SL 400	Carrier Vector 1800
Nutzkälteleistung bei -20° C	9200 W	9000 W
Kältemittel	7,5 kg R 404 A	6,5 kg R 404A
Dieserverbr. d. Anlage Volllast	4 Liter p. h.	4 Liter p. h.
Stromverbr. d. Anlage Volllast	8,7 kWh	8,7 kWh
Mittlere Laufzeit der Anlage	1500 h/a	1500 h/a

Quelle: Befragung Kühlfahrzeughersteller.

Die grundsätzliche Fragestellung lautet: Welche ökologischen Auswirkungen hätte es, wenn die PU-Hartschäume mit ihren mittlerweile vorhandenen Dicken nicht mit Pentan hergestellt würden, sondern mit dem H-FKW-365mfc, für den mit 22 ein um über 1 mW/mK bzw. 5% niedrigerer λ -Wert als für das Pentangemisch (λ rechnerisch 23,15) angenommen wird?

2. Die Rezepturen des Kühlfahrzeugschaums

Im Unterschied zum Dachdämmschaum liegen für Kühlfahrzeugschaum aus zahlreichen Versuchen Erfahrungen mit dem Treibmittel H-FKW-365mfc vor. Die entsprechenden Rezepturen sind in Tabelle 26 wiedergegeben.

Tabelle 26 Mittelwerte der Rahmenrezepturen für Kühlfahrzeug-PU-Schaum (Dichte: 65 kg/m³) in Gewichtsteilen

	Formulierung mit c-/i-Pentan	Formulierung mit 365mfc
Isocyanat	100	100
Polyol	100	100
Wasser	2	1
Additive	1	1
Flammschutzmittel	Keine	keine
Treibmittel	7	18 ²¹
Teile gesamt	210	220

Quelle: Expertenbefragung zum Thema Kühlfahrzeuge

Gegenüber Bau-Dämmschaum sind keine Flammschutzmittel erforderlich. Außerdem ist das Verhältnis Isocyanat- zu Polyol-Komponente nahezu ausgeglichen. Der Treibmittelanteil ist mit 3,3 % beim Pentan und 8,2 % beim H-FKW geringer als bei Bauschaum. Die quantitative Relation zwischen beiden Treibmitteln ist aber nahezu identisch. Auffällig ist die hohe Rohdichte des Schaums (65 kg/m³). Sie ist erforderlich, weil der Schaum zwar als Stahl-Sandwichpaneel gefertigt ist, aber auch selber tragende Funktionen hat und hohe mechanische Stabilität aufweisen muss.

3. Herstellungsverfahren der Sandwichpaneele und Treibmittelverluste

Die PU-Sandwichpaneele werden, mit Ausnahme der Tür, im Verfahren der diskontinuierlichen Flachbeschichtung hergestellt. Die Hecktür wird nach dem Injektionsverfahren geschäumt. Die für die Praxis relevanten Treibmittel-Emissionsraten sind in Tabelle 27 wiedergegeben.

Schäumprozess

Auf ein 13,6 m langes und 2,86 m breites Stahlblech wird mit beweglichem Mischkopf ganzflächig das Reaktionsgemisch aufgetragen. Während es aufschäumt, wird ein von einer Presse darüber gehaltenes zweites, gleichgroßes Stahlblech nach unten gesenkt, bis der Hohlraum zwischen beiden Blechen der gewünschten Schaumdicke entspricht. Der aufsteigende Schaum verklebt mit beiden Deckblechen zu einer Einheit. Seitliches Austreten des Schaums wird durch umlaufende Aluminiumrahmen weitgehend verhindert. Daher entsteht kaum Konfektionierungsabfall. Auch die Stirnwand wird auf diese Weise produziert. Ein 13,6 m langes Sandwichpaneel wird dazu quer in mehrere kleinere Abschnitte zersägt.

Für überschüssige Gase wie Luft, CO₂ und Treibmittel gibt es Entlüftungslöcher (2-5 mm Durchmesser) im Rahmen und im Stahlblech. Zur Vermeidung eines explosionsfähigen Gemischs in der Luft muss entweichendes Pentan abgesaugt und abgeführt werden (Explosionsschutz).

²¹ Möglicherweise werden in der Praxis wegen der höheren Treibmittelkosten Formulierungen mit geringeren Anteilen an H-FKW-365mfc größere Bedeutung erlangen (R. Albach (Bayer Polymers, August 2003). Die Dämmwerte dürften sich bei solchen Rezepturen dann in Richtung von Pentan-geschäumten Systemen entwickeln.

Hecktür: In die 80 mm tiefen Hohlräume der vorgefertigten Türflügel (1,25 m breit x 2,70 m hoch) wird auf einer separaten Anlage das Reaktionsgemisch eingespritzt und aufschäumen lassen. Überschüssige Gase entweichen durch Entlüftungslöcher.

Nach Aussage des Herstellers betragen die Pentan-Verluste beim Aufschäumen zwischen 8 und 12 % bezogen auf die eingesetzte Menge. Dieser relative Wert (Mittelwert 10 %) gilt auch im Falle von H-FKW-365mfc.

Montage

Die fertigen Sandwichpaneele werden zu Kühlkoffern verarbeitet und auf Fahrgestelle montiert. Da an einigen Stellen die Paneele geöffnet werden müssen (Ausschnitt für das Kälteaggregat oder um Leuchten oder Träger einzubauen usw.), entsteht Montageabfall im Umfang von etwa 1 % der eingesetzten PU-Schaummenge von 527 kg pro Fahrzeug. Die -treibmittelhaltigen - PU-Abfälle werden gegenwärtig deponiert.

Nutzphase

Während der ca. 18-jährigen Nutzphase eines Sattelauflegers kommt es nur zu vergleichsweise geringen diffusiven Treibmittelverlusten. Die Stahlbleche auf dem PU-Schaum gelten als diffusionsdicht. Sie sollen vor allem das Eindringen von Wasser in den Schaum verhindern – früher die Hauptursache des u-Wert-Anstiegs während der Nutzung (direkt ablesbar am deutlich wachsenden Leergewicht). Nullemissionen gibt es allerdings auch hier nicht. Erstens ist nicht die ganze Aufbaufläche mit Metall bedeckt, sondern zumindest an den Stößen befindet sich Dichtmasse. Zweitens kommt es während der Nutzphase zu mechanischen Beschädigungen der Wände, sei es durch Lade- oder Verkehrsunfälle. Konservativ werden hier jährliche Verluste von etwas über 0,1 % des im Schaum befindlichen Treibmittels (oder 0,1% bezogen auf das ursprünglich eingesetzte Treibmittel) unterstellt. Die von den Reparaturabteilungen der Kühlfahrzeughersteller ersetzten Wandteile werden momentan noch hauptsächlich auf Deponien entsorgt. Zumindest einer der in Deutschland tätigen Hersteller führt solche Teile bereits heute der Müllverbrennung zu. Dieses Vorgehen wird in der nachfolgenden Bilanzierung bei allen Kühlfahrzeugen unterstellt, zumal es ab 2005 vorgeschrieben ist.

Tabelle 27 Kühlfahrzeug: Treibmittelverluste der bei der Herstellung eingesetzten Menge in unterschiedlichen Phasen der Lebensdauer (Quelle: Expertenbefragung zum Thema Kühlfahrzeuge)

Nutzdauer	Schäumung	Montage	Diffusion p.a.	Rest bei Verschrottung
9 Jahre	10%	1,0%	0,1%	88,1%
18 Jahre	10%	1,0%	0,1%	87,2%

4. Entsorgung alten Kühlfahrzeug-Dämmschaums

Zur Zeit gibt es in Deutschland keine spezielle Infrastruktur für die Entsorgung alter Kühlkofferaufbauten. Der Hintergrund für diesen Mangel ist schlichtweg das Fehlen von zu entsorgenden Dämmaufbauten bzw. Kühlfahrzeugen. Von allen vier den inländischen Markt bedienenden Herstellern teilen die Gebrauchtwagenabteilungen, Geschäftsführungen und Werkstattleitungen einvernehmlich mit, dass über 95 % der fraglichen Kühlfahrzeuge lange vor Ablauf ihrer auf ca. 18 Jahre geschätzten Lebensdauer als Gebrauchtwagen ins Ausland verkauft werden. Die mittlere Nutzungszeit in Deutschland selbst reiche von unter sechs bis etwas über 10 Jahre.

Dies bestätigt auch die ATP-Prüfstelle in München, wo Fahrzeuge einer Prüfung ihrer Dämmqualität sechs Jahre nach Neuzulassung und danach alle drei Jahre wieder unterzogen werden sollen. Nur in Einzelfällen kommen, so die Auskunft (6.3.2002), Kühlfahrzeuge zur zweiten Wiederholungsprüfung, d.h. nach 12 Jahren Nutzung.

Die Haupt-Absatzmärkte für gebrauchte Kühlfahrzeuge sind Ost- und Südosteuropa, der Nahe und Mittlere Osten und Mittelasien. Ein Sattelaufleger, dessen Neupreis (mit Kälteaggregat) bei 60 000 Euro liegt, hat nach zehn Jahren noch einen Verkaufswert von 10 bis 13 000 Euro. In den Abnehmerländern, wo die Dämmwert-Kontrollen nicht so scharf wie in Deutschland sind, laufen die Kühlfahrzeuge in der Regel noch einmal so lange wie vorher in Deutschland. Vor dem Export wird in der Regel das nicht auf so lange Lebensdauer ausgelegte Kälteaggregat überholt. (Expertenbefragung zum Thema Kühlfahrzeuge)

Eine geordnete Entsorgung der exportierten Kühlfahrzeuge im Hinblick auf die im Dämmstoff enthaltenen Treibmittel kann in den Käuferländern nicht unterstellt werden. "Exportierte" Treibmittel gelten in dieser Studie als emittierte Treibmittel. Ein rechtlicher Eingriff in diese Situation ist praktisch nicht möglich, da der Fahrzeugabfluss ins Ausland nicht wegen unterschiedlicher umweltpolitischer Standards, sondern wegen wirtschaftlicher Ungleichheit erfolgt.

Es gibt bisher nur einen minimalen Teil von Kofferaufbauten, der im Inland bleibt. Dabei handelt es sich um ausgediente Kühlkofferaufbauten, die zu stationären Lagerbehältnissen (Hauptanwendung Landwirtschaft) umgewidmet wurden. (Diese Lagerräume entziehen sich allerdings einer Bilanzierung von Treibmittelverlust gegen Energieverbrauch, wie sie für "Fahrzeuge" vorgenommen wird.)

Sollte der Abfluss gebrauchter Kühlfahrzeuge ins Ausland einmal ins Stocken geraten, muss in Deutschland selbst die Entsorgung der Kühlkoffer durchgeführt werden. Die TA Siedlungsabfall verbietet ab 2005 deren Deponierung, so dass sich die Verbrennung der zerlegten und zerkleinerten Schaumwände, denen das Stahlblech abgezogen wurde, anbietet, zumal nur die Verbrennung die Vernichtung der nach der Demontage noch übrigen Schaumtreibmittel garantiert.

5. Zusammenhang von λ -Wert und u-Wert beim Kühlkofferaufbau

Während bei einer planen Dachdämmplatte ein linearer Zusammenhang zwischen dem λ - und dem u-Wert des PU-Hartschaums besteht, der in der Gleichung $1/(\text{Dicke in m}/\lambda)$ realitätsnah ausgedrückt werden kann (vgl. Kapitel zur PU-Dämmplatte), ist bei einem dreidimensionalen, Dämmaufbau aufgrund der Wärmebrücken (Ecken, Dichtungen Schrauben u. dgl.) eine rechnerische Ableitung des u-Werts aus dem λ -Wert sehr erschwert. Nicht zuletzt deshalb wird der u-Wert des Laderaums grundsätzlich per Test, also empirisch bestimmt, indem der Prototyp eines Fahrzeugs genormten Prüfverfahren (Tunneltest) bei der ATP-Stelle des TÜV in München unterzogen wird.

Ein um x % niedrigerer λ -Wert des Schaums schlägt sich nach Versuchen der Fa. Bayer AG (u.a. Welte 2002) zwar durchaus in einem niedrigeren u-Wert des Kühlfahrzeugs nieder. Aber

der Zusammenhang ist unterproportional. Eine Senkung des u-Werts um die Hälfte von x % wurde als absolutes Maximum²² gefunden.

Im Sinne konservativer Bilanzierung wird im Folgenden unterstellt, dass der um etwa 5 % niedrigere λ -Wert von H-FKW-365mfc (22) gegenüber dem λ -Wert des 70/30-Verschnitts aus c-Pentan und i-Pentan (23,15) zu einem um die Hälfte dieses Prozentsatzes, d.h. um 2,5 % niedrigeren u-Wert für den Kofferaufbau führt. Er sinkt in unserem Modell von 0,37 auf 0,36, so dass das Kälteaggregat 2,5 % weniger Energie benötigt, um die gleiche Innentemperatur zu halten. Mit anderen Worten: Im Falle von H-FKW-365mfc als Treibmittel braucht das Kälteaggregat 2,5 % weniger Zeit lang als bei Dämmung mit Pentan zu laufen, um die gleiche Temperatur im Laderaum bei gleicher Außentemperatur zu gewährleisten. In Tabelle 28 sind die für die Bilanzierung wichtigsten Daten der Treibmittel aufgelistet.

Tabelle 28 Basisdaten der für das Kühlfahrzeug eingesetzten Treibmittel H-FKW-365mfc und Pentan (70% c-Pentan/30% i-Pentan)

Treibmittel	H-FKW 365mfc	c-Pentan/i-Pentan
Lambda-Wert	0,02200	0,02315
u-Wert des Kühlaufbaus	0,361	0,370
Einsatzmenge pro Fahrzeug	43,1 kg	17,6 kg
Preis pro kg	6,50 Euro	1 Euro
GWP	890	4

5.3.3 Bilanz Standardfall für Pentan und H-FKW-365 Kühlfahrzeug-Dämmung

1. CO₂-Bilanz für c-Pentan und H-FKW-365

Das Kühlfahrzeug wird i.d.R. von Speditionen benutzt, um tiefgekühlte (ein Drittel) oder normalgekühlte (zwei Drittel) Ware weiträumig zu transportieren. Abhängig von Innen- und Außentemperatur läuft die Kälteanlage jährlich 1000 bis 1500 Stunden. Die Spanne reicht von effektiv 600 bis 3000 h/a. Eine Stunde Motorbetrieb erfordert im Durchschnitt 4 Liter Diesel. Am Stromnetz (Vorkühlen des Frachtraums) nimmt die Anlage während der selben Zeit 8,7 kWh auf. Im Inland wird die Kälteanlage 25 % ihrer Laufzeit aus dem Stromnetz gespeist. Typisch sind zwei Nutzzyklen des Kühlauflegers: 9 Jahre Einsatz im Inland und weitere 9 Jahre im Ausland, wo ausschließlich Diesel genutzt wird (Expertenbefragung zum Thema Kühlfahrzeuge).

Bei 18 Jahren Nutzdauer sowie 1500 Stunden jährlicher Anlagenlaufzeit (davon im Inland 375 Stunden Netzbetrieb) sieht die CO₂-Bilanz für das mit Pentan- bzw. H-FKW-365mfc-geschäumte Kühlfahrzeug wie in Abbildung 25 aus (Standardfall).

²² Die Bayer AG hat reale Messungen an Kühlfahrzeugen im Tunneltest mit den Theoriewerten verglichen, und kam auf einen weit geringeren Zusammenhang zwischen λ - und u-Wert bei Kühlfahrzeugen als 50%. Es handelte sich um Fahrzeuge derselben Bauweise wie des "typischen" Sattelauflegers (Welte 2002). Der unterproportionale Einfluss des λ -Wertes auf den u-Wert ist auch einer der Gründe, warum der u-Wert beim Übergang von FCKW-11 auf H-FCKW-141 und weiter auf c-Pentan nicht die – ursprünglich erwarteten – Verschlechterungen erfahren hat (Demharter 2002).

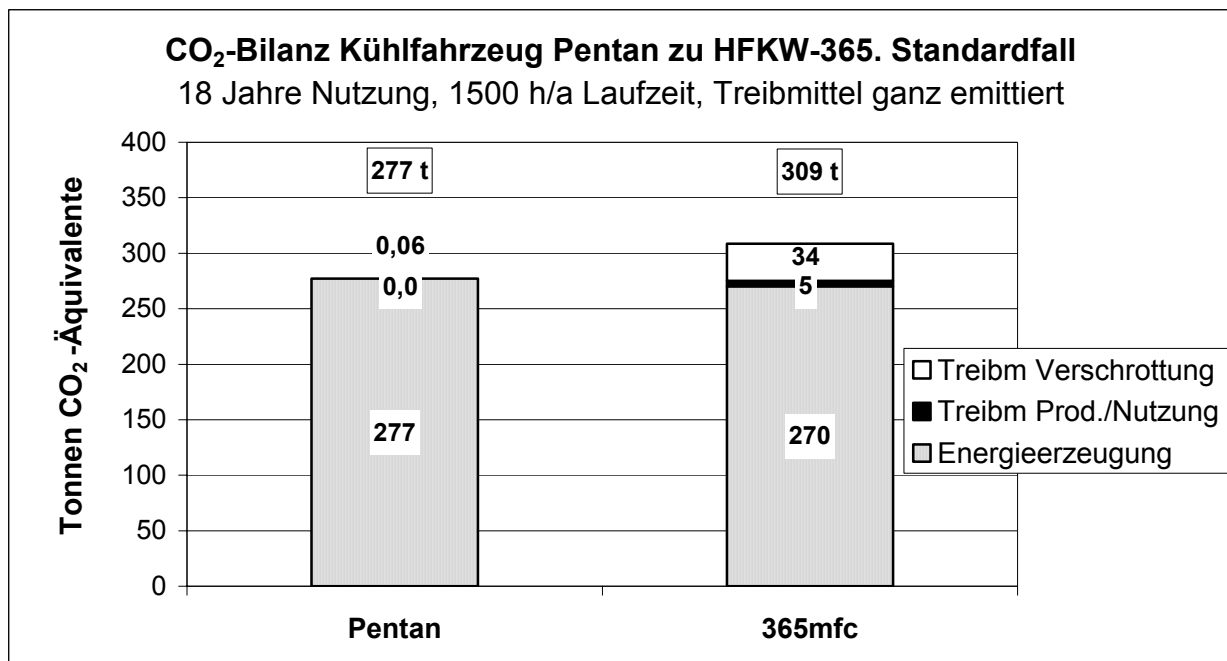


Abbildung 25 Treibhausgas-Bilanz Kühlfahrzeug Pentan zu H-FKW-365, Standardfall. 18 Jahre Nutzung, je 9 im In- und Ausland. 1500 h/a Generator-Laufzeit mit 4 Liter Diesel pro Stunde (im Inland 25 % Netzbetrieb zu 8,7 kWh). Die Treibmittel entweichen ganz, davon 87 % bei Verschrottung. Die Treibhausgasemissionen bei Verwendung von Pentan liegen in der Summe bei 277 Tonnen, von H-FKW-365 bei 309 Tonnen.

Die Summe der über die gesamte Lebensdauer emittierten Menge von CO₂ bzw. CO₂- quivalenten beträgt bei Pentan 277 t, bei H-FKW-365 dagegen 309 t. Die 7 Tonnen (-2,5 %) weniger energiebedingte CO₂-Emissionen beim H-FKW-365, nämlich 270 statt 277 Tonnen, werden durch die 34 Tonnen CO₂- quivalente der H-FKW-Treibmittel, die vollständig emittieren, überkompensiert. Der Rückgang der energiebedingten CO₂-Emissionen im Falle von 365mfc stammt von auf 1463 h/a verringerter Laufzeit der Anlage, deren spezifischer Verbrauchswert mit 4 l/h Diesel bzw. 8,7 kWh Strom konstant bleibt.

2. Jahres-(Teil-)Betriebskosten-Bilanz beim Standardfall

Die jährlichen Betriebskosten für die Kühlung des 18 Jahre eingesetzten Fahrzeugs unterscheiden sich für Pentan- und H-FKW-Schaum in zwei (bzw. drei) Punkten. Beim H-FKW müssen 2,5 % weniger für Diesel und Strom ausgegeben werden. Als Standardpreise gelten 0,85 Euro (1 Liter Diesel) und 0,10 Euro (1 kWh Strom). Andererseits gibt es Mehrkosten aus den einmalig 43,1 kg H-FKW-365, die auf ein einzelnes Betriebsjahr (ohne Zinsen) umgelegt werden. Auf der Pentan-Seite fallen dagegen Treibmittelkosten kaum ins Gewicht. Angenommene Preise: 6,50 Euro pro kg H-FKW 365mfc, 1 Euro pro kg c-Pentan.

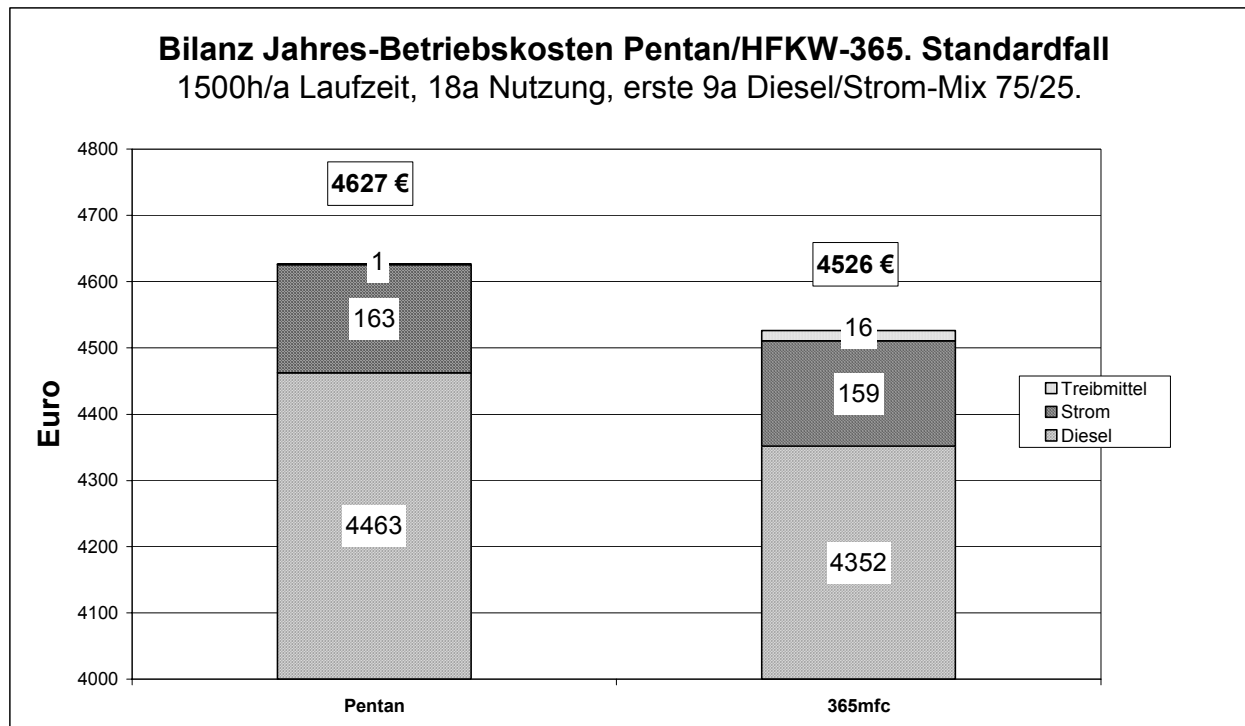


Abbildung 26 Bilanz Kühlfahrzeug-Jahres-Betriebskosten mit Pentan bzw. H-FKW-365 Dämmung. Standardfall: 1500 h/a Laufzeit der Kälteanlage. 18 Jahre Nutzungsdauer, davon die ersten 9 Jahre im Inland mit dem Energiemix Diesel/Strom 75/25. Die Summe der jährlichen Betriebskosten beträgt bei Pentan 4627 Euro, beim H-FKW-365 nur 4526 Euro (101 Euro weniger). Beachte: Der Minimalwert in der Grafik ist 4000 Euro.

Aufgrund des niedrigeren Energieverbrauchs für die Kühlung des mit H-FKW-365 gedämmten Kühlfahrzeugs, das 18 Jahre lang genutzt wird, betragen die Energiekosten jährlich 2,5 % oder 111 Euro weniger als im Falle der Pentand mmung.

Die Minderkosten werden im Standardfall durch die Mehrkosten des Treibmittels (16 Euro gegen 1 Euro jährlich) zwar reduziert. Die Kostendifferenz beträgt aber immer noch 101 Euro oder 2,2 % zugunsten der H-FKW-Anwendung.

Wirkung von niedrigeren Dieselpreisen

Eine Gleichheit der jährlichen Betriebskosten käme erst bei einer Senkung des Dieselpreises von 0,85 auf 0,34 Euro pro Liter zustande, und zwar bei jeweils 1948 Euro Gesamt-Jahresbetriebskosten. Solche niedrigen Dieselpreise sind nicht nur Theorie, sondern in den USA der Grund dafür, dass dort so gut wie kein Kühlbetrieb vom Stromnetz erfolgt. Die Kombi-Kälteaggregate mit Diesel- und Netzbetrieb werden zwar zu 80 % von den selben US-Firmen geliefert, aber die Kombigeräte werden speziell für den europäischen Markt gefertigt.

5.3.4 Sensitivitätsanalyse. CO₂-Bilanz bei Variation verschiedener Parameter

1. Jährliche K lteanlagenlaufzeit und CO₂-Bilanz

Im Maße der Ausdehnung der jährlichen Laufzeit der Kälteanlage von 600h auf 3000h im Pentanfall (bzw. 585h auf 2925h im H-FKW-Fall) verringert sich die absolute und relative

Differenz zwischen den jeweiligen Ausstößen von CO₂ bzw. CO₂-Äquivalenten. Vgl. Abbildung 27.

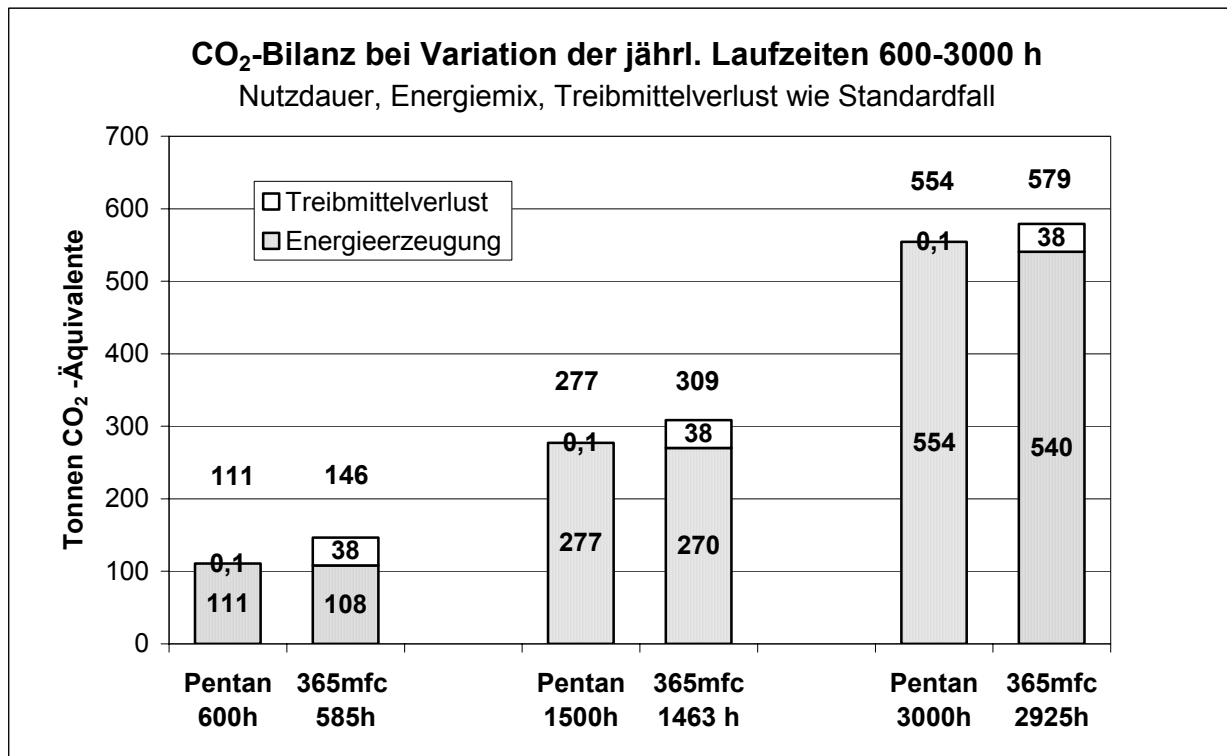


Abbildung 27 CO₂-Bilanz bei Variation der jährlichen Anlagen-Laufzeiten von 600 bis 3000h. Lebensdauer (18a), Energiemix (erste 9a Diesel/Strom 75/25), Treibmittelverlust (ganz) wie im Standardfall. Die Mehremissionen an CO₂-Äquivalenten im H-FKW-Fall vermindern sich mit der Länge der Laufzeit, ohne jedoch auf das jeweils niedrigere Niveau im Falle Pentans abzusinken.

Aus Abbildung 27 geht hervor, dass bei kurzen Laufzeiten die Mehremissionen des H-FKW-Falls deutlich höher sind als bei sehr langen Laufzeiten. Bei 600h Jahreslaufzeit der Kälteanlage (Pentan) liegen die äquivalenten CO₂-Emissionen für die H-FKW-Lösung um 35 t oder 30 % höher. Auf der anderen Seite sind sie bei 3000h Laufzeit (Pentan) im H-FKW-Fall nur noch um 25 t oder 4 % höher. Selbst bei sehr langer Laufdauer liegen – unter den gegebenen Ausgangsbedingungen – die äquivalenten CO₂-Emissionen im H-FKW-Fall grundsätzlich höher als im Falle von Pentan. Dies liegt im wesentlichen daran, dass die eingesetzten Treibmittel mangels Vernichtung bei der Verschrottung vollständig in die Atmosphäre gelangen.

Eine Gleichheit der äquivalenten CO₂-Emissionen beider Fälle wäre – unter diesen Umständen – erst ab 7500h/a Anlagenlaufzeit zu erzielen. Dazu müsste das Kälteaggregat faktisch das ganze Jahr (85 %) durchlaufen, und zwar ausschließlich im Dieselbetrieb.

2. Reiner Dieselbetrieb und CO₂-Bilanz

Grundsätzlich wird in der zweiten, ausländischen, Lebenshälfte der Kühlfahrzeuge nur im Dieselbetrieb gekühlt. Allerdings gibt es auch im Inland Fahrzeuge ohne den – zusätzlich eingebauten – Elektroantrieb für den Kompressor. Dieser kostet nicht nur mehr bei der Anschaffung, sondern wiegt auch zusätzliche 100 kg. Der Fahrzeughalter kann dann

allerdings den weit preisgünstigeren und mit weniger CO₂-Emissionen verbundenen Netzbetrieb nicht nutzen.

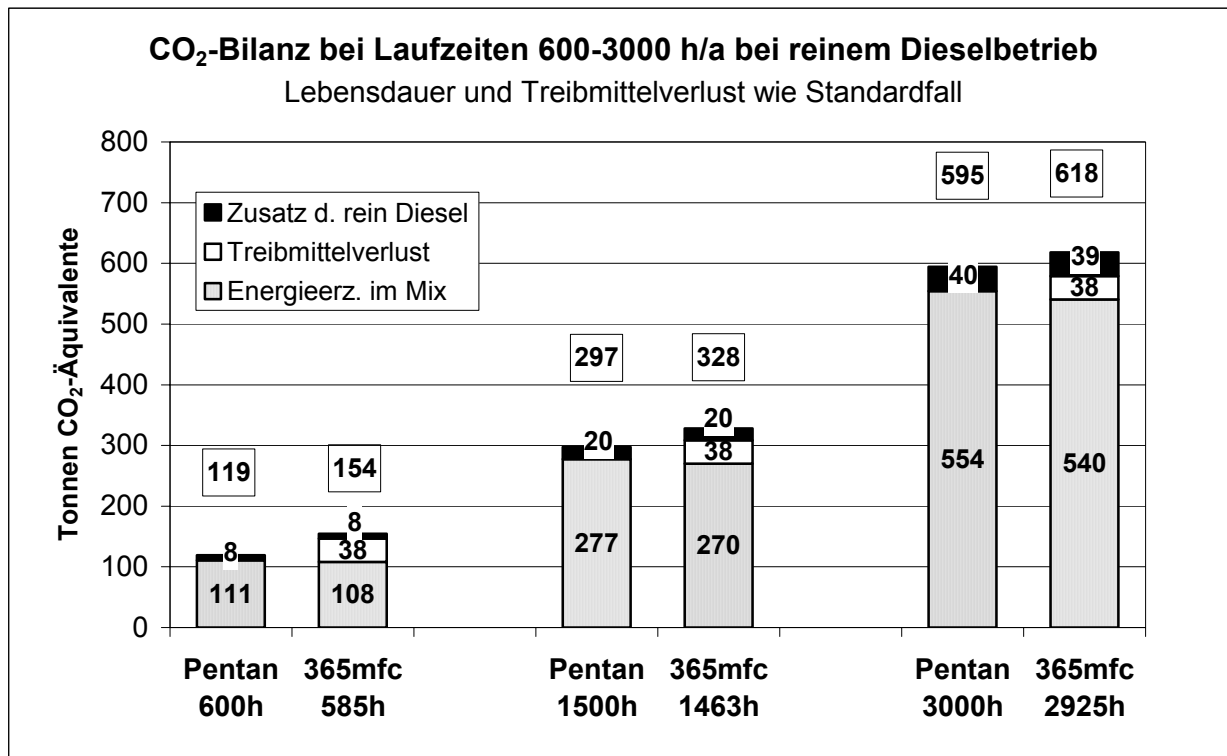


Abbildung 28 CO₂-Bilanz (Abgas plus Treibmittel) mit verschiedenen Laufzeiten (600, 1500, 3000 h/a) der Kälteanlage im Energiemix-Betrieb und mit CO₂-Zuwachs durch reinen Dieselbetrieb. Lebensdauer (18a) und Treibmittelverlust (vollständig) wie im Standardfall. Der CO₂-Ausstoß des Dieselbetriebs mit Teilnutzung des Stromnetzes stellt die untere Reihe dar. Der oberste Säulenabschnitt ist jeweils das zusätzliche CO₂ durch Verzicht auf Netzbetrieb (in Tonnen). In allen drei Laufzeitklassen steigt der H-FKW-Wert geringfügig langsamer an als der Pentanwert, bleibt aber stets oberhalb desselben.

Gemessen an der partiellen Mitnutzung des Stromnetzes führt reiner Dieselbetrieb während der 18-jährigen Nutzung in allen drei Laufzeit-Klassen (600h/a, 1500h/a, 3000h/a) zu mehr äquivalentem CO₂-Ausstoß. Die zusätzliche Tonnage ist in der Grafik als oberste Säulenreihe wiedergegeben. Sie beträgt 8 t, 20 t und 39/40 t. (Selbstverständlich gilt der niedrigere Wert durch die teilweise Stromnetznutzung nur unter der Voraussetzung des spezifischen deutschen Kraftwerkmixes bei der Stromerzeugung, d.h. 0,58 kg CO₂ pro kWh, sowie unter der Bedingung, dass pro Stunde Anlagenlaufzeit tatsächlich nur 8,7 kWh Elektroenergie benötigt werden.)

Der CO₂-Zuwachs ist zwar bei der Pentandämmung immer ein klein wenig größer als beim entsprechenden H-FKW-365. Der reine Dieselbetrieb während der 18 Jahre Nutzungsdauer ändert aber nichts daran, dass der akkumulierte äquivalente CO₂-Ausstoß (Abgas plus Treibmittelverlust) im gleichen Zeitraum bei der H-FKW-Dämmung grundsätzlich immer über dem entsprechenden Wert der Pentan-Dämmung liegt.

3. Verringerte Nutzphase und CO₂-Bilanz

Abbildung 29 zeigt für das mit Pentan geschäumte Kühlfahrzeug einen niedrigeren äquivalenten CO₂-Ausstoß als für das H-FKW-365-geschäumte - im Standardfall (18 Jahre Nutzdauer, 1500 Stunden jährliche Anlagenlaufzeit, Energiemix Diesel/Strom 87,5/12,5). Die Variation der Laufzeiten (Abbildung 27) hatte den grundsätzlichen CO₂-Bonus von Pentan bestehen gelassen. Abbildung 29 veranschaulicht, dass dies auch für eine Verkürzung der Nutzphase gilt, die für den Fall einer Senkung von 18 auf 12 Jahre betrachtet wird.

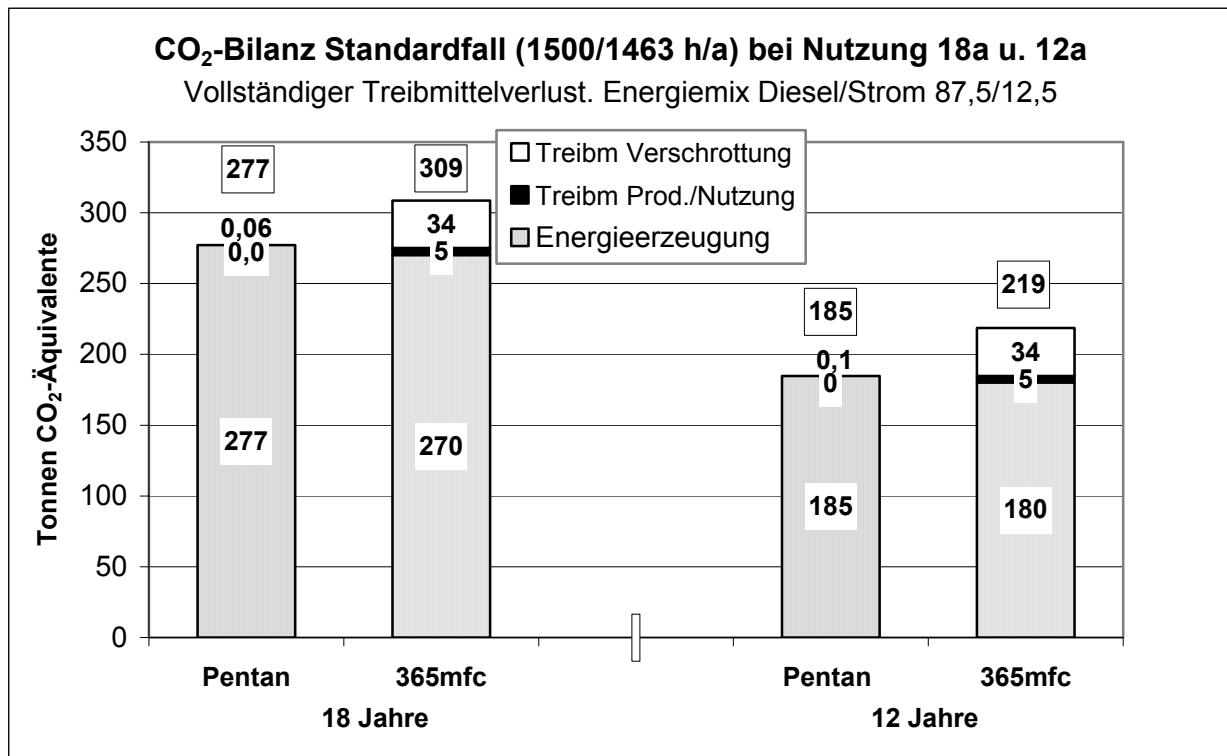


Abbildung 29 CO₂-Bilanz Standardfall (1500 h/a) bei Nutzdauer 18 (links) und 12 Jahre (rechts). Energiemix Diesel/Strom 87,5/12,5. Vollständiger Treibmittelverlust. Bei einer Verkürzung der Nutzdauer um ein Drittel sinkt im Standardfall der äquivalente CO₂-Ausstoß bei Pentan entsprechend um ein Drittel (von 277 t auf 185 t). Beim H-FKW-365 sinken die CO₂-Äquivalente (wegen der Konstanz der Treibmittelverluste) nur um 29 % - von 309 t auf 219 t.

Es gilt: Je kürzer insgesamt (ob durch weniger jährliche Laufzeit oder geringere Nutzdauer) der Kompressor läuft, umso weniger kann das niedrigere Abgas-CO₂ im H-FKW-Fall die durch emittierte Treibmittel gebildeten CO₂-Äquivalente ausgleichen. (Eine Aufgliederung nach unterschiedlichen Jahreslaufzeiten ist hier nicht erforderlich, da sie zwangsläufig noch etwas günstiger für den Pentanfall ausginge als in Abbildung 27 gezeigt.) Zu beachten ist allerdings, dass die sehr hohen Treibmittelemissionen durch nicht stattfindende Rückhaltung des im Schaum enthaltenen Rests nach Ende der Nutzphase eintreten, während die Produktions- und Nutzphasenemissionen relativ niedrig sind. Ohne Verschrottungsemissionen gäbe es hier einen CO₂-äquivalenten Gleichstand zwischen Pentan und H-FKW-365mfc.

4. Niedrigerer u-Wert beim H-FKW-Fahrzeug und CO₂-Bilanz

Trotz des um ca. 5 % niedrigeren λ -Werts von H-FKW-365-getriebenem PU-Schaum gegenüber PU-Schaum mit c-/i-Pentan gründen alle bisherigen Berechnungen auf einem nur um 2,5 % niedrigeren u-Wert des mit H-FKW geschäumten Kühlfahrzeugs. Denn anders als beim Plattenschaum sinkt der u-Wert des Kühlkoffers (dreidimensionale Form) nicht proportional zum λ -Wert des Schaums, sondern maximal um die Hälfte davon.

Nachfolgend wird gefragt, ob die mit einem um 5 % niedrigeren u-Wert und damit um 5 % geringeren Verbrauch von Antriebsenergie verbundene CO₂-Minderung beim mit H-FKW geschäumten Fahrzeug signifikante Auswirkungen hätte.

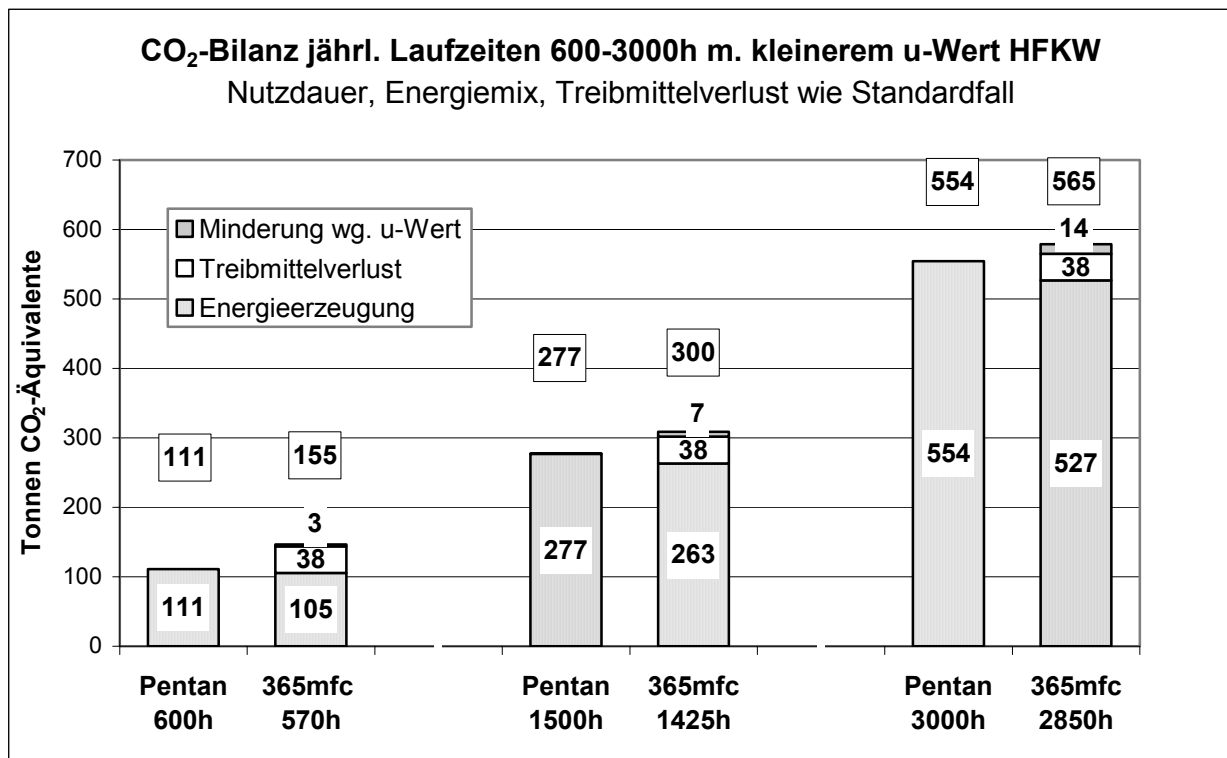


Abbildung 30 CO₂-Bilanz der jährlichen Laufzeiten 600-3000h bei um 5 % statt um 2,5 % niedrigerem u-Wert des mit H-FKW geschäumten Kühlfahrzeugs (Nutzdauer, Energiemix, Treibmittelverlust wie Standardfall). Die äquivalente CO₂-Minderung wegen niedrigeren u-Werts ist als oberste Reihe eingetragen. Die entsprechenden Zahlen 3, 7 und 14 geben die eingesparte CO₂-Menge in Tonnen wieder.

Aus Abbildung 30 geht hervor, dass weder im Standardfall mit der Laufzeit 1500h/1425h (Mitte) noch bei der Laufzeit 600h/570h (links), aber auch nicht bei der Laufzeit 3000h/2850h (rechts) der akkumulierte äquivalente CO₂-Ausstoß des H-FKW-Kühlfahrzeugs niedriger ausfällt als derjenige des Pentan-Kühlfahrzeugs. Im Fall der extremen Jahreslaufzeit von 3000 bzw. 2850 Stunden beträgt die äquivalente CO₂-Ersparnis 14 Tonnen. Damit liegt der Gesamtausstoß immer noch um 11 t höher (565 gegen 554 t) als im Pentan-Fall. Erst bei einer Jahreslaufzeit von über 5000 Stunden (18 Jahre lang) wäre ein Gleichstand erreicht.

5. Aufteilung der CO₂- und CO₂-äquivalenten Emissionen auf Inland und Ausland

Die bisherigen Berechnungen und grafischen Darstellungen hatten das reale Emissionsverhalten eines typischen Kühlfahrzeugs zur Grundlage, das in der ersten Hälfte seiner Nutzdauer im Inland gehalten wird und in der zweiten Hälfte im Ausland.

Während Emissionen durch den Betrieb des Kälteaggregats sowohl im Inland als auch im Ausland entstehen, verteilen sich die Treibmittelverluste sehr ungleich. Die Produktionsemissionen von ca. 11 % fallen nur im Inland an. Die mit ca. 87 % weit größeren Entsorgungsemissionen entstehen nur im Ausland. Es wird unterstellt, dass es dort keine Rückhaltung der Schaumtreibmittel vor dem Eintrag in die Atmosphäre gibt, sondern dass die Treibmittel – über Jahrzehnte hinweg – von Abfalldeponien ausgasen.

Für das Inland ist diese Aufteilung der Treibmittelemissionen eine - um es etwas zynisch auszudrücken - recht praktische Lösung. Dabei kommt ihr die gängige Auslegung des Kyoto-Protokolls entgegen, das globale Klimaproblem mithilfe lokaler (nationaler) Emissionszuordnungen und Emissionsminderungen anzugehen. Den "Vorteil" für das Inland zeigt Abbildung 31.

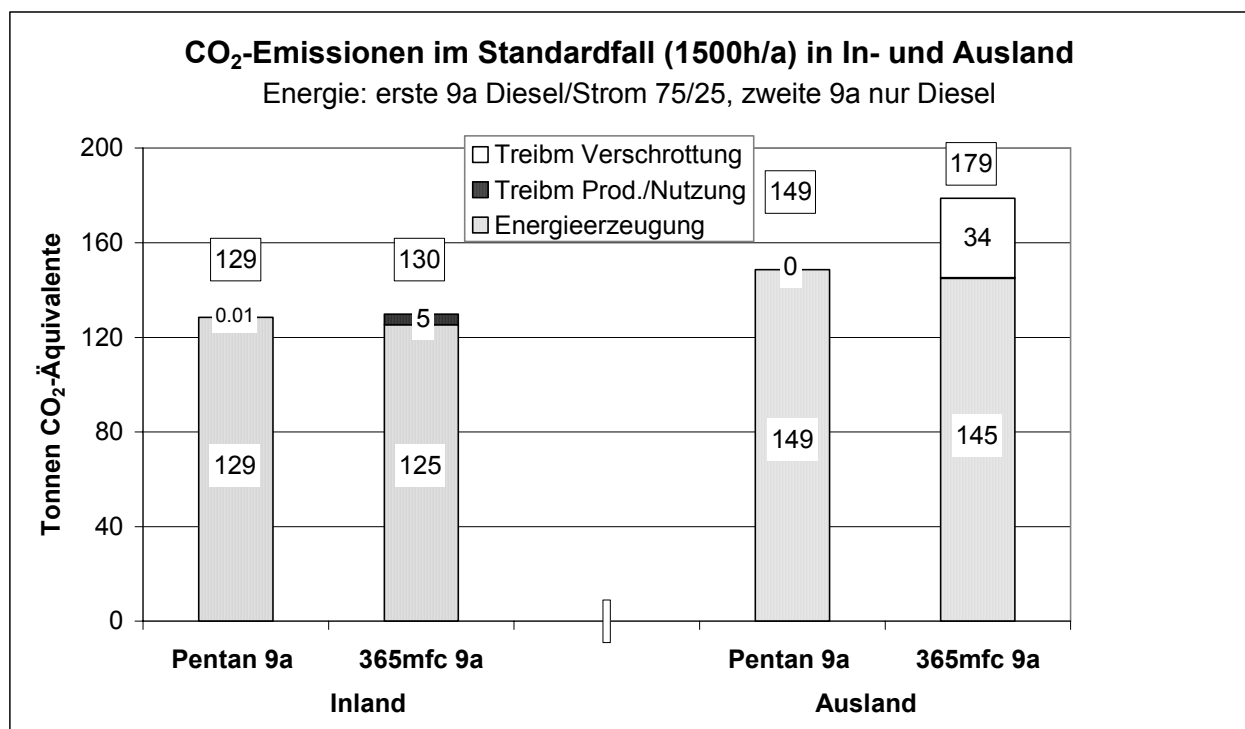


Abbildung 31 CO₂-Emissionen im Standardfall (1500h/a) nach In- und Ausland.
Energie: erste 9 Jahre im Inland Diesel/Strom 75/25, zweite 9 Jahre im Ausland nur Diesel. Im Inland (linke Seite) sind die CO₂-Emissionen bei H-FKW etwa so groß wie bei Pentan, bzw. gerade um 1 Tonne größer (130 zu 129 t). Im Ausland (rechte Seite) übersteigen die CO₂-Emissionen im H-FKW-Fall die Menge bei Pentan um 20 % (179 zu 149 t). Grund: die hohen Treibmittelemissionen bei der Verschrottung.

Im Inland sind die CO₂- und CO₂-äquivalenten Emissionen im Standardfall (1500h/1425h Anlagenlaufzeit) für das Kühlfahrzeug, das mit H-FKW geschäumt wurde, nicht nennenswert höher als bei dem mit Pentan geschäumten Fahrzeug. Die Produktionsemissionen der H-

FKW-Treibmittel sind zwar nicht unbedeutend, sie werden aber durch geringeren Energieverbrauch für die Kühlung – in Standardfall - nahezu kompensiert.

Bei kurzfristiger Markteinführung des H-FKW-365 als Treibmittel für Kühlfahrzeug-Dämmschaum wäre die in Abbildung 31 dargestellte Situation gegeben. Der regelmäßige Abfluss der Kühlfahrzeuge ins Ausland sorgt nicht nur für eine nahezu ausgeglichene inländische CO₂-Bilanz mit dem Pentan-geschäumten Fahrzeug, sondern erspart im Inland auch eine eigenständige Rücknahme- und Entsorgungsinfrastruktur.

6. CO₂-Bilanzen bei inländischer Entsorgung mit unterschiedlicher Rückhaltung der restlichen Treibmittel

Was wird sein, wenn die Gebrauchtwagenkäufe ins Ausland nicht mehr so zügig vonstatten gehen wie heutzutage oder sogar zum Stillstand kommen?

Dann müssen die alten Kühlfahrzeuge im Inland entsorgt werden. Für Fahrgestelle und Kühlaggregate wird dies kein Problem sein, da diese Komponenten vorwiegend aus einfach wiederverwertbaren Metallen bestehen. Problematisch ist aber der beidseitig am Stahlblech festklebende PU-Dämmschaum (Sandwichpaneele), woraus der Kühlkoffer besteht.

Mit der TA Siedlungsabfall liegt das Regelwerk bereits vor: Wegen ihres hohen organischen Gehalts dürfen jene PU-Sandwichpaneele nicht deponiert werden. Als Lösung kommt die Verbrennung des PU-Schaums infrage. Sie wird hier für die Zukunft angenommen, ist jedoch bei stofflichem Recycling in den bisher praktizierten Formen nicht gegeben.

Wo die Verbrennung stattfindet, ob in kommunalen oder Sonderanlagen oder in industriellen Öfen, ist hier zweitrangig. Für vorliegenden Zusammenhang ist nur die Höhe der Treibmittelverluste bei der Demontage der Dämmaufbauten und der Vorbereitung der Sandwichpaneele für die Schaumverbrennung relevant (Entfernung der Stahlbleche, mechanische Zerkleinerung der Stücke, Transport u. dgl.).

Während nachfolgend eine 100-prozentige Vernichtung derjenigen Treibmittel unterstellt werden kann, die in die Öfen gelangen, entstehen bei der Demontage Treibmittelverluste von mindestens zehn Prozent. Neben diesem vermutlich optimalen Fall werden nachfolgend aber auch - realistischere - Werte von 20 und 30 % Treibmittelverlust bei Demontage des Kühlkoffers in Rechnung gestellt. Umgekehrt ausgedrückt: Es wird mit Raten der Vernichtung der bei Entsorgung noch vorhandenen Treibmittel (Rückhalteraten) von 90 %, 80 % und 70 % gerechnet.

Ein weiterer Punkt ist von Bedeutung: Mit der (angenommenen) Erschwerung, gebrauchte Kühlfahrzeuge ins Ausland zu verkaufen, wird sich die Fahrzeugausnutzung im Inland erhöhen, sprich: die Dauer der inländischen Nutzung wird steigen. Sie wird sich gewiss nicht auf 18 Jahre verdoppeln. Allerdings ist die Annahme einer inländischen Mehrnutzung von drei Jahren nicht unrealistisch.

In Abbildung 32 werden die äquivalenten CO₂-Gesamtemissionen von Kühlaufbauten nach zwölfjähriger inländischer Nutzung (bei konstantem Energiemix Diesel/Strom 75/25) für variable jährliche Anlagenlaufzeiten und unterschiedliche Raten der Rückhaltung der restlichen H-FKW bei der Entsorgung der Dämmaufbauten (70%, 80% und 90%) genommen

und als Prozentsätze der Pentan-bedingten äquivalenten CO₂-Emissionen (Abgas-CO₂ plus Treibmittel-Totalverlust) eingetragen.

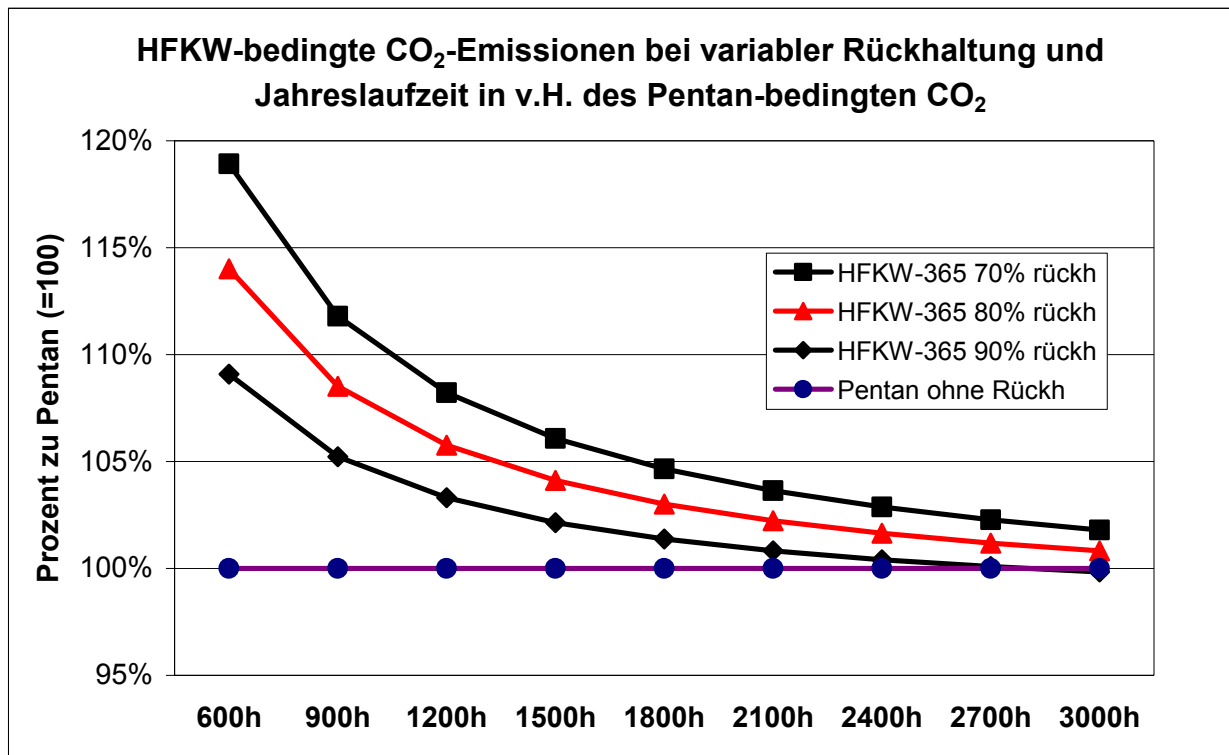


Abbildung 32 H-FKW-bedingte CO₂-Emissionen bei Variation der Treibmittel-Rückgewinnung und der Kälteanlagen-Jahreslaufzeit in v.H. der Pentan-bedingten äquivalenten CO₂-Emissionen. Lebensdauer (nur Inland) 12 Jahre. Energiemix Diesel/Strom 75/25. Über die Laufzeiten 600h bis 3000h (für Pentan) hinweg ist lediglich die H-FKW-bedingte CO₂-Gesamtemission mit 90-prozentiger Rückhaltung des Treibmittels bei der Entsorgung in der Lage, die Pentan-bedingten CO₂-Emissionen zu unterbieten, allerdings erst ab 2700h jährlicher Anlagenlaufzeit (2633h im H-FKW-Fall).

Es zeigt sich, dass im Laufzeitbereich unter 2700 Stunden die H-FKW-bedingten äquivalenten CO₂-Gesamtemissionen aus Anlagenantrieb und Treibmitteln durchweg höher liegen als die mit Pentan-Einsatz verbundenen Gesamtemissionen. Erst ab 2700h jährlicher Anlagenlaufzeit im Falle Pentan (2633h bei H-FKW) unterschreiten H-FKW-bedingte CO₂-Gesamtemissionen Pentan-bedingte, dies aber nur bei einer optimistischen 90 %-Vernichtungsrate (Rückhaltung) der im Altschaum noch enthaltenen H-FKW-Treibmittel.

7. Das CO₂-Optimum für eine H-FKW-Anwendung im Modell

Eine für den H-FKW-365-geschäumten Kühlkoffer günstigere CO₂-Gesamtbilanz bei inländischer Entsorgung ist denkbar, wenn die Differenz zwischen dem u-Werts des Kühlkoffers zum Pentan-geschäumten von 2,5 auf 5 % erhöht werden könnte. In einem solchen, rein hypothetischen Fall gäbe es früher als bei 2700h/a Anlagenlaufzeit und schon bei Treibmittelvernichtungen von nur 70 % Vorteile gegenüber der Schäumung mit c-Pentan und iso-Pentan. Vgl. Abbildung 33.

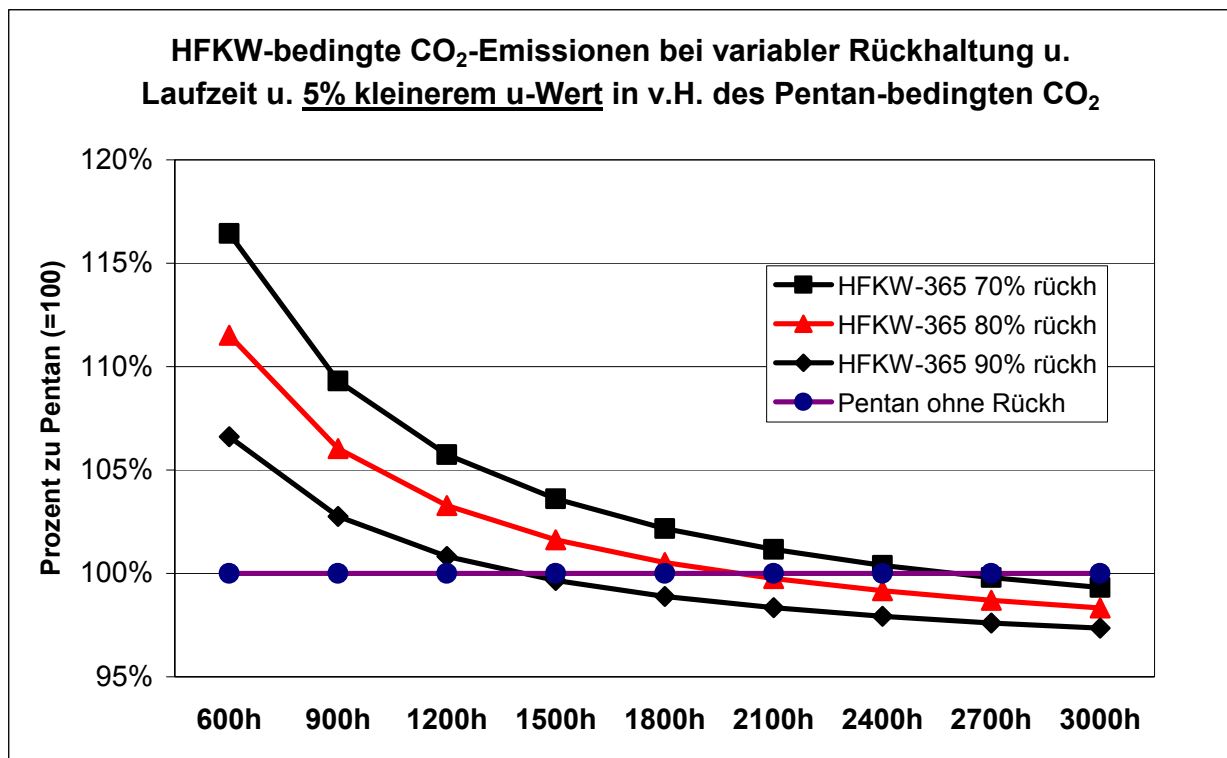


Abbildung 33 H-FKW-bedingte CO₂-Emissionen bei variabler Rückhaltung u. Laufzeit und gesenktem u-Wert in v.H. der Pentan-bedingten CO₂-Gesamtemissionen. Im Falle eines um 2,5% gegenüber den bisherigen Voraussetzungen niedrigen u-Werts des Kühlkoffers sinken die äquivalenten CO₂-Gesamtemissionen bei H-FKW-Anwendung bereits bei nur 70 %-iger Treibmittelvernichtung bei der Entsorgung (oberste Kurve) unter Pentan-bedingte CO₂-Gesamtemissionen. Bei 90 % Rückhaltung liegen die CO₂-Gesamtemissionen des H-FKW-Falls sogar im Anlagenlaufzeit-Bereich um 1500h/a leicht unter den Pentan-bedingten CO₂-Gesamtemissionen (unterste Kurve)

Es muss hier noch einmal einschränkend angemerkt werden, dass die beiden zuletzt durchgeführten Berechnungen (Abbildung 32 und Abbildung 33) reine Modellrechnungen sind, in dem Sinne, dass die hier unterstellte reguläre Entsorgung von PU-gedämmten Kühlfahrzeugen in Deutschland gegenwärtig und auf absehbare Zeit überhaupt nicht stattfindet.

5.3.5 Zusammenfassung

Am Anwendungsbeispiel der Kühlfahrzeugdämmung wurde gezeigt, dass

auch im Falle rigoroser Dickenbeschränkungen H-FKW-freie Alternativen eine bessere Treibhausbilanz aufweisen als H-FKW-geschäumte Dämmung, wenn die gegenwärtigen Entsorgungsbedingungen für Kühlfahrzeuge (Sattelaufleger), nämlich effektiv keine Treibmittelrückgewinnung am Lebensende, bestehen bleiben;

- Die Treibhausbilanz für den untersuchten Kühlaufleger zwar grundsätzlich zugunsten der Pentan-geschäumten Version ausfällt; dieser Vorteil jedoch, anders als im zuvor untersuchten Dämmplattenvergleich, relativ knapp ist und sich mit extrem langer Dauer der jährlichen Laufzeit der Kälteanlage bis zum Gleichstand verringern kann. Der viel geringere ökologische

Vorteil des c-Pentan-Systems ist technologisch bedingt: er ergibt sich aus dem sehr hohen Gewicht des CO₂ aus der Verbrennung (hier: von Kraftstoff) gegenüber dem in CO₂-Äquivalenten gemessenen Beitrag des Treibmittels zum Treibhauseffekt. Diese große Rolle des Kraftstoffverbrauchs kommt auch darin zum Ausdruck, dass er die Kostenbilanz vollständig determiniert. Nicht nur im Referenzfall, sondern generell sind die Betriebskosten für H-FCKW-Systeme niedriger, weil hier der u-Wert und damit der Energiebedarf der Kälteanlage niedriger ist.

- Solange die Sensitivitätsanalyse auf Basis der momentan-realen Bedingungen des Treibmittel-Totalverlustes und realistischer Laufzeiten der Kälteanlage verfährt, bleibt der ökologische Vorteil des Laderaums, der mit cyclo-Pentan geschäumtem Polyurethan gedämmt wird, bestehen:

- Läuft die Kälteanlage weniger als die typischen 1500 Stunden im Jahr, verbessert sich die Treibhausbilanz zugunsten c-Pentan absolut und relativ. Verdoppelt sich die Laufzeit auf 3000 Stunden, vermindern sich die Mehremissionen an CO₂-Äquivalenten im H-FKW-Fall relativ und absolut gegenüber dem Pentan-Fall, ohne jedoch auf den mit ihm verbundenen CO₂-Ausstoß abzusinken. (Gleichstand wäre erst bei nahezu ununterbrochener jährlicher Laufzeit erreicht).
- Bei reinem Dieselbetrieb der Kühlanlage, d.h. ohne die Nutzung von elektrischem Strom in den Standzeiten, erhöhen sich die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung. Dies führt zu einer noch geringeren Gewichtung der treibhauswirksamen H-FKW-Treibmittel in der Gesamt-CO₂-Bilanz. Dies bedeutet, dass sich der Vorteil von c-Pentan verringert, ohne jedoch - unter sonst unveränderten Rahmenbedingungen - verloren zu gehen.
- Selbst bei einer hypothetischen Verbesserung des u-Werts des mit H-FKW ausgeschäumten Kühlfahrzeugs gegenüber c-Pentan um weitere 2,5% auf insgesamt 5% bleibt es bei weniger CO₂-äquivalenten Gesamtemissionen im Pentan-Fall. Erst bei einer Jahreslaufzeit der Kälteanlage von über 5000 Stunden (18 Jahre lang) wäre ein Gleichstand erreicht.
- Der ökologische Vorsprung von Pentan-geschäumten Dämmsystemen gegenüber H-FKW-geschäumten wird erst dann minimal bis nicht mehr vorhanden, wenn von den aktuellen Entsorgungsbedingungen für alte Kühlfahrzeuge abgesehen oder wenn der Blickwinkel auf das Kühlfahrzeug geändert wird.

Aus dem letzterem Punkt ergibt sich die Forderung, das Fahrzeug nicht in der Einheit seines gesamten Lebenszyklus' zu betrachten, sondern es in seinen ersten inländischen und seinen zweiten ausländischen Lebensabschnitt zu trennen. Tatsächlich werden Kühlfahrzeuge heute nach ca. 9 Jahren gebraucht ins Ausland verkauft, so dass im Inland keine Entsorgungsverluste des Treibmittels anfallen. Wird der erste inländische Lebenszyklus isoliert betrachtet, dann ist ökologischer Gleichstand zwischen Pentan- und H-FKW-Schäumung schon im Standardfall (1500 h/a Anlagenlaufzeit) gegeben – selbstverständlich auf Kosten erhöhter Nachteile für das H-FKW-System im Ausland.

Wird nun nicht der Lebensweg des Kühlfahrzeugs aufgeteilt, sondern wird angenommen, dass sich mittelfristig die Entsorgung des Dämmschaums im Inland grundlegend verbessert, dann stellt sich die Treibhausbilanz zwischen H-FKW- und Pentan-Schäumung des Dämmstoffs tatsächlich neu. Wird nämlich eine 70%-ige Zersetzung des zu entsorgenden Dämmschaums unterstellt (d.h. 30% Verlust des Resttreibmittels bei Demontage des Kühlaufbaus), dann ist Gleichstand in der äquivalenten CO₂-Bilanz mit c-Pentan immerhin schon ab 2700 h

Jahreslaufzeit der Kälteanlage erreicht – ein Wert, der zwar hoch, aber nicht völlig unrealistisch ist.

5.4 Ausblick

Es wurde in diesem Kapitel gezeigt, dass

- in beiden Fallbeispielen über den gesamten Bereich von in der Praxis relevanten Bedingungen Pentan-geschäumte Polyurethan-Hartschäume eine über den Lebensweg bessere Treibhausgasbilanz aufweisen als Produkte auf der Basis von H-FKW-365mfc, da geringfügig höhere Energieverbräuche der mit Pentan geschäumten Systeme durch die Emissionen des Treibmittels mit hohem GWP kompensiert werden,
- die spezielle Ausgestaltung der zukünftigen Entsorgungswege (Verbrennung, Deponierung, Stoffliche Verwertung) von PU-Hartschäumen und den damit verbundenen Treibmittelmmissionen von zentraler Bedeutung für das Ergebnis der Analyse ist die Wege aber im Allgemeinen noch unbestimmt sind.

Es stellt sich die Frage, inwieweit die Ergebnisse für die beiden in diesem Kapitel untersuchten Anwendungsbeispiele auf andere verwandte Anwendungen übertragbar sein könnten. Nach Öko-Recherche (1999) werden H-FKW (134a und 245fa/365mfc) potenziell in folgenden Prozessen zur Herstellung von PU-Hartschäumen Verwendung finden:

- PU - Kontinuierliche Dämmplatten
- PU - Diskontinuierl. Dämmplatten
- PU - Blockschaum
- PU - Spritzschaum
- PU – Gießschaum

Dachdämmplatten werden als kontinuierliche Schaumplatten produziert, während die Sandwich-Elemente, wie sie in Kühlaufliegern zum Einsatz kommen, in die Kategorie diskontinuierlicher Platten fallen.

Während Spritz- und Gießschäume als sogenannte Ortschäume, die vom Endanwender vor Ort z.B. auf Baustellen zum Einsatz kommen, zwangsläufig höheren Sicherheitsanforderungen in Bezug auf brennbare Treibmittel unterliegen und damit eine Anwendung von Pentan in Frage gestellt ist, dürften die Ergebnisse dieses Kapitels qualitativ auf fast alle Prozesse zur industriellen Herstellung kontinuierlicher PU-Dämmplatten sowie von Blockschäumen übertragbar sein. Bei diskontinuierlichen Prozessen bestehen praktisch keine technischen Gründe, die die Verwendung von Pentan ausschließen würden. Bei geringen PU-Durchsätzen in kleineren Betrieben (Albach 2002) kann dagegen die Situation eintreten, dass die zusätzlichen Investitionen für Brand- und Explosionsschutz von Anlagen zur Pentan-Schäumung den Betrieb unwirtschaftlich machen würden, da die Einsparungen durch das preiswertere Treibmittel pro Betrieb in diesen Fällen im Vergleich zu den zusätzlichen Investitionskosten gering ausfallen.

6 Anwendung B – Supermarktkühlung (Verbundanlagen)

6.1 Einführung

Im Verlauf dieses Kapitels werden die Treibhausbilanzen verschiedener Technologien von Verbundanlagen für die Supermarktkühlung inklusive verschiedener Sensitivitätsanalysen verglichen. Zuvor werden einige Hintergrundinformationen zur Struktur des deutschen Lebensmitteleinzelhandels und dem Stand der Kühltechnik gegeben.

6.1.1 Lebensmitteleinzelhandel

Der moderne Lebensmitteleinzelhandel zeichnet sich durch ein Nebeneinander sehr unterschiedlicher Ladenformate aus. Je nach Lage (Stadtzentrum, Randlage, Städtische Wohngebiete, Peripherie, Dorf), Kundenstruktur und Konkurrenzsituation werden von den bekannten Ketten (wie Rewe, Edeka, Spar, Metro, Aldi, Tengelmann, Lidl) und Einzelunternehmern standardisierte Ladenkonzepte umgesetzt und gegebenenfalls angepasst. Die Tabelle 29 und Tabelle 30 geben einen Überblick über die in Deutschland wichtigsten Formate und ihre Marktanteile. Der deutsche Lebensmitteleinzelhandel besitzt dabei eine im europäischen Vergleich besondere Struktur. Dominiert wird der Markt seit etwa zwei Jahrzehnten von preisaggressiven Lebensmitteldiscountern (wie etwa Aldi, Lidl und Penny). Die Anzahl kleiner Selbstbedienungsmärkte ist noch relativ groß aber seit geraumer Zeit in einem dramatischen Niedergang begriffen. Vergleichsweise selten sind in Deutschland wirklich große SB-Warenhäuser und Verbrauchermärkte, was sich aus der in Deutschland restriktiven Genehmigungspraxis für Neuansiedlungen an der Peripherie von Städten ergibt.

Tabelle 29 Definition verschiedener Ladenformate im deutschen Lebensmitteleinzelhandel (EHI, 2001)

Einzelhandelstyp	Definition	Größe
SB-Warenhäuser	Einzelhandelsgeschäft mit Lebensmitteln in Selbstbedienung sowie einem umfangreichen Sortiment an Ge- und Verbrauchsgütern	> 4000 qm
Verbrauchermärkte	Einzelhandelsgeschäft mit überwiegend Lebensmitteln in Selbstbedienung sowie Ge- und Verbrauchsgütern	> 1500 qm
Supermärkte	Einzelhandelsgeschäft mit Lebensmitteln (inkl. Frischwaren) in Selbstbedienung (Non-Food <25% der Fläche)	> 400 qm
Lebensmittel-Discountmärkte	Lebensmittel-Selbstbedienungsgeschäft mit Konzentration auf umschlagstarke Artikel	400 – 800 qm
Lebensmittel SB-Laden	Einzelhandelsgeschäft mit Lebensmitteln in Selbstbedienung	< 400 qm

Tabelle 30 Marktanteile und wichtige Kennziffern für die Ladenformate im deutschen Lebensmitteleinzelhandel (EHI, 2001) (Nur Lebensmittelabteilungen für 1 und 2)

Einzelhandelstyp	Anzahl	Umsatz Mrd €	Verkaufs- fläche in Mio qm	Durchschnitt- liche Verkaufs- fläche [m ²]	Umsatz pro Fläche € / qm / a
1. SB- Warenhäuser	681	13,7 ²³	2,3	3392	6000 ²³
2. Verbraucher- märkte	1682	16,1 ²³	2,6	1552	6000 ²³
3. Supermärkte	9230	30,1	6,9	746	4400
4. Lebensmittel- Discountmärkte	12770	37,7	6,9	543	5500
Teilsomme	24363	97,6	18,7	768	5200
5. SB-Geschäfte unter 400 qm	45900	17,1	7,4	161	2300
GESAMT	70263	114,7	26,1	372	4400

6.1.2 Kühlsysteme im Lebensmitteleinzelhandel

Der Bedarf für die Kühlung von Lebensmitteln im Einzelhandel ist vielfältig. Er reicht von klassischer Tiefkühlware, über Molkereiprodukte, Fleisch- und Käseprodukte bis hin zu Gemüse und Obst. Hinzu kommt der Kühlbedarf für Produkte für den sofortigen Verzehr wie etwa Eis und Getränke sowie oft zusätzliche Kühlräume für die Lagerung von Waren. Das Verhältnis der einzelnen Kühlbedarfsfelder richtet sich dabei stark nach dem Format und der Käuferstruktur des jeweiligen Ladens.

Es wird daher nicht überraschen, dass die technischen Lösungen für Kühlanwendungen im Handel nicht einheitlich, sondern angepasst sind an Format und Lage eines Geschäftes. Drei Grundtypen von Kühlsystemen sind im Handel weit verbreitet:

1. Steckerfertige Kühlmöbel mit niedrigen Investitionskosten aber relativ hohem Energieverbrauch unter hoher Flexibilität bei der Wahl des Einsatzortes
2. Einzelkühlmöbel mit jeweils eigenem externem Verflüssigungssatz (ebenfalls noch vergleichsweise flexibel)
3. Verbundanlagen mit zentralem Kompressorraum und Kühlmittleitungen zu den verschiedenen Kühlmöbeln (höhere Investitionskosten bei niedrigeren Energieverbräuchen)

Darüber hinaus entsteht oft noch der Bedarf zur Klimatisierung der Verkaufsräume, vor allem wenn es durch eine Vielzahl steckerfertiger Kühlmöbel zu einem hohen Wärmeeintrag kommt. Die Klimatisierung von Verkaufsräumen ist jedoch nicht Teil dieser Untersuchung.

Als Faustformel kann man annehmen, dass gegenüber der Verbundanlage (3) die spezifischen Energieverbräuche der Verflüssigungssätze (2) um 20-40% höher liegen [BEWAG, 1996]

²³ Eigene Abschätzung der Aufteilung innerhalb der Gesamtgruppe „SB-Warenhäuser/Verbrauchermärkte“

und der Mehrverbrauch von steckerfertigen Kühlmöbeln (1) gegenüber den Verflüssigungssätzen (2) nochmals einige 10 % beträgt [Eurovent-Certification, 2001]. Hierin geht ein, dass sich in der Regel bei Freisetzung der Wärme direkt in den Verkaufsraum ein zusätzlicher Aufwand für dessen Klimatisierung ergibt. In der Praxis werden Läden oft mit einem Mix aus zwei oder allen drei Technologien ausgestattet. Im allgemeinen geht der Trend mit zunehmender Größe eines Geschäftes weg von den Lösungen 1 und 2 hin zur Lösung 3.

Anders als dieses recht pauschale Bild vermuten ließe, unterliegen reale Energieverbräuche für die Kälteerzeugung im Lebensmitteleinzelhandel jedoch einer Vielzahl von Einflussfaktoren: Abbildung 34 gibt die Situation für das Ladenformat „Penny-Markt“ der Firmengruppe Rewe wieder, die im Rahmen dieser Untersuchung freundlicherweise fernerfasste Stromverbräuche für Kühlung für das Jahr 2001 für einen Teil ihrer Märkte zur Verfügung stellte. Als geeignete Normierungsgröße für Stromverbräuche für die Kälteerzeugung hat sich im Einzelhandel der „Laufende Meter Kühlmöbel“ eingebürgert, um Effekte unterschiedlicher Verkaufsflächen und verschiedener Dichte an Kühlanwendungen aus den Datensätzen zu entfernen. Es zeigt sich, dass das im Stromverbrauch oberste Dezil von Läden über 100% über dem untersten Dezil liegt. Normiert man die jährlichen Stromverbräuche für dasselbe Ensemble von Märkten auf die Verkaufsfläche, so ergibt sich ein ähnliches Bild (vgl. Abbildung 35). Diese Unterschiede existieren trotz der an sich recht einheitlichen Auslegung der deutschen Pennymärkte.

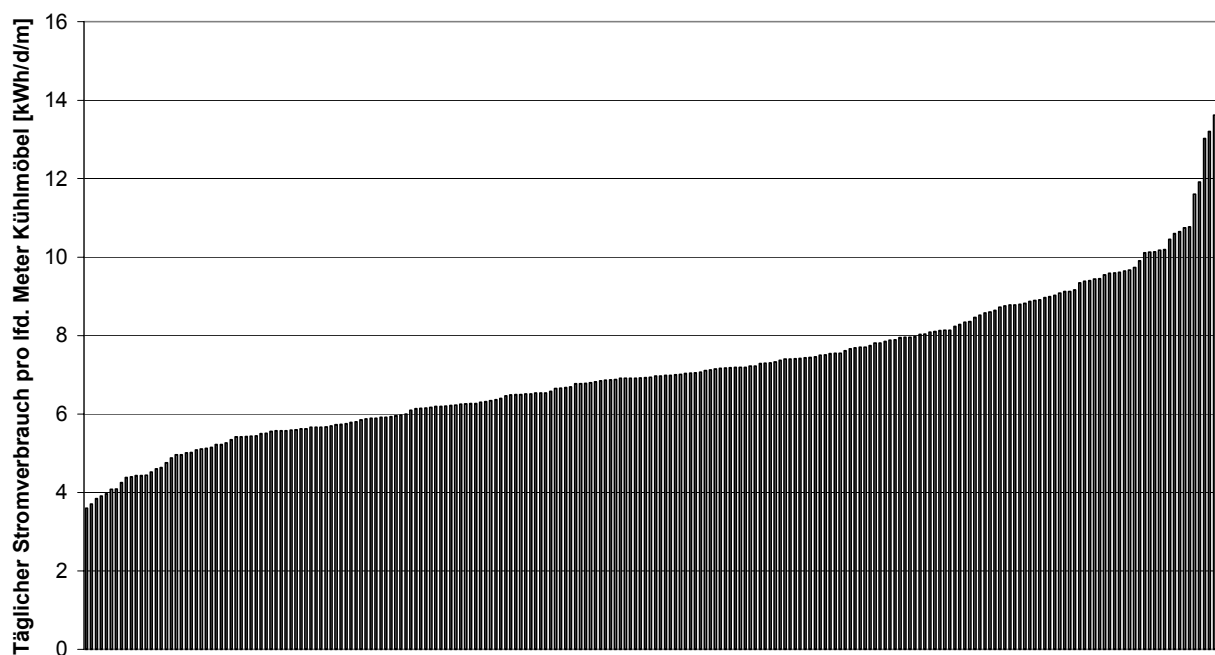


Abbildung 34 Auf laufende Meter Kühlmöbel normierte tägliche Stromverbräuche für die Kälteerzeugung in 226 Penny-Märkten im Jahre 2001.

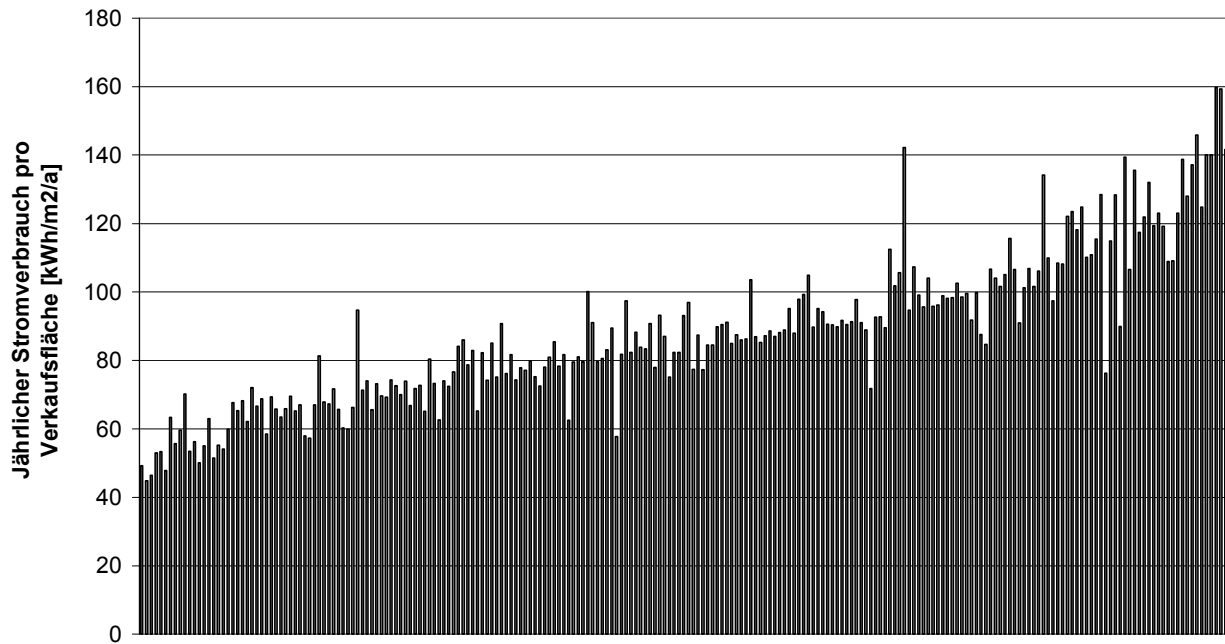


Abbildung 35 Auf Verkaufsfläche normierte jährliche Stromverbräuche für die Kälteerzeugung in 226 Penny-Märkten im Jahre 2001 (gleiche Reihenfolge wie oben).

Die Kühlung macht typischerweise zwischen 45 und 70% des Stromverbrauchs eines Lebensmittelgeschäftes aus [BEWAG, 1996]. Bezogen auf den Umsatz pro Fläche (€ 5000-6000 / m²) bleiben die mit der Kühlung verbundenen laufenden jährlichen Stromkosten (€4-7/m² in den Daten der Firma Rewe) damit im Bereich weniger Promille. Die Investitionskosten für die Kühlung und die Kühlmöbel betragen in der Regel etwa 40% der gesamten Einrichtungskosten eines neuen Ladens (€300-700/m² [EHI, 2002]) und machen jährlich je nach Art der Amortisationsrechnung und Lebensdauer der Investition (typischerweise 10 Jahre) zwischen 0,5 und 1% des Flächenumsatzes aus. Diese Zahlen machen deutlich, dass die Kühlung als Kostenfaktor im Lebensmitteleinzelhandel neben Wareneinkauf, Personal und Mieten von vergleichsweise geringer Bedeutung ist. Andererseits liegen die Gewinnspannen im deutschen Einzelhandel im niedrigen Prozentbereich, so dass einfach zu realisierende Einsparungen auch im Promille-Bereich im Zusammenhang mit der Kühlung im Prinzip durchaus interessant sind, wenn sie nicht durch Einbußen an Haltbarkeit, Aussehen und Zugänglichkeit der Waren das wirtschaftliche Ergebnis des Geschäftes kompromittieren.

Welche Einflussgrößen bestimmen nun aber die Energieverbräuche für die Kühlung im Einzelhandel? Zu nennen sind:

- Bedarf an Kühlmöbeln für verschiedene Arten von gekühlten Produkten in den Kategorien Normalkühlung (NK) für Frischwaren von -1°C...+12°C und Tiefkühlung (TK) für Tiefkühlware unter -18°C sowie an gekühlter Lagerfläche.
- Gewählter Mix von Grundtechnologien (Steckerfertig, Verflüssigungssätze, Verbundanlagen)
- Spezielle Gestaltung der Kühlmöbel (z.B. horizontal mit / ohne Tages-Abdeckung, vertikal mit / ohne Türen, Beleuchtung)

- Auslegung und Planung der Anlage (z.B. Dimensionierung, mittlere Temperatur des Kondensators und des Verdampfers)
- Wahl und Einstellung der Regelung (z.B. Temperatur von Zuluft / Abluft im Kühlmöbel, Abtauzyklen)
- Festlegung von technologischen Einzelaspekten (elektrische- oder Gas-Abtauung, Direktverdampfer oder Sekundärsystem)
- Wartungszustand
- Außenklima und mittlere Innentemperatur des Ladens

Die im Datensatz der Firma Rewe zu beobachtenden ausgeprägten Differenzen bei den spezifischen Energieverbräuchen beruhen sicherlich auf einer Kombination dieser Einflussfaktoren. Im Rahmen dieser Studie kann eine vertiefende Analyse allerdings nicht durchgeführt werden. Der Sachverhalt, dass selbst innerhalb eines relativ homogenen und gut überwachten Ensembles von Lebensmittelmärkten Abweichungen der spezifischen Energieverbräuche von über 100% vorkommen, ist aber für die sich anschließende Betrachtung des Einflusses der Kältemittelwahl auf den Energieverbrauch festzuhalten.

6.2 Kühltechnik

6.2.1 Kältemittelwahl

Kühlanwendungen im Lebensmitteleinzelhandel benötigen ein Kältemittel, um über einen thermodynamischen Verdampfungs-Verflüssigungskreislauf eine Temperaturabsenkung im Kühlmöbel zu bewerkstelligen. Hierfür wurden früher bevorzugt die ungiftigen und unbrennbaren FCKW (12) und H-FCKW (22) bzw. das FCKW-H-FCKW-Gemisch R-502 verwendet, die mittlerweile jedoch wegen ihrer ozonzerstörenden Wirkung bei Neuanlagen nicht mehr zum Einsatz kommen dürfen. Heute haben sich als konventionelle Ersatzstoffe vor allem H-FKW-134a und das H-FKW-Gemisch 404A (bzw. 507) (vgl. Tabelle 4) etabliert. Aber auch Kohlenwasserstoffe (z.B. Propylen, Propan oder Butan), Ammoniak und Kohlendioxid sind technisch verfügbare Alternativen, mit denen eine Freisetzung von H-FKW in die Umwelt vollständig vermieden werden kann. Bei Kohlenwasserstoffen und Ammoniak muss wegen der Brennbarkeit bzw. der Toxizität der Substanz in Supermarktanwendungen jedoch anders als bei den Direktverdampfersystemen ein sogenannter Sekundärkreislauf eingeführt werden, d.h. es zirkuliert in Verbundanlagen nicht das Kältemittel zum Kühlmöbel sondern ein Kälte Träger, z.B. eine Sole. Das Kältemittel bleibt dann auf den Primärkreislauf beschränkt, der räumlich von den Ladenräumen getrennt bleibt. Der für den Sekundärkreislauf zusätzlich erforderliche Wärmetauscher sowie eine Pumpe erhöhen i.a. sowohl die Investitionskosten als auch den Energieverbrauch der Anlage. Diese Technik kann auch für H-FKW-Anlagen verwendet werden, um so die Gesamtmenge eingesetzter H-FKWs auf 10-20% der Ausgangsmenge zu reduzieren.

In der Praxis wurden in Deutschland als Neuanlagen in den letzten Jahren meistens Direktverdampfer-Verbundanlagen ausschließlich mit H-FKW-404A in Betrieb genommen. Dies ist aufgrund rechtlicher Bestimmungen in der Schweiz, Luxemburg und Skandinavien, wo Beschränkungen für den Einsatz von H-FKW bestehen, anders. Dort werden Neuanlagen bevorzugt als Sekundärsysteme mit Ammoniak, kleinen Füllmengen H-FKW und bisweilen auch Kohlenwasserstoffen ausgeführt.

Im Bereich der Kältemittel konzentriert sich heute die Diskussion um das Umweltverhalten neben dem Aspekt der Energieeffizienz der Prozesse primär auf die direkte Klimawirksamkeit (vgl. Kapitel 4) der H-FKW. Dies gilt insbesondere in Verbindung mit der nicht

unerheblichen technischen Herausforderung, die H-FKW in Verbundanlagen mit verzweigten Rohrleitungssystemen unter rauen betrieblichen Bedingungen zu vertretbaren Kosten so zu handhaben, dass jährliche Verlustraten von mehreren Prozent pro Jahr vermieden werden können. Typischerweise finden sich heute Verlustraten von 10% pro Jahr [ILT, 1999] als reine Leckageverluste während des Betriebes. Hinzu kommen Emissionen am Ende der Lebensdauer des Systems. Der Effekt unterschiedlicher Annahmen zur durchschnittlichen Verlustrate wird im Rahmen der folgenden Sensitivitätsanalysen untersucht.

6.2.2 Modelltechnologien

Im Rahmen dieser Studie werden acht verschiedene Technologien für Supermarkt-Verbundanlagen betrachtet. Sie alle haben mittlerweile Marktreife erreicht, wobei in Europa zur Zeit vor allem die Technologien 1, 2 und 5 nennenswerte Marktanteile besitzen. In Deutschland wird derzeit praktisch ausschließlich die Technologie 1 realisiert. Die Erfahrungen mit Sekundärsystemen stammen in Deutschland hauptsächlich aus der Einführungsphase von Solesystemen, in der erhebliche Probleme mit der Zuverlässigkeit des Solekreislaufes bestanden. Bei Systemen die in anderen europäischen Ländern in der Zwischenzeit realisiert wurden, treten diese Problem nicht mehr auf.

9. Direktverdampfer H-FKW-404A (Referenz)
10. Sekundärsolesystem mit H-FKW-404A
11. Sekundär-CO₂-System mit H-FKW-404A
12. Sekundär-CO₂-System mit Propan
13. Sekundärsolesystem mit Ammoniak
14. Direktverdampfer CO₂ (TK) und Sekundärsolesystem H-FKW-404A (NK)
15. Direktverdampfer CO₂ (TK) und Direktverdampfer H-FKW-404A (NK)
16. Direktverdampfer CO₂ (TK und NK (überkritisch))

1. Direktverdampfer H-FKW-404A (Referenz)

Verbundkälteanlagen mit Direktverdampfung von H-FKW-404A stellen wie oben bereits ausgeführt die derzeitige Standardtechnologie in größeren Supermärkten in Deutschland dar. Sie vereinen niedrige Investitionskosten mit vergleichsweise niedrigen Energieverbräuchen. Aufgrund der direkten Versorgung der Kühlmöbel mit Kältemittel ergibt sich als Hauptmangel auf der Umweltseite die jeweils große installierte Kältemittelmenge in Kombination mit vergleichsweise hohen jährlichen Verlustraten, die aus den großen Leitungslängen und der Vielzahl an Verbindungen resultieren.

2. Sekundärsolesystem mit H-FKW-404A

In sogenannten Sekundärsystemen wird die Menge der installierten Kältemittel um etwa 80% reduziert, indem statt des Kältemittels ein Kälteträger zu den Kühlmöbeln zirkuliert. Über einen Wärmetauscher wird die Kälte aus dem konventionell mit H-FKW-404A betriebenen Primärkreislauf ausgekoppelt und mit Hilfe einer Sole zu den Kühlmöbeln gebracht. Durch den zusätzlich erforderlichen Wärmetauscher und die größeren Rohrquerschnitte steigen die Investitionskosten (15-25% gegenüber der Referenz) und als Folge von verringerter Effizienz und zusätzlichen Pumpenergien die Energieverbräuche (15-25% gegenüber der Referenz) (Zahlenwerte aus: Linde [1997]).

3. Sekundär-CO₂-System mit H-FKW-404A

Ersetzt man die Sole im Sekundärkreislauf durch Kohlendioxid, so ergeben sich folgende Vorteile: die Investitionskosten und Energieverbräuche bleiben mit Anstiegen von ca. +15% bzw. +10% aufgrund kleiner ausgelegter Rohrquerschnitte im Sekundärkreislauf und kleinerer Pumpenleistungen näher an den Werten der Referenzanlage (Zahlenangaben aus: Kauffeld et al. [2002] und persönliche Mitteilung Haaf [2003]).

4. Sekundär-CO₂-System mit Propan

Der Einsatz von Propan im Primärkreis von Supermarktkühlungen weist ähnliche Eigenschaften bezüglich Investitionskosten und Energieverbräuchen auf wie das oben beschriebene Sekundärsystem mit CO₂ als Kälte­träger (Anstieg um ca. 20% bzw. ca. 10%). Dem Nachteil der Brennbarkeit von Propan auf der einen Seite steht auf der anderen Seite der Vorteil seines niedrigen Treibhauspotenzials entgegen (Zahlenangaben aus: Kauffeld et al. [2002] und persönliche Mitteilung Haaf [2003]).

5. Sekundärsolesystem mit Ammoniak

Eine weitere, vielfach in der Praxis erprobte Technologie ist die Sekundäranlage mit Ammoniak im Primärkreis. Im Vergleich zu Propan / Propen stechen höhere Leistungszahlen hervor. Bei der Materialauswahl sind spezielle Materialien (Verzicht auf Kupfer) zu wählen. Aufgrund der akuten Toxizität von Ammoniak wird zur Risikominimierung in der Regel ein weiterer Kreislauf (Kälte­träger) auf der Kondensatorseite eingeführt mit den entsprechenden Folgen für die Investitionskosten (20-35%) und den Energieverbrauch (10-20% gegenüber der Referenz) (Zahlenangaben aus: Linde [1997] und Haaf [1998]).

6. Direktverdampfer CO₂ (TK) und Sekundärsolesystem H-FKW-404A (NK)

Erst seit kurzem sind Supermarktkühlungen mit CO₂ als direktverdampfendem Kältemittel im Tiefkühlkreis verfügbar. Diese basieren auf einem speziellen Kaskaden-Wärmetauscher. Der Normalkälte-Kreislauf verwendet H-FKW-404A und ein Sekundärsolesystem. Die Investitionskosten und spezifischen Energieverbräuche gegenüber dem Referenzsystem sind um etwa 10% erhöht (Zahlenangaben aus: Heinbokel [2001] und persönliche Mitteilung Haaf [2003]).

7. Direktverdampfer CO₂ (TK) und Direktverdampfer H-FKW-404A (NK)

Dieses System beruht ebenfalls auf einem direktverdampfenden CO₂-System Kältemittel im Tiefkühlkreis mit einem Kaskaden-Wärmetauscher. Der Normalkälte-Kreislauf ist in diesem Fall mit H-FKW-404A Direktverdampfung ausgeführt. Der Stromverbrauch der Anlage bleibt gegenüber der Referenzanlage unverändert, bei etwa um 2% erhöhten Investitionskosten (Zahlenangaben aus: Heinbokel, [2001] und persönliche Mitteilung Haaf [2003]). Die Füllmenge mit H-FKW-404A ist auf 50% der Referenzanlage reduziert und die spezifische Emissionsrate von H-FKW-404A ist um 25% reduziert.

8. Direktverdampfer CO₂ (TK und NK (überkritisch))

Die Basis für diese Anlagen stellt das von Giroto et al. [2003] beschriebene System dar, das auf der Normalkälteseite einen superkritischen CO₂-Kreislauf und auf der Tiefkühlseite ein zweistufigen Kaskadenkreislauf mit CO₂ verwendet. Der Stromverbrauch wird mit einem Mehrverbrauch von 8% gegenüber einer 404A-Referenzanlage angegeben, die Investitionskosten mit zusätzlich 10%.

6.3 Referenzmarkt

Als funktionale Einheit wird die Verbundkälteanlage für 1000 Quadratmeter Verkaufsfläche (Food) eines fiktiven für Deutschland repräsentativen Supermarktes definiert und untersucht. Die Auslegung der Kälteanlage hängt von einer Anzahl Faktoren ab, die im einzelnen nur schwer im Modell zu berücksichtigen sind. Sie können am geeignetsten durch Verwendung größerer Datensätze für reale Supermärkte abgebildet werden. Es wurden hierzu die Daten der Rewe-Gruppe (viele kleinere Märkte und ein hoher Anteil von steckerfertigen Geräten in der Tiefkühlung) und die eines weiteren großen deutschen Einzelhändlers (mit größeren Ladenformaten und generell Verbundkälte für Normal- und Tiefkühlung) flächengewichtet gemittelt. Tabelle 31 gibt eine Übersicht über die ermittelten Zahlenwerte für verschiedene Ladenformate. Bei der Gewichtung wurden die Ladenformate entsprechend ihrer Bedeutung im deutschen Einzelhandel gewichtet. Diese Zahlen bilden die Ausgangsbasis zur Definition der hypothetischen Referenzanlage (s.u.), die dann dem Vergleich der verschiedenen Alternativtechniken dient (Tabelle 31). Zum Vergleich enthält Tabelle 31 auch die einfachen Mittelwerte der betrachteten Ladenformate, die aber gegenüber der deutschen Einzelhandelslandschaft zu größeren Formaten und Verbundkälteanlagen hin verschoben sind – ohne allerdings wesentlich andere Schlüsselp Parameter (spezifische Kältemittelmenge und Stromverbräuche) aufzuweisen. Graphisch sind diese Zahlenwerte in Abbildung 36 und Abbildung 37 wiedergegeben. Es zeigt sich dort, dass die spezifischen Energieverbräuche auch zwischen den verschiedenen Ladenformaten relativ stark variieren. Der Einfluss der Wahl des Parameters des spezifischen Energieverbrauchs auf das Endergebnis wird im Rahmen der folgenden Sensitivitätsanalyse betrachtet.

Tabelle 31 Übersicht über gemittelte Rohdaten für verschiedene Ladenformate der Rewe-Gruppe und eines weiteren großen deutschen Einzelhändlers

Ladenformat Lfd. Nr.	Verkaufsfläche [qm] (Food)	H-FKW in Verbundkälte [Kg]	H-FKW-Dichte [Kg/qm] nur Fläche (Food)	Strom f. Verbundkälte [KWh/qm/a] nur Fläche (Food)
1	504	125	0,248	155
2	574	63	0,110	93
3	813	139	0,171	111
4	555	130	0,234	166
5	1295	161	0,124	239
6	8000	1400	0,175	188
7	3604	950	0,264	223
8	1156	270	0,234	235
Gewichtetes Mittel DEU	1385	265	0,188	150
Z. Vergleich: Mittelwert	2063	405	0,195	176

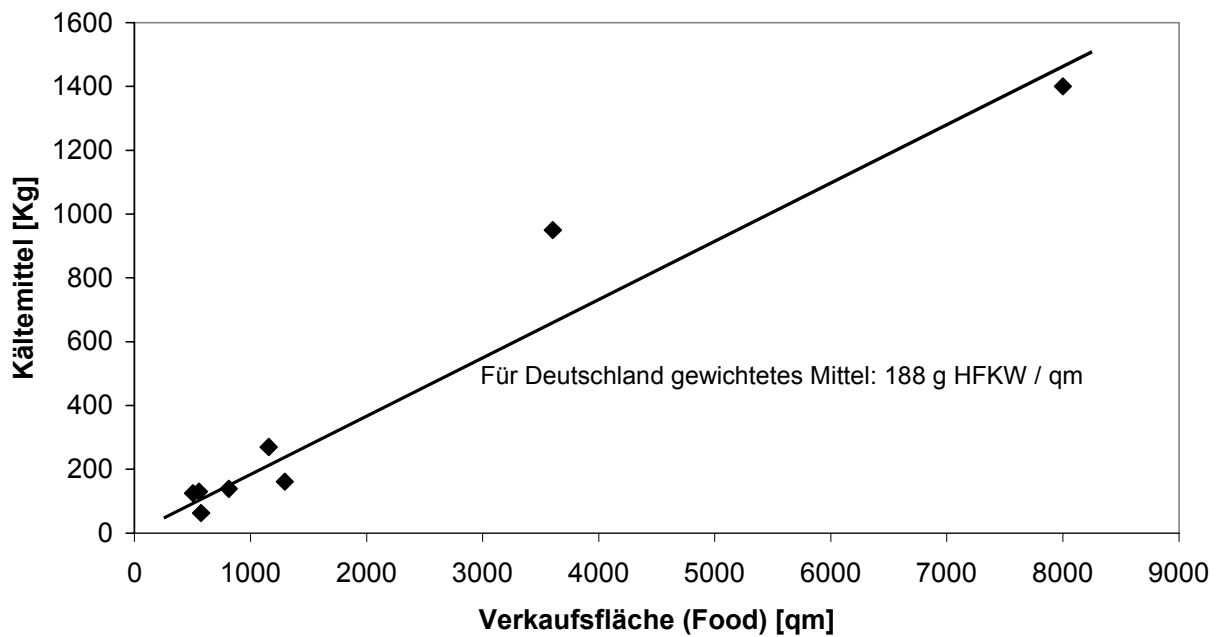


Abbildung 36 Zusammenhang zwischen Verkaufsfläche (Food) und installierter H-FKW Kältemittelmenge in Verbundkälte für verschiedene Ladenformate der Rewe-Gruppe und eines weiteren großen deutschen Einzelhändlers

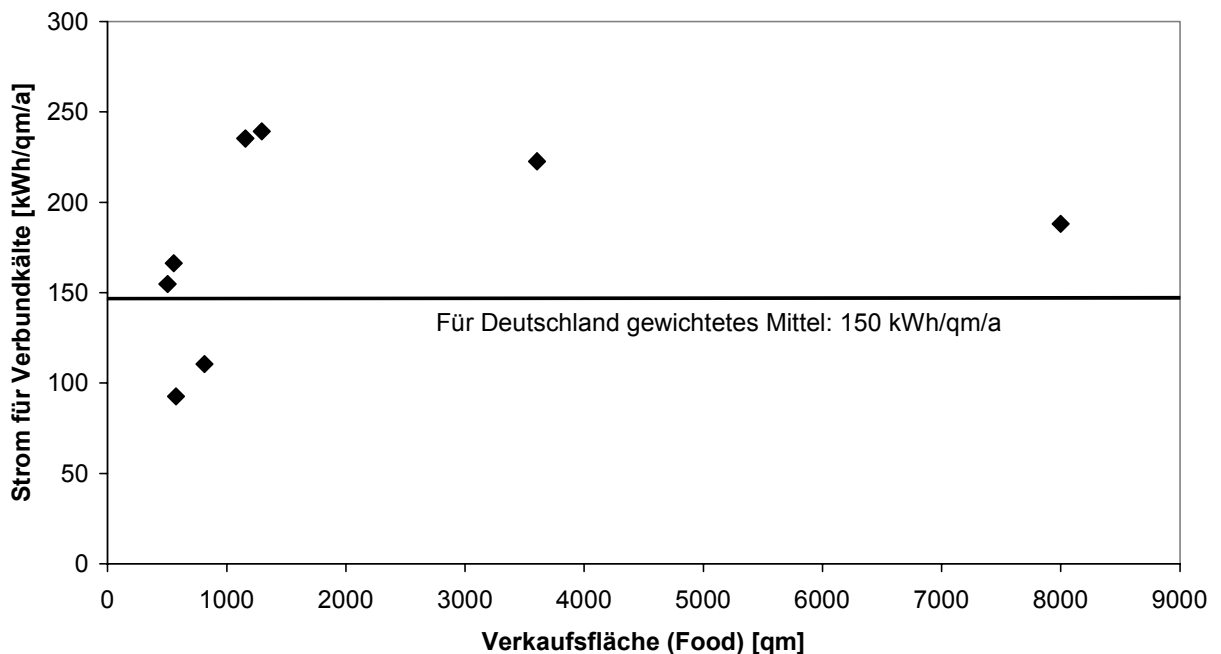


Abbildung 37 Zusammenhang zwischen Verkaufsfläche (Food) und dem jährlichen Energieverbrauch für Verbundkälte für verschiedene Formate der Rewe-Gruppe und eines weiteren großen deutschen Einzelhändlers

6.4 Relevanz der Emissionen für Deutschland

Die Relevanz der im Zusammenhang mit Verbund-Kälteanlagen in Supermärkten in Deutschland entstehenden direkten (Kältemittel) und indirekten (energiebedingten) Treibhausgasemissionen lässt sich über die Gesamtverkaufsfläche (18.7 Mio qm) des Anteils des deutschen Lebensmitteleinzelhandels mit Verbundkälteanlagen (>400 qm) und entsprechende Flächenkennzahlen abschätzen. Für die Daten dieses Sektors des Handels kann von einem Food-Anteil an der Verkaufsfläche von 95% ausgegangen werden. Überträgt man den spezifischen gewichteten jährlichen Stromverbrauchs von 150 kWh/a je Quadratmeter Verkaufsfläche (Food) (Tabelle 31) auf den entsprechenden Teil des Lebensmitteleinzelhandels, so ergibt sich ein Gesamtverbrauch von etwa 2.7 Mrd kWh für Verbundkälte im Jahr (DKV (2002) schätzt 6,3 Mrd kWh für die gesamte Gewerbekälte), was bei der aktuellen Kohlenstoffintensität der deutschen Elektrizitätswirtschaft von etwa 0,58 kg CO₂ / kWh [VDEW, 2001] etwa 1,6 MT CO₂ für diesen Sektor entspricht. Die entsprechenden Kältemitteldichten lassen sich für einen hypothetischen reinen H-FKW-Park bei einer mittleren jährlichen Emissionsrate von 10% und einer mittleren gewichteten Kältemitteldichte von 188 g/m² (entsprechend einem Bestand von 3300 Tonnen H-FKW) zu etwa 330 Tonnen H-FKW abschätzen. Dem entsprechen bei einem angenommenen GWP von 3260 (für H-FKW-404A) Emissionen von etwa 1,1 MT CO₂ in Deutschland und damit einer vergleichbaren Größenordnung wie die indirekten Emissionen. Eine genauere Untersuchung der Energie- und Treibhausgasbilanzen verschiedener technologischer Optionen findet im Folgenden statt.

6.5 Modellierung

Die Systeme werden durch eine Kombination relativer Leistungsdaten und absoluter Daten für das Referenzsystem (1) eines repräsentativen deutschen Referenzmarktes charakterisiert. Die verwendeten Relativ-Daten sind in Tabelle 32 wiedergegeben. Sie basieren auf Angaben der Linde AG [Linde, 1997; Heinbokel, 2001; Persönliche Mitteilung S. Haaf, 2002, 2003] und für die Materialdichte (Masse der installierten Kältetechnik inkl. Kühlmöbel pro Quadratmeter Verkaufsfläche) auf Frischknecht [1999b] und eigenen Abschätzungen. Die absoluten Bezugsdaten für die hypothetische Referenzanlage sind zusammen mit der jeweiligen Quelle in Tabelle 33 wiedergegeben. Die Emissionsrate von 11.5 % [ILT, 1999] p.a. schließt Befüllungsverluste, Entsorgungsverluste und die Verluste während des Betriebs (inkl. Reparatur und Wartung) ein. Sie liegt am unteren Rand der vom IPCC in seiner Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories (2000) für diesen Sektor genannten Werte von 10-30% p.a.

Tabelle 32 Relative Leistungsdaten verschiedener Supermarkt-Verbundkälteanlagen

	Direktverdampfung H-FKW-404A	Sekundärsole-system mit 404A	Sekundär-CO ₂ -System mit H-FKW-404A	Sekundärsole-system mit Propan	Sekundärsole-system mit Ammoniak	Direkt CO ₂ (TK) / Sekundärsole 404A (NK)	Direkt CO ₂ (TK) / Direkt 404A (NK)	Direkt CO ₂ (TK und NK (überkritisch))
Stromverbrauch	100	120	110	110	115	110	100	108
Investitionskosten	100	120	115	120	127,5	110	102	110
Wartungskosten	100	200	200	200	200	150	125	125
KM Emissionsrate	100	100	100	20	20	100	75	100
Kältemitteldichte	100	20	20	10	10	20	50	50
Materialdichte	100	150	140	150	160	120	100	100

Tabelle 33 Absolute Leistungs- und Kostendaten der hypothetischen Referenzanlage

	Zahlenwert	Quelle
Stromverbrauch	150 kWh / m ² / Jahr	Gewichtetes Mittel der Formate bei Rewe und einem zweiten großen deutscher Einzelhändlers
Investitionskosten	€ 100 / m ²	Rewe
Wartungskosten	€ 2 / m ² / Jahr	Rewe
KM Emissionrate Service, Betrieb und Entsorgung	11.5 % / Jahr	ILT (1999) + 15% Entsorgungsverluste über Lebensdauer verteilt
Kältemitteldichte	188 g / m ²	Gewichtetes Mittel der Formate bei Rewe und einem zweiten großen deutscher Einzelhändlers
Materialdichte	2,3 kg / m ²	Frischknecht (1999a/b)
Lebensdauer	10 Jahre	Rewe

6.6 Standardfall

CO₂-Emissionen

Für den oben beschriebenen Standardfall ergibt sich für die Treibhausgasemissionen der einzelnen Technologien folgendes Bild (Abbildung 38). Recht deutlich zeigt sich, dass die Referenztechnologie (Direktverdampfer 404A) unter den Standardannahmen allen anderen Technologien in Hinblick auf die Treibhausgasemissionen unterlegen ist. Die vergleichsweise hohen Kältemittlemissionen der 404A-Direktverdampferanlage übertreffen in allen Fällen die Emissionen aufgrund erhöhter Stromverbräuche. Die mit der Herstellung der Anlagen verbundenen Emissionen bleiben in allen Fällen mit 0,3-0,5% von untergeordneter Bedeutung. Mit 13% besser als das Referenzsystem schneidet die Anlage mit 404A und einem Sole-Sekundärkreislauf ab. Danach folgen mit 17-20% niedrigeren Emissionen das 404A-System mit CO₂-Sekundärkreislauf, das CO₂-System in Kombination mit einem 404A-Sekundärsole-System (TK) sowie das CO₂-System mit 404A Direktverdampfung (TK). Die niedrigsten Emissionen (etwa 30% unter der Referenz) sind mit Systemen verbunden, die Propan oder Ammoniak zusammen mit einem Sekundärsolekreislauf verwenden bzw. System mit Direktverdampfung von CO₂ (TK und NK (überkritisch)).

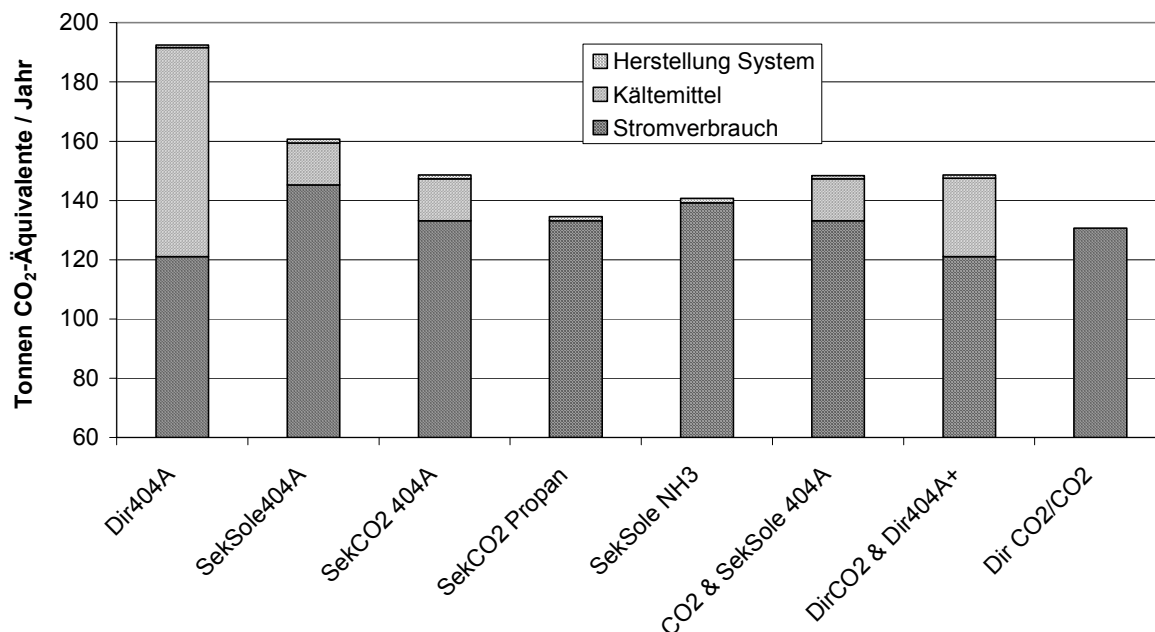


Abbildung 38 Jährliche Treibhausgasemissionen für verschiedene Technologien unter Einbeziehung der Stromerzeugung, der Kältemittelverluste und der Herstellung der Anlage (Achtung: gestreckte Größenachse)

Kosten

Auf der Kostenseite sind die Ergebnisse für die einzelnen Technologien durchaus anders geartet (Abbildung 39). Hier schneidet die klassische H-FKW-404A Direktverdampferanlage 10 bis 25% günstiger ab als die meisten der untersuchten Vergleichstechnologien, was auch die Marktpräferenz in Deutschland widerspiegelt. Die System mit CO₂ (TK) und 404A Direktverdampfung auf der NK-Seite liegt kostenmäßig nur noch 3% über der Referenzanlage. Die Investitionskosten sind verzinst mit 10 % pro Jahr, verteilt über die Lebensdauer der Anlage von 10 Jahren, womit eine der Kostenrechnung kommerzieller Entscheidungsträger analoge Berechnung verwendet wurde. Die resultierenden spezifischen Reduktionskosten pro Tonne CO₂-Äquivalent liegen im günstigsten Fall (CO₂-Kältemittel (TK) / H-FKW-Direktverdampfung (NK)) bei €20. Für andere untersuchte Technologien liegt diese Kennziffer entsprechend höher (Tabelle 34). Zum Vergleich: die von der EU-Kommission in KOM(2003) 492 „Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlamentes und des Rates über bestimmte fluorierte Treibhausgase“ vorgelegten Zahlenwerte für die Vermeidungskosten für den Einsatz von H-FKW-152a bzw. CO₂ statt H-FKW-134a in Autoklimaanlagen fallen je nach Annahmen in das Intervall von 7-26 € / t CO₂ eq. für 152a bzw. 18-88 € / t CO₂ eq. für transkritische CO₂-Systeme.

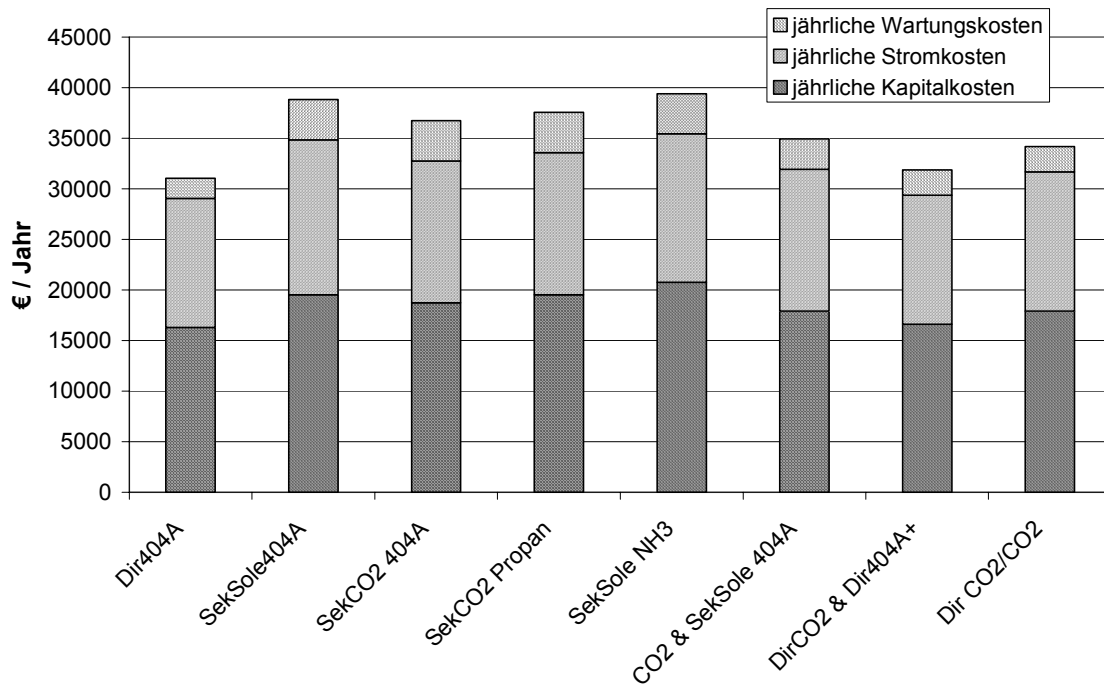


Abbildung 39 Gegenüberstellung der jährlichen Gesamtkosten verschiedener Technologien.

Tabelle 34 Reduktionspotenziale der Alternativtechnologien und zugehörige spezifische Vermeidungskosten gegenüber Referenzanlage

	Emissionsreduktion im Vergleich zur Referenz [%]	Spezifische Vermeidungskosten [€/ t CO ₂]
Direktverdampfer H-FKW-404A (Referenz)	0	Referenz
Sekundärsolesystem mit H-FKW-404A	16	246
Sekundär-CO ₂ -System mit H-FKW-404A	23	130
Sekundär-CO ₂ -System mit Propan	30	113
Sekundärsolesystem mit Ammoniak	27	162
Direktverdampfer CO ₂ (TK) und Sekundärsolesystem H-FKW-404A (NK)	23	88
Direktverdampfer CO ₂ (TK) und Direktverdampfer H-FKW-404A (NK)	23	19
Direktverdampfer CO ₂ (TK und NK (überkritisch))	32	52

6.7 Sensitivitätsanalyse

Um die Robustheit der Ergebnisse zu untersuchen, wurden folgende Parameter variiert:

1. 50% niedrigere und 50% höhere Kältemittlemissionsrate
2. 50% niedrigerer und 50% höherer Energieverbrauch der Referenzanlage
3. Veränderung des Energiemixes (100% regenerativ und 100% Braunkohle)

Die jeweiligen Ergebnisse sind in Abbildung 40, Abbildung 41 und Abbildung 42 wiedergegeben.

Es zeigt sich als Ergebnis der 1. Sensitivitätsanalyse (Abbildung 40), dass sich bei um 50% reduzierten Energieverbräuchen die Reihung der Technologien erhält. Der relative Vorteil durch Einsatz der Alternativtechnologien erhöht sich deutlich. Im Falle eines um 50% erhöhten spezifischen Energieverbrauches gleichen sich die Technologien stärker aneinander an. Die Vorteile der Sekundärsysteme gehen zum Teil verloren.

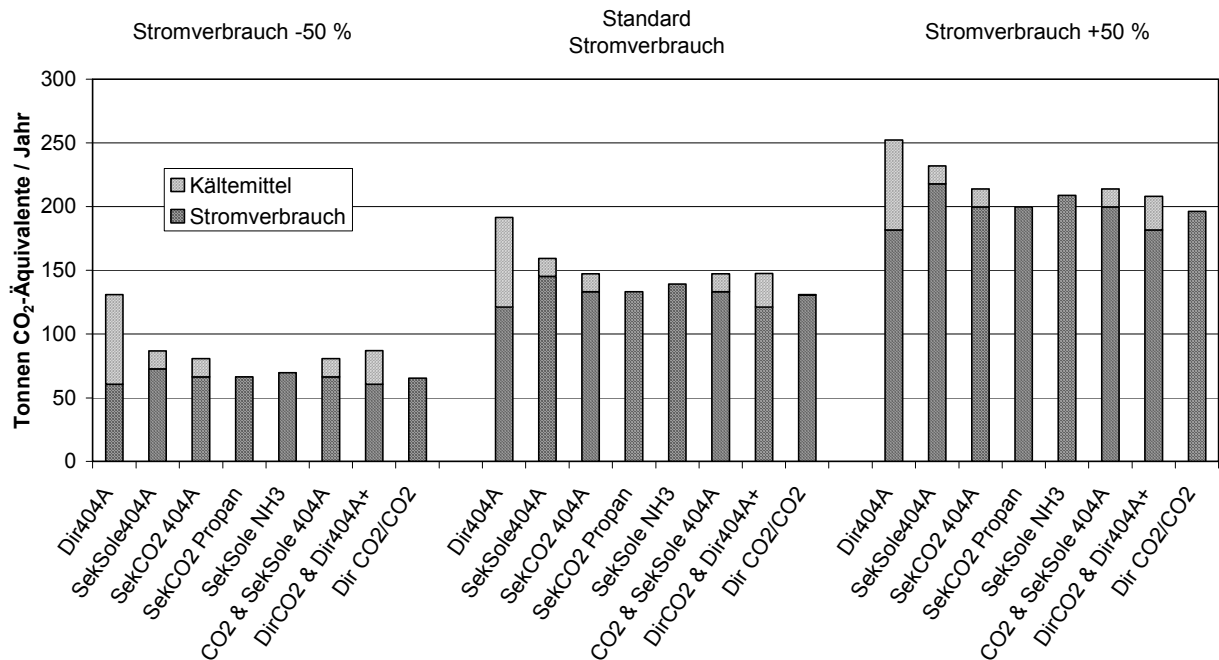


Abbildung 40 Einfluss des spezifischen Stromverbrauchs

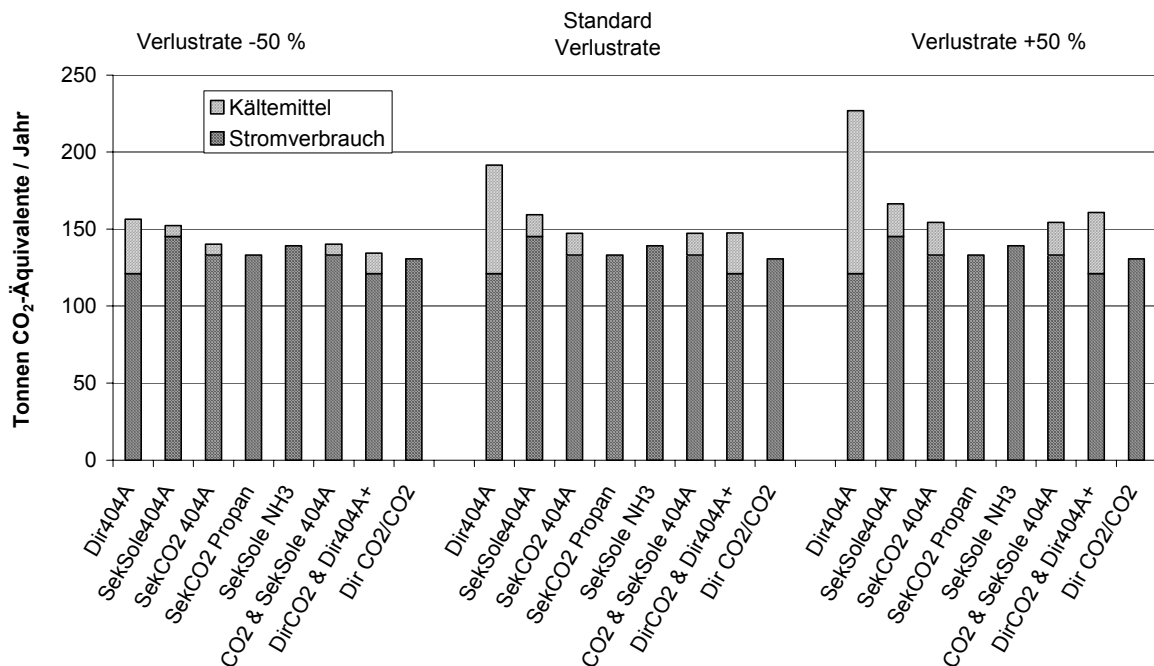


Abbildung 41 Einfluss der angenommenen Kältemittelverlustrate

Bei der zweiten Sensitivitätsanalyse (Abbildung 41) wurde untersucht, wie sich eine Veränderung der Kältemittelverlustrate auf die Reihung der einzelnen Technologien auswirkt. Es zeigt sich, dass eine Reduzierung der Emissionsraten bei allen Technologien um 50% eine ausgeprägt egalisierende Wirkung hat. Die 404A-Direktverdampfung liegt unter diesen Bedingungen besser als das 404A-Sekundärsystem und etwa gleichauf mit dem Sekundärsystem auf Basis von Ammoniak. Die Systeme, die CO₂ als Kälte­träger oder Kältemittel verwenden, haben immerhin noch einen Vorsprung von etwa 10-15% gegenüber der Referenztechnologie. Liegen die Emissionsraten aller Technologien 50% über dem Standardfall, so weisen die Alternativtechnologien zwischen 15 und 40% niedrigere Treibhausgasemissionen als die 404A-Direktverdampfung in der bereits bekannten Reihung auf. Eine vertiefte Betrachtung mit noch niedrigeren Verlustraten zeigt, dass erst unterhalb von 2% jährlicher Kältemittelverlustrate – also weit unterhalb heute realistischer Werte - die Referenzanlage in Bezug auf ihre Klimabilanz besser als die reine CO₂-Variante abschneidet.

In der dritten Sensitivitätsanalyse wurde untersucht, welchen Einfluss die Art der Stromversorgung auf das Emissionsprofil der verschiedenen Technologien hat (Abbildung 42). Eine stärker kohlenstoffhaltige Elektrizitätswirtschaft hat analog zu den in der Sensitivitätsanalyse 1 untersuchten erhöhten Stromverbräuchen eine egalisierende Wirkung auf die Reihung der Technologien - auf hohem Niveau. Dagegen zeigt sich für rein regenerativ erzeugten Strom (wie annähernd in der Schweiz oder Norwegen der Fall), dass die Emissionsniveaus der verschiedenen Technologien starke Unterschiede aufweisen – allerdings auf niedrigem absolutem Niveau. Es sollte nicht vergessen werden, dass in Deutschland eine Stromwirtschaft auf regenerativer Basis starker Anreize zum Stromsparen bedürfen wird und damit die am wenigsten energieeffizienten Alternativtechnologien vor zusätzliche Herausforderungen stellen dürfte.

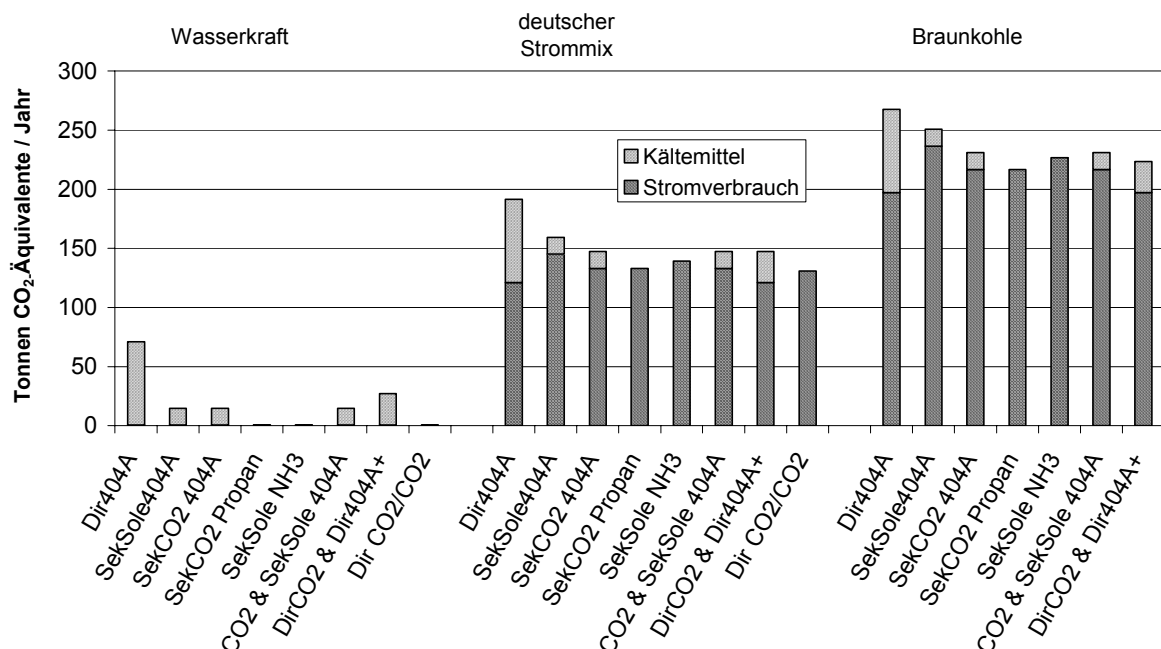


Abbildung 42 Einfluss des Energieträgers der Stromerzeugung auf das Abschneiden der Technologien

6.8 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass

- eine Anzahl von technologischen Alternativen existiert, die in Bezug auf ihre Klimabilanz zur Referenzanlage mit H-FKW-404A wesentliche Vorteile aufweisen,
- dabei emissionsseitig und wirtschaftlich Systeme mit CO₂ als Kälte­träger und/oder Kältemittel in der Tieftemperaturkälte die derzeit attraktivsten Alternativen zur reinen 404A-Direktverdampfung darstellen,
- erst bei heute nicht erreichbaren Kältemittellemissionsraten im unteren einstelligen Prozentbereich die Treibhausgasbilanz der 404A-Direktverdampfung vergleichbar mit der der günstigsten H-FKW-freien alternativen Systeme wird,
- neben einer vergleichbaren technischen Zuverlässigkeit niedrige spezifische Energieverbräuche eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz von Sekundärsystemen sind,
- die Nutzungsphase und die Entsorgung die Emissionsbilanz des gesamten Lebensweges mit zusammen mehr als 99,5% dominiert und die mit dem Energieverbrauch bei der Herstellung von Komponenten und Fluiden verbundenen Emissionen unbedeutend bleiben,
- die Treibhausbilanz von H-FKW-Lösungen im Vergleich zu Alternativtechnologien schlechter wird, je weniger kohlenstoffintensiv die deutsche Elektrizitätswirtschaft langfristig wird,
- die Emissionsreduktionspotenziale der oben untersuchten Alternativtechnologien in einen Bereich von 10-30% (0.3-1.0 MT CO₂-Äquivalente pro Jahr) der gesamten direkten und indirekten Emissionen der Verbundgewerbekälte in Deutschland fallen,
- die zugehörigen Vermeidungskosten bei 20 € pro Tonne CO₂ Äquivalent für kombinierte CO₂/404A-Direktverdampfer beginnen und z.B. für 404A-Sekundärsole-Systeme bis auf über 200 € pro Tonne CO₂ Äquivalent ansteigen,
- der Kontrolle bzw. der Senkung der Investitions- und Betriebskosten beim Übergang von der Kleinserie zur Serienproduktion eine Schlüsselrolle für die Akzeptanz der Alternativtechnologien im Markt zukommt,
- selbst innerhalb relativ homogener und gut überwachter Ensembles von Lebensmittelmärkten Abweichungen der spezifischen Energieverbräuche von über 100% vorkommen, nicht zuletzt weil Energieverbräuche für Kühlanwendungen in Supermärkten von zahlreichen wirtschaftlichen wie technischen Faktoren abhängig sind, wobei die Wahl des Kältemittels dabei nicht von ausschlaggebender Bedeutung ist, und
- im Einzelhandel Energieverbräuche und Kältemittelverluste der Gewerbekälte im Gegensatz zu Investitionskosten eine für Entscheidungsträger oft noch vergleichsweise geringe wirtschaftliche Relevanz besitzen, was bei der Wahl der politischen Instrumente zu ihrer Beeinflussung berücksichtigt werden sollte.

Nach Öko-Recherche (1999) finden H-FKW (vor allem 404A und 134a) potenziell in folgenden kälte- und klimatechnischen Applikationen Verwendung:

- Haus-Wärmepumpen
- Gewerbekälte
- Großkälte u. Großklima
- Mittlere Industriekälte

- Mittlere Klimaanlage
- Raumklimageräte
- Kleingeräte Ind./Gewerbe
- Transportkälte
- Mobile Klimaanlage

Die direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse aus dem Bereich der Verbundkälteanlagen in Supermärkten auf andere Anwendungen im Kälte- und Klimabereich ist in nur begrenztem Umfang gegeben, da die jeweiligen Bedingungen zu erforderlicher Kälteleistung, der Dezentralität des Kältebedarfs, Energieverbräuchen, Baugrößen, Leckageraten und Sicherheitsauflagen zum Teil sehr stark zwischen den Anwendungen variieren. Eine dezidierte Betrachtung der jeweiligen Anwendungen analog zu der in diesem Kapitel durchgeführten ist daher angezeigt. Supermarktverbundkälteanlagen sind dabei aber im Spektrum der Anwendungen für den Einsatz von alternativen Kältemitteln aufgrund ihrer Größe, Dezentralität und Nähe zum Endverbraucher besonders herausfordernd.

7 Zusammenfassende Bewertung und Diskussion

In diesem Kapitel wird zunächst basierend auf den zuvor zusammengetragenen und diskutierten Informationen unter Nutzung der in Kapitel 2 abgeleiteten Bewertungsmethodik eine zusammenfassende Bewertung der stoffintrinsischen Eigenschaften der fluorierten Treibhausgase und ihrer natürlichen Ersatzstoffe vorgenommen. Anschließend wird eine vergleichende Bewertung des Einsatzes der fluorierten Treibhausgase und ihrer natürlichen Ersatzstoffe in den zuvor untersuchten Anwendungsbeispielen nach relevanten Wirkungskategorien durchgeführt. Im Anschluss an eine zusammenfassenden Diskussion der Befunde und ihrer Übertragbarkeit werden zentrale offene Fragen aufgeführt und in ihrer Bedeutung erörtert. Das Kapitel schließt mit einem Abschnitt „Zusammenfassung und Ausblick“, in dem die politischen Implikationen der Studie diskutiert werden.

7.1 Bewertungsmatrix für stoffintrinsische Eigenschaften

Bei der Einstufung der einzelnen Stoffe in den einzelnen Kategorien wurde eine Klassifizierung gemäß den Kriterien in Abschnitt 2.4 verwendet. Diese basiert auf dem im Rahmen der Substitutionspflicht des Gefahrstoffrechts angewendeten „Spaltenmodell“ der Technischen Richtlinie Gefahrstoffe (vgl. auch Kapitel 2) und einer den Wertebereich abdeckenden quantitativen Spreizung wie in Tabelle 35 wiedergegeben.

Tabelle 35 Übersicht der Einstufungskriterien für die einzelnen Kategorien

Kategorie	Inputdaten	Einheit	Unter- grenze „mittel“	Unter- grenze „hoch“	Unter- grenze „sehr hoch“
Brand- & Explosionsgefahr	R-Sätze	-	Gemäß Spaltenmodell		
akute Humantoxizität	R-Sätze	-	Gemäß Spaltenmodell		
chronische Humantoxizität	R-Sätze	-	Gemäß Spaltenmodell		
Umwelttoxizität	R-Sätze	-	Gemäß Spaltenmodell		
Persistenz	Atmosphärische Lebensdauer	Tage	100	1000	10000
Bioakkumulationsfähigkeit	Verteilungskoeffizient Oktanol / Wasser	Log K _{ow}	1	3	5
Klima	Global Warming Potential (100 Jahre)	Kg CO ₂ Äquiv.	1	33	1000
Eutrophierung	Eutrophierungspotenzial	Kg Phosphat Äquiv.	0,005	0,05	0,5
Versauerung	Versauerungspotenzial	Kg SO ₂ Äquiv.	0,01	0,1	1
Ozonbildung	Ozonbildungspotenzial	Kg Ethylen Äquiv.	0,1	1	10
Ozonabbau	Ozone Depletion potential	Kg FCKW-11 Äquiv.	0,01	0,1	1,0

Es ergeben sich damit die sogenannten Bewertungsmatrizen wie in Tabelle 36 und Tabelle 37 wiedergegeben. Sie verdichten die in diesem Bericht zusammengetragenen Informationen in ein fünfstufiges Klassifikationssystem für 15 stoffspezifische Kategorien und machen die Profile einzelner Substanzen oder Substanzklassen relativ leicht erkennbar. Im folgenden sind die Hauptergebnisse wiedergegeben:

1. In der Kategorie „Brand- & Explosionsrisiken“ ergibt sich kein klares Bild. Etliche fluoriierte Treibhausgase erlangen hier die Einstufung „gering“ andere dagegen „hoch“. Bei den alternativen Substanzen erlangt lediglich CO₂ die Einstufung „gering“.

2. Hinsichtlich der gut untersuchten fluoriierten Treibhausgase legen wir zu Grunde, dass diese gemäß heutigem Kenntnisstand nur geringe human- und ökotoxische Wirkpotenziale aufweisen²⁴. Eine Ausnahme stellt NF₃ mit einer mittleren akuten Humantoxizität dar. Bei den Alternativen zu den fluoriierten Substanzen fallen insbesondere Ammoniak und n-Pentan durch ihre Einstufungen bei der akuten Humantoxizität und der Umwelttoxizität auf.

3. Hinsichtlich der abiotischen Wirkpotenziale sind die fluoriierten Treibhausgase als gering problematisch in Hinblick auf ihr Euthrophierungs-, und Ozonzerstörungspotenzial einzuschätzen, was außer für Ammoniak auch für alle Alternativen gilt. Beim Ozonbildungspotenzial weisen die fluoriierten Treibhausgase eine geringe bis mittlere - allerdings bei H-FKW-152a hohe - Problematik auf, während die Alternativen - abgesehen von Ammoniak und Kohlendioxid – hier durch die Einstufung „sehr hoch“ auffallen. In der Kategorie Versauerung erhalten alle fluoriierten Treibhausgase wegen der Azidität ihrer Abbauprodukte die Einstufung „hoch“ und „sehr hoch“, was bei den alternativen Substanzen nur für Ammoniak zutrifft.

4. Als problematisch sind die fluoriierten Treibhausgase wegen ihrer hohen spezifischen Klimawirksamkeit einzustufen, während die Alternativen hier durchweg eine geringe bis mittlere Einstufung erhalten.

5. Die fluoriierten Treibhausgase weisen entsprechend unseres derzeitigen Kenntnisstandes ein in der Regel mittleres Bioakkumulationspotenzial auf und sind in dieser Hinsicht als vergleichsweise unproblematisch einzuschätzen.

6. Die fluoriierten Treibhausgase weisen dagegen durchgehend eine hohe bzw. sehr hohe Persistenz auf, die aus Gründen der klassischen Gefahrenabwehr alleine meist als nicht ausreichend relevant angesehen wird, solange sie nicht in Kombination mit Bioakkumulierbarkeit und toxischen Eigenschaften auftritt. Dies ist im Falle der hier betrachteten fluoriierten Substanzen jedoch nicht der Fall. Die Emission von persistenten Stoffen in die Umwelt widerspricht jedoch den Grundsätzen der Vorsorge und der Nachhaltigkeit, insbesondere wenn sie in Kombination mit der Eigenschaft Bioakkumulierbarkeit oder hoher Mobilität auftritt. Die Substanzklasse der Fluorkohlenstoffe und das Schwefelhexafluorid mit einer Lebensdauer von vielen tausend oder gar zehntausend Jahren bedürfen in einem anderen Rahmen einer separaten Betrachtung.

²⁴ Eine Beurteilung der Wirksamkeit als endokrine Disruptoren erfolgt im Rahmen der gesetzlichen Chemikalieneinstufung nicht, da dort bisher keine Testmethode festgelegt ist.

Tabelle 36 Bewertungsmatrix – Teil I

Wirkungs- kategorien	Brand- & Explosionsgefahr	Humantoxizität		Umweltgefährdung		
Unterkategorien:		akute Toxizität	chronische Toxizität	Umwelttoxizität	Persistenz	Bioakkumu- lationsfähigkeit
CF ₄	gering	gering	gering	gering*	sehr hoch	mittel*
C ₂ F ₆	gering	gering	gering	gering*	sehr hoch	mittel*
SF ₆	gering	gering	gering	gering*	sehr hoch	mittel
NF ₃	hoch	mittel	gering	gering	sehr hoch	mittel*
H-FKW-134a	gering	gering	gering	gering	hoch	mittel
H-FKW-365mfc	hoch	gering	gering	gering	hoch	mittel
H-FKW-245fa	gering	gering	gering	gering	hoch	mittel
H-FKW-143a	hoch	gering	gering	gering	hoch	mittel
H-FKW-227ea	gering	gering	gering	gering	hoch	mittel
H-FKW-152a	hoch	gering	gering	gering	mittel	mittel
H-FKW-32	hoch	gering	gering	gering	hoch	hoch
H-FKW-125	gering	gering	gering	gering	hoch	mittel
H-FKW-43-10mee	gering	gering	gering	gering	hoch	mittel*
Kohlendioxid	gering	gering	gering	gering	sehr hoch	mittel*
Ammoniak	mittel	hoch	gering	sehr hoch	gering	gering*
n-Pentan	sehr hoch	gering	gering	hoch	gering	mittel*
cyclo-Pentan	hoch	gering	gering	mittel	gering	mittel*
Propan	sehr hoch	gering	gering	gering	gering	mittel
n-Butan	sehr hoch	gering	gering	gering	gering	mittel

* Es lagen für diese Substanz keine expliziten Daten vor - durch Analogieschluss von verwandten Substanzen gewonnen.

Tabelle 37 Bewertungsmatrix – Teil II

Wirkungs-kategorien	Klima	Eutrophierung	Versauerung	Ozonbildung	Ozonabbau
CF ₄	sehr hoch	gering*	sehr hoch*	gering*	gering*
C ₂ F ₆	sehr hoch	gering*	sehr hoch*	gering*	gering*
SF ₆	sehr hoch	gering*	sehr hoch*	gering*	gering*
NF ₃	sehr hoch	gering*	sehr hoch*	gering*	gering*
H-FKW-134a	sehr hoch	gering*	hoch	mittel	gering
H-FKW-365mfc	sehr hoch	gering*	sehr hoch*	mittel*	gering
H-FKW-245fa	sehr hoch	gering*	sehr hoch*	mittel*	gering
H-FKW-143a	sehr hoch	gering*	sehr hoch*	gering	gering
H-FKW-227ea	sehr hoch	gering*	sehr hoch*	gering	gering
H-FKW-152a	hoch	gering*	hoch	hoch	gering
H-FKW-32	sehr hoch	gering*	sehr hoch	mittel	gering
H-FKW-125	sehr hoch	gering*	sehr hoch	gering*	gering
H-FKW-43-10mee	sehr hoch	gering*	sehr hoch*	mittel*	gering
Kohlendioxid	mittel	gering*	gering*	gering*	gering*
Ammoniak	gering	hoch	sehr hoch	gering*	gering*
n-Pentan	mittel	gering*	gering*	sehr hoch	gering*
cyclo-Pentan	mittel	gering*	gering*	sehr hoch	gering*
Propan	mittel	gering*	gering*	sehr hoch	gering*
n-Butan	mittel	gering*	gering*	sehr hoch	gering*

* Es lagen für diese Substanz keine expliziten Daten vor - durch Analogieschluss von verwandten Substanzen abgeschätzt

Die vorangehende Bewertung fußt auf der Verfügbarkeit belastbarer Daten zur Stoffbewertung. Die H-FKW sind zum größten Teil relativ gut hinsichtlich ihrer Gefahrenpotenziale untersucht. Fallen sie im Sinne des Chemikalienrechts unter die Anmeldepflicht für Neustoffe, haben sie eine umfassende Prüfung ihrer stoffintrinsic Eigenschaften durchlaufen (wie z.B. H-FKW-365mfc, -245fa oder -43-10mee) und konnten hinsichtlich der auf dieser Grundlage einschätzbaren Gefahrenpotenziale beurteilt werden. Nicht untersucht werden bisher in diesem Rahmen z.B. Wirkungen als endokrine Disruptoren. Ein Teil der als Altstoffe geltenden H-FKW wurde im Rahmen von nationalen oder internationalen Aktivitäten zur Chemikalienbewertung untersucht und wird von den Autoren ebenfalls als zufriedenstellend bewertbar eingestuft. Nur eine kleine Anzahl fluorierter Treibhausgasen mit eingeschränkter kommerzieller Relevanz ist als Altstoff unzulänglich charakterisiert.

7.2 Zusammenfassung: stoffintrinsic Eigenschaften

H-FKW sind als neue Stoffklasse für breit gefächerte Anwendungen mit potenziell sehr hohen Produktionsmengen und damit Emissionsmengen in der Diskussion. Die Persistenz der H-FKW in Verbindung mit ihrer Flüchtigkeit und den potenziell sehr großen Mengen bringt die Möglichkeit einer langfristigen, weiträumigen Anreicherung xenobiotischer Stoffe in großen Mengen in der Senke Atmosphäre mit sich. Eine Rückholbarkeit von Stoffen aus der Atmosphäre ist nicht möglich. Die Erfahrungen der Vergangenheit zeigen, dass grundsätzlich die Entdeckung bisher unbekannter schädlicher Wirkungen und Wechselwirkungen von Chemikalien nicht ausgeschlossen ist oder nicht vorhersehbare negative Einflüsse auf die komplexen natürlichen Systeme auftreten können.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die H-FKW hinsichtlich der human- und ökotoxischen Eigenschaften nach dem derzeitigen Stand des Wissens keinen oder nur geringen Anlass zur Besorgnis geben. Einschränkungen gelten hier wegen der für Altstoffe bestehenden Unsicherheiten, insbesondere sollte hier beachtet werden, dass das toxikologische und das Umweltverhalten einzelner H-FKW stark von deren Schwestersubstanzen abweichen kann.

Dem steht jedoch die Eigenschaft Klimawirksamkeit gegenüber. Hier muss für die einzelnen Anwendungsfälle geprüft werden, wieweit ein Beitrag zum Treibhauseffekt gegeben ist. Persistenz in Kombination mit hoher Mobilität in der Atmosphäre und den potenziell großen Mengen stellt ein weiteres globales Risikopotenzial dar. Aus Vorsorgegründen sollten wegen der Persistenz in Kombination mit hoher Mobilität und den potenziell großen Verwendungsmengen Anwendungen vermieden werden, bei denen es zu Emissionen in die Atmosphäre kommt.

7.3 Bewertung in den Anwendungsbeispielen

Ausgehend von den Einstufungen der Bewertungsmatrix in Tabelle 36 wurden unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Kapitel 5 und 6 Einstufungen der anwendungsspezifischen Risikopotenziale für die betrachteten H-FKW und die Alternativsubstanzen vorgenommen. Berücksichtigt wurden hierbei nur solche Wirkungskategorien, in denen mindestens einer der betrachteten Stoffe als mittel, hoch oder sehr hoch eingestuft wurde. Wie in Kapitel 4 dargestellt, wurde auf die vertiefte Betrachtung und Bewertung der Wirkungskategorien Versauerungspotenzial und Ozonbildungspotenzial verzichtet.

Eine differenzierte Betrachtung der stoffbezogenen Wirkungen in den Vorketten erfolgte in dieser Studie nicht. Somit bleiben öko-, humantoxische und sicherheitsbezogene Risiken, die im Rahmen der Herstellung der Substanzen durchaus relevant sein können, unbewertet – Stichworte sind hier Chlorchemie, Erdölraffinerie und Ammoniaksynthese.

7.3.1 Anwendungsbeispiele PU-Hartschaum

7.3.1.1 Anwendungsmuster

PU-Dämmplatten sind hinsichtlich der Treibmittel als halb-offene Anwendungen aufzufassen, die kleinteilig und diffus in Gebäuden und KÜhlfahrzeugen eingesetzt werden. Wie in Kapitel 5 dargestellt, kommt es während der Herstellung und der Montage zu Verlusten in der Größenordnung von 8 % (Dachdämmung) und 11 % (KÜhlfahrzeuge) des Treibmittels. Während der Nutzung wird bei Platten für die Dachdämmung von jährlichen Verlusten von 0,2 % und bei KÜhlfahrzeugen von 0,1 % ausgegangen. Die Emission des nach einer durchschnittlich anzunehmenden Lebensdauer von 50 Jahren für Dachdämmplatten und 18 Jahren für KÜhlfahrzeuge im Produkt verbleibenden Anteils von 82 % bzw. 87 % kann bei kontrolliertem Rückbau ohne Zerkleinerung und mit geeigneter Entsorgung (thermische Verwertung) zu einem Großteil vermieden werden. Diese geregelten Entsorgungswege sind zur Zeit hierfür noch nicht etabliert.

Die Begrenzung der Emissionen in der Herstellungs- und Nutzungsphase ist weitgehend zuverlässig, da von Seiten der Hersteller schon aus Kostengründen eine Vermeidung der Emissionen angestrebt wird und durch die Überwachung der Produkte sichergestellt wird. Solche Überwachungen sehen im Rahmen der bauaufsichtlichen Anforderungen an die Porendichtigkeit bei Dachdämmplatten (DIBt 2002) und der vorgeschriebenen Prüfung der Dämmqualität bei KÜhlfahrzeugen (s. Abschnitt 5.3) Mindestleistungen hinsichtlich der Geschlossenzelligkeit vor. Für die Entsorgungsphase ist in der Praxis davon auszugehen, dass keine oder nur eine partielle Rückhaltung der Treibmittel erfolgt. In Abschnitt 5.3 wurde gezeigt, dass bei KÜhlfahrzeugen derzeit von einer vollständigen Emission der Treibmittel ausgegangen werden muss. Im Fall der Dachdämmung gibt es derzeit keine spezifischen Anforderungen an einen zerstörungsfreien Rückbau von Dämmstoffen, die klimawirksame Treibmittel enthalten, und keine Szenarien, die sich mit der Frage nach ausreichenden Entsorgungskapazitäten und differenzierten Entsorgungsstrategien für die in Zukunft anfallenden Volumina an geschäumten Dämmstoffen befassen. Produktverantwortlichkeiten oder Haftungspflichten erstrecken sich (indirekt) über die Anforderungen an die Dämmleistung zwar bis in die Nutzungsphase hinein, in der Entsorgungsphase greifen sie hinsichtlich der Rückhaltung von klimawirksamen Gasen nicht.

7.3.1.2 Brand- und Explosionsrisiken

Hinsichtlich der Brand- und Explosionsrisiken sind während der Herstellungsphase im Rahmen des anlagenbezogenen Rechts entsprechende Sicherheitsstandards eingeführt und umgesetzt.²⁵ Um im Falle der Dämmplatten den bauaufsichtlichen Brandschutzanforderungen zu genügen, werden in der Nutzungsphase dem zur Dachdämmung bestimmten PU-

²⁵ Ausführungen zu dem komplexen Regelwerk im Rahmen des Umwelt- und des Arbeitsschutzes finden sich z.B. in (TAA 2003):

Hartschaum Flammschutzmittel hinzugefügt (s. Abschnitt 5.2). Die in Deutschland im Rahmen des Bauordnungsrechtes und des anlagenbezogenen Rechts geltende Sicherheitsstandards zum Brandschutz sind von hohem Niveau, so dass hier sowohl für pentan- als auch für H-FKW 365mfc-geschäumte Dachdämmplatten in der Herstellungsphase von einem kontrollierbaren und in der Nutzungsphase einem vernachlässigbaren Risiko auszugehen ist. In Hinblick auf Brand- und Explosionsrisiken erfolgt daher eine Einstufung von H-FKW 365mfc und c-Pentan als gering und von n-Pentan als mittel.

7.3.1.3 Akute Ökotoxizität

Die sehr hohe akute Ökotoxizität von n-Pentan beruht auf der Giftigkeit für Wasserorganismen, die mittlere von c-Pentan auf der Schädlichkeit für Wasserorganismen. In Deutschland sind im Rahmen des anlagenbezogenen Rechts und des Wasserrechts ausreichende Maßnahmen zum Schutz vor schädlichen Emissionen in Gewässern vorgesehen und umgesetzt, weshalb die Risiken während der Herstellungsphase somit bei Einhaltung entsprechender Vorkehrungen im akzeptablen Bereich liegen. Eine akute Gefährdung von Gewässern durch Pentan in der Nutzungsphase ist auszuschließen, da die hier auftretenden diffusen gasförmigen Emissionen in Verbindung mit der mittleren Persistenz kaum zu relevanten Konzentrationen in Gewässern führen können. Es erfolgt somit eine Einstufung des anwendungsbezogenen Risikos als gering.

Der leicht höhere Anteil von Flammschutzmitteln in pentangeschäumten Dachdämmplatten kann gegenüber der H-FKW-Anwendung zu potenziell leicht erhöhten toxische Belastungen führen. Für das hier noch häufig eingesetzte Flammschutzmittel Trichlorpropylphosphat ist nach Öko-Recherche (2001) wegen der ungeklärter kanzerogener Wirkungen die Substitution anzustreben.

7.3.1.4 Persistenz

Da für keine der betrachteten Substanzen eine Kombination von hoher oder sehr hoher Persistenz mit hoher oder sehr hoher Bioakkumulierbarkeit und Toxizität vorliegt, ist im Sinne der Gefahrenabwehr für keine der Substanzen ein unmittelbares human- oder ökotoxikologisch begründetes Risiko durch Persistenz gegeben. Im Sinne der Vorsorge und der Nachhaltigkeit ist die Emission persistenter Stoffe in die Umwelt jedoch zu vermeiden, insbesondere wenn dies mit einer langfristigen Akkumulation verbunden ist, da Eintragsraten die Abbauraten übersteigen. Wegen der für Dämmstoffe zur Dachdämmung und in Kühlfahrzeugen mittel- und langfristig zu befürchtenden hohen Emissionsraten bei der Entsorgung wird das Risiko durch die Persistenz der Treibmittel hier als hoch eingestuft.

7.3.1.5 Bioakkumulierbarkeit

H-FKW-365mfc und Pentan zeichnen sich durch eine mittlere Bioakkumulationsfähigkeit aus. Da H-FKW-365mfc eine hohe Persistenz hat, wird das Risiko durch die Bioakkumulationsfähigkeit anwendungsspezifisch als mittel eingestuft. Wegen der geringen Persistenz wird die Bioakkumulierbarkeit von n- und c-Pentan auch anwendungsspezifisch als gering eingestuft.

7.3.1.6 Treibhauseffekt

Im Fall der Dachdämmplatten liegen die klimawirksamen Gesamtemissionen der H-FKW-365mfc-geschäumten Dämmstoffe in allen Szenarien über denen der pentan-geschäumten Dämmplatten. Im Standardszenario liegen die klimawirksamen Emissionen der H-FKW-365mfc-geschäumten Dachdämmplatten 63 % über denen der pentan-geschäumten. Auch unter Annahme einer in der Praxis kaum realisierbaren vollständigen Rückhaltung der klimawirksamen Treibmittel in der Entsorgungsphase durch eine lückenlose Entsorgungslogistik und Überwachung liegen die klimawirksamen Gesamtemissionen der H-FKW-365mfc-geschäumten Dachdämmplatten über denen der pentan-geschäumten. Zu betonen ist, dass dies auch gilt, wenn aus technischen Gründen eine Begrenzung der Plattendicke gegeben ist.

Aus der Sicht des Klimaschutzes ist die Verwendung von H-FKW-365mfc-geschäumten Dachdämmplatten von gravierendem Nachteil. Es erfolgt daher eine Einstufung des anwendungsspezifischen Risikos als sehr hoch. Bei den Kühlfahrzeugen liegen die klimawirksamen Gesamtemissionen der H-FKW-365mfc-Variante im hier bilanzierten Standardfall um 11 % über denen der pentan-geschäumten Variante.

Auch im Fall der Kühlfahrzeuge ist die Verwendung von H-FKW-365mfc-geschäumten Dämmstoffen gegenüber der Verwendung von Pentan von Nachteil für den Klimaschutz. Da der relative Mehrbeitrag maßvoller als bei der Dachdämmung ausfällt, erfolgt eine Einstufung des anwendungsspezifischen Risikos nicht als sehr hoch, aber doch als hoch.

7.3.1.7 Zusammenfassung

Tabelle 38 fasst die anwendungsspezifischen Risikopotentiale zusammen. In der Herstellungsphase der PU-Hartschäume ergeben sich bei der Verwendung von H-FKW als Treibmittel Vorteile durch niedrigere Sicherheitsanforderungen hinsichtlich des Brandschutzes und des Gewässerschutzes. Bei einer Betrachtung des gesamten Lebenswegs der Dämmstoffe stehen dem Nachteile durch das schlechtere Abschneiden bei der Treibhausbilanz und durch den Beitrag zur Akkumulierung persistenter Xenobiotika in der Atmosphäre gegenüber.

Als zukunftsorientierte Lösung ist der Einsatz von H-FKW-365mfc als Treibmittel in PU-Hartschaum zur Dämmung von Dächern und Kühlfahrzeugen daher nicht geeignet.

Tabelle 38 - Zusammenfassung der Risikopotentiale in den Anwendungsfällen PU-Hartschaum

	365mfc	n-Pentan	c-Pentan
Brand- und Explosionsrisiken	gering	mittel	gering
Akute Ökotoxizität	vernachlässigbar	gering	gering
Persistenz	hoch	gering	gering
Bioakkumulierbarkeit	mittel	gering	gering
Klima	sehr hoch ¹ , hoch ²	mittel	mittel

¹ Anwendungsfeld PU-Hartschaum

² Anwendungsfeld Kühlfahrzeuge

7.3.2 Anwendungsbeispiel Supermarktkühlung

7.3.2.1 Anwendungsmuster

Supermarktkühlungen werden hinsichtlich der Kältemittel als halboffene Anwendungen aufgefasst, da die Anlagen zwar diffus verteilt eingesetzt werden, aber wegen des bestimmungsgemäß gewerblichen Einsatzes von geschultem Fachpersonal - also keinen Privatkonsumenten - installiert, gewartet und entsorgt werden müssen²⁶. Kälteanlagen unterliegen Regelungen zu Dichtigkeit, Arbeitsschutz, Betriebssicherheit und Entsorgung. In Abhängigkeit von den intrinsischen Eigenschaften der eingesetzten Kältemittel und der eingesetzten Füllgewichte sind unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich, Bau, Aufstellung, Betrieb und Prüfungen einzuhalten. Zu beachten ist die Berufsgenossenschaftliche Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit „Kälteanlagen, Wärmepumpen und Kühleinrichtungen“ (BGV D 4 1997), welche die weiteren relevanten Vorschriften und technischen Regeln in Bezug nimmt. Von Bedeutung für Kälteanlagen in Supermärkten sind DIN 8975 Teil 11 (1999), - TRB 801 Ziff. 14 (2002), die Druckgeräteverordnung (2002), die Betriebssicherheitsverordnung (2002) und DIN EN 378 Teil 1-4 (2003), die im November 2003 in einer überarbeiteten Entwurfsfassung erscheint.

Neben Risiken, die sich aus dem bestimmungsgemäßen Gebrauch nach dem Stand der Technik und des Regelungsstandes ergeben, z.B. durch betriebsübliche Verlustraten, können beim Betrieb von Anlagen auch Fragen nach dem Stand der Einhaltung der Regelungen oder nach der Häufigkeit und der Schwere von Störfällen von Interesse sein, insbesondere in Hinblick auf den Schutz von Personen und der unmittelbar angrenzenden Umwelt. Daten zu Vollzugsdefiziten oder zu Störfällen von Kälteanlagen in Supermärkten liegen nicht vor, da es für diese Art von Anlagen keine Berichtspflichten gibt und ein Teil der hier betrachteten Anlagen derzeit keine Marktrelevanz hat. Vom Schweizer Bundesamt für Energie (BfE) wurde eine Risikoanalyse zu Kälteanlagen in Supermärkten mit den Kältemitteln Ammoniak und Propan veröffentlicht (Wolfer et al. 1999), die auch mögliche Störfälle einbezieht und deren Ergebnisse hier berücksichtigt wurden. Eine Vertiefung von Aspekten der Betriebssicherheit erfolgte im Rahmen dieser Studie nicht, da dies über die hier vorgegebene Fragestellung hinausgegangen wäre.

Es wird für die hier durchgeführte Bewertung davon ausgegangen, dass das umfassende existierende Regelwerk ein ausreichendes Sicherheitsniveau gewährleistet.

7.3.2.2 Brand- und Explosionsrisiken

Da H-FKW-404A und CO₂ als nicht brennbar eingestuft sind, können Brand- und Explosionsrisiken als vernachlässigbar eingestuft werden.

Den Risiken, die sich beim Betrieb von Kälteanlagen mit brennbaren Kältemitteln ergeben, wird in den oben angeführten Regelungen Rechnung getragen. Neben den hohen technischen Anforderungen an Bau, Wartung und Entsorgung von Kälteanlagen, ist zusätzliche Sicherheit dadurch gegeben, dass die zulässigen Kältemittelmengen - in Abhängigkeit von ihrer Brennbarkeit und der Art des Aufstellungsraum - begrenzt sind. Somit ist von einem angemessenen Sicherheitsstandard für die Verwendung von Ammoniak und Propan als Kältemittel auszugehen.

²⁶ Zur Einteilung der Nutzungsmuster siehe Abschnitt 2.4

Hinsichtlich des Risikopotentials unter Berücksichtigung möglicher Störfälle kommt das BfE zu dem Ergebnis, dass das Risikopotential für zentrale²⁷ Kälteanlagen mit Ammoniak und Propan im akzeptablen Bereich liegen. Bei dezentralen²⁸ mit Propan betriebenen Anlagen wird allerdings ein Verletzungsrisiko durch Brand für möglich gehalten und diese liegen somit im Übergangsbereich zu nicht akzeptablen Risiken. Es wird aber festgestellt, dass letztlich eine Risikoanalyse auf der Basis einer besseren Datengrundlage erforderlich ist um eine Übertragbarkeit auf unterschiedliche Anlagentypen und Aufstellungsräume zu ermöglichen und die Aussagekraft der Analysen zu stärken (Wolfer et al., 1999). Festzuhalten ist, dass für die Erreichung eines mit nicht brennbaren Kältemitteln vergleichbaren Standards ein höherer Sicherheitsaufwand erforderlich ist.

Ausgehend von dem durch das existierende Regelwerk gegebene Sicherheitsniveau erfolgt sowohl für Ammoniak mit seiner mittleren Entzündlichkeit als auch für Propan mit seiner hohen Entzündlichkeit eine Einstufung als „geringes Risikopotential“. Das hochentzündliche Propan hier nicht auf Verdacht in eine höhere Risikokategorie einzustufen, begründet sich auch damit, dass die vom BfE angenommene dezentrale, mit Propan betriebene Kälteanlage derzeit keine Marktrelevanz hat.

Hinzuzufügen ist, dass die Einstufung der Nutzungsmuster des hochentzündlichen Propan mit einer gewissen Unsicherheit behaftet bleibt, solange keine vertieften Risikoanalysen vorliegen.

7.3.2.3 Akute Toxizität

Wegen der in Abschnitt 4.3 beschriebenen geringen stoffintrinsischen akuten Humantoxizität von H-FKW-404A, Propan und CO₂ können die Risiken in der hier beschriebenen Nutzung als vernachlässigbar betrachtet werden.

Bei ammoniakbetriebenen Anlagen gilt analog was unter Abschnitt 7.3.2.3 zu Brand- und Explosionsrisiken ausgeführt wurde. Der hohen akuten Toxizität des Ammoniak wird in den oben angeführten Regelungen Rechnung getragen. Es ist von einem angemessenen Sicherheitsstandard auch hinsichtlich toxischer Wirkungen auszugehen, ein Risikoniveau, das dem nicht toxischer Kältemittel vergleichbar ist, erfordert allerdings einen höheren Sicherheitsaufwand.

Das BfE schätzt die Risiken für dezentrale Anlagen als akzeptabel ein, sieht allerdings auch hier für dezentrale mit Ammoniak betriebenen Kälteanlagen ein Verletzungsrisiko durch Ammoniakfreisetzung und somit ein Risiko im Übergangsbereich zu nicht akzeptablen Risiken.

Da davon ausgegangen wird, dass das bestehende Regelwerk diese Risiken berücksichtigt, soll hier nicht ohne fundierte Begründung und ohne Berücksichtigung praxisnaher Anlagentypen und Aufstellungsbedingungen ein höheres Risiko angenommen werden. Es erfolgt somit eine Einstufung ammoniakbetriebener Kälteanlagen als „geringes Risikopotential“.

²⁷ Als zentrale Anlage haben Wolfer et al. eine im abgetrennten Maschinenraum aufgestellte Kälteanlage mit einer Füllmenge von 20 kg Propan oder Ammoniak angenommen.

²⁸ Als dezentrale Anlage haben Wolfer et.al. eine im Publikumsraum aufgestellte Anlage mit einer Füllmenge von 0,2 kg Propan oder Ammoniak angenommen.

Zu betonen ist nochmals der Bedarf, die verbleibenden Unsicherheit durch vertiefte Risikoanalysen zu verringern. Als Indiz für die Notwendigkeit einer solchen vertieften Risikoanalyse wird auch gewertet, dass im Rahmen der meldepflichtigen Ereignisse nach § 19 Störfall-Verordnung der Anteil der Meldungen aus dem Bereich Kälteanlagen mit Ammoniak in der Größenordnung von 10% liegt (UBA 2003).

7.3.2.4 Akute Ökotoxizität

Für H-FKW-404A, Propan und CO₂ sind Risiken durch Ökotoxizität vernachlässigbar, da keine ökotoxischen Eigenschaften vorliegen.

Für das ökotoxische Ammoniak sind während der Herstellung und des Transports störfallbedingte Emissionen in die Gewässer nicht auszuschließen. In der Nutzungsphase dürfte dies angesichts der im Supermarktbereich üblichen Kältemittelmengen kaum relevant sein, da Emissionen durch Leckagen gasförmig auftreten. Selbst die Möglichkeit, dass Ammoniak durch seine hohe Verdampfungsenthalpie die unmittelbare Umgebung so abkühlt, dass es nach dem Entweichen längere Zeit flüssig vorliegt, sollte wegen der fehlenden Gewässernähe und der Abschottung zur Kanalisation nicht zu Gewässereinträgen führen.

Da in der vorliegenden Betrachtung der Schwerpunkt auf der Nutzungsphase liegt, kann das ökotoxische Risiko von Ammoniak trotz des intrinsischen Potentials als gering eingestuft werden.

7.3.2.5 Persistenz

Da auch hier für keine der Substanzen eine Kombination von hoher oder sehr hoher Persistenz mit hoher oder sehr hoher Bioakkumulierbarkeit und Toxizität vorliegt, ist im Sinne der Gefahrenabwehr für keine der Substanzen ein Risiko durch akute toxische Wirkungen gegeben. Im Sinne der Vorsorge und der Nachhaltigkeit ist die Emission persistenter Stoffe in die Umwelt jedoch zu vermeiden. Relevant sind hierbei die in den Anwendungen emittierten Substanzen und die auf Grund der Lebensdauer zu erwartenden akkumulierenden Mengen. Für natürlich vorkommende Stoffe wie CO₂ ist dabei relevant, ob die Emissionen zu einer Erhöhung der natürlichen Konzentrationen beitragen und ob der Stoff nicht ohnehin als Abfallstoff aus einem Verbrennungsprozess stammt.

Auf Grund der atmosphärischen Lebensdauer der Komponenten des H-FKW-404A-Gemisches, nämlich des H-FKW-125 von 29 Jahren, des H-FKW-134a von 14 Jahren und des H-FKW-143a von 52 Jahren bleibt die anwendungsspezifische Einstufung des Risikopotentials hoch. Gleichwohl bleibt zu unterscheiden, dass die in Kapitel 5 untersuchten H-FKW-404A-Systeme mit Sekundärkreislauf, mit nur ca. 1/5 der Kältemittlemissionen gegenüber dem Direktverdampfersystem, hinsichtlich des Eintrags von Xenobiotika besser abschneiden.

Die Emissionen von CO₂ als Kältemittel werden von den Emissionen aus den der Stromerzeugung vorgelagerten Verbrennungsprozessen dominiert. Da das hier untersuchte System mit CO₂ als Kältemittel im Vergleich zu anderen Systemen zu einer Minderung der CO₂-Emissionen beiträgt, wird ein geringes nutzungsspezifisches Risiko angesetzt.

7.3.2.6 Bioakkumulierbarkeit

H-FKW-404A und Propan zeichnen sich durch eine mittlere Bioakkumulierbarkeit aus. Da Propan nur eine kurze Lebensdauer hat, wird das anwendungsspezifische Risiko als gering eingestuft. Für H-FKW-404A wird das Risiko wegen des gleichzeitigen Vorliegens einer hohen Persistenz als mittel eingestuft. Zu unterscheiden ist hier wiederum zwischen den Direktverdampfern mit höheren Emissionen und Sekundärsystemen mit geringeren Mengen an Kältemittlemissionen, die auch in Hinsicht auf die Bioakkumulierbarkeit als vorteilhafter einzustufen sind. Für Ammoniak und CO₂ ist das von einer Bioakkumulierbarkeit ausgehende Risiko aufgrund ihrer Löslichkeitseigenschaften bzw. der Rolle im Kohlenstoffkreislauf vernachlässigbar.

7.3.2.7 Treibhauseffekt

Der Betrieb von Kälteanlagen ist wegen des damit verbundenen hohen Stromverbrauchs generell klimarelevant, solange der verwendete Strommix nicht ausschließlich mit erneuerbaren Energien erzeugt wird. Eine Einstufung kann nur relativ erfolgen. Es wird daher eine Einstufung vorgenommen, bei der die Technologie mit dem relativ geringsten Beitrag als mittel eingestuft wird (ca. 0-10 %), die mit ca. 10-20 % höheren Emissionen als hoch und die mit Mehremissionen über 20 % als sehr hoch. Auf der Basis der in Abbildung 38 dargestellten Ergebnisse fasst Tabelle 39 die Einstufung zusammen.

Tabelle 39 – Relative Emissionen CO₂-Äquivalente

System	Relative Emissionen CO ₂ -Äquivalente	Einstufung anwen- dungsbezogener Risiken
CO ₂ & CO ₂ überkrit.	100%	mittel
Propan + SekCO ₂	102 %	mittel
NH ₃ + SekSole	107 %	mittel
CO ₂ + SekSole 404A	113 %	hoch
404A + SekCO ₂	113 %	hoch
CO ₂ + 404A direkt	120%	hoch
404A SekSole	122 %	sehr hoch
404A Direktverdampfer	146 %	sehr hoch

7.3.2.8 Zusammenfassung

Die mit H-FKW-404A als Kältemittel betriebenen Systeme weisen Vorteile wegen eines geringeren erforderlichen Sicherheitsaufwandes hinsichtlich Brand- und Explosionsschutz, Gewässerschutz und Arbeitsschutz auf, insbesondere in der Herstellungsphase, in geringerem Maße auch in der Nutzungsphase. Bei der Betrachtung des gesamten Lebensweges stehen dem Nachteile durch eine höhere Klimawirksamkeit und durch den Beitrag zur Akkumulation von Xenobiotika in der Atmosphäre gegenüber. Tabelle 40 fasst die anwendungsspezifischen Risikopotentiale für die Supermarktkühlung zusammen. Zu Aspekten der Wirtschaftlichkeit sei auf die Ausführungen in der Zusammenfassung in Kapitel 6 und die abschließenden Betrachtungen in 7.5 verwiesen.

Tabelle 40 - Zusammenfassung der anwendungsspezifischen Risikopotentiale für die Supermarktkühlung

	404A	C₃H₈	NH₃	CO₂
Brand- und Explosionsrisiken	gering	gering	gering	vernachlässigbar
Akute Toxizität	vernachlässigbar	vernachlässigbar	gering	vernachlässigbar
Akute Ökotoxizität	gering	gering	gering	gering
Persistenz	hoch	gering	gering	gering
Bioakkumulierbarkeit	mittel	mittel	gering	gering
Klima	sehr hoch (hoch) ¹	mittel	gering	mittel

¹ In Abhängigkeit von den unterschiedlichen Emissionsraten der betrachteten Systeme

7.3.3 Anwendungsbeispiele: Gewichtung der Wirkungskategorien

Die im vorigen Abschnitt zu den Anwendungsbeispielen dargelegten Bewertungen der anwendungsspezifischen Risikopotentiale zeigen, dass H-FKW hinsichtlich Brennbarkeit und akuter Umwelttoxizität Vorteile haben, bei Betrachtung des gesamten Lebensweges jedoch durchweg Nachteile hinsichtlich des Treibhauseffekts und hinsichtlich des Beitrags zur Akkumulierung persistenter Stoffe in der Atmosphäre zeigen.

Ob und welche der hier relevanten Risiken als schwerwiegender einzuschätzen sind und ob und wie weit die jeweiligen potenziellen Risiken durch entsprechende Risikomanagementmaßnahmen minimierbar sind, wird im Folgenden anhand der in Kapitel 2 entwickelten Kriterien diskutiert.

7.3.3.1 Brand- und Explosionsrisiken

Brände und Explosionen sind von ausschließlich lokaler Relevanz, Schäden treten ohne zeitliche Verzögerung auf. Verursachung und Wirkung stehen in enger zeitlicher und räumlicher Nähe und sind eindeutig bestimmbar. Verursacher sind von den Wirkungen unmittelbar betroffen. Es gibt ein über Jahrzehnte entwickeltes und in der Gesellschaft verankertes Wissen zu Wirkungen und wirksamen Risikomanagementmaßnahmen sowie ein enges Netz von Regelungen, die laufend weiterentwickelt werden und irreversible Schäden durch Todesfälle und schwere Verletzungen auf eine kleine Eintrittswahrscheinlichkeit reduzieren. Materielle Schäden sind reversibel.

7.3.3.2 Akute Toxizität

Humantoxische Risiken sind hier durch Störfälle in zentralen oder dezentralen mit Ammoniak betriebenen Kälteanlagen gegeben. Die Risiken sind lokal begrenzt. Ursache und Wirkung sind eindeutig bestimmbar. Leichtere Verletzungen sind reversibel. Irreversible Schäden durch schwere Verletzungen und Todesfälle können durch ein über Jahrzehnte entwickeltes Regelwerk und entsprechenden Umgang mit den Anlagen auf eine geringe Fallzahl reduziert werden. Verursacher sind von den Schäden direkt betroffen oder zumindest haftbar.

7.3.3.3 Akute Ökotoxizität

Hier zur Diskussion stehen akute toxische Wirkungen auf Wasserorganismen im Fall von punktuellen Störfällen mit Emissionen in die Kanalisation oder in Oberflächengewässer. Die Reichweite solcher Störfälle ist lokal bis regional, da ein Abbau und eine Verdünnung erfolgt. Die Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkungen sind bekannt. Die Wirkung ist nach Abklingen der Einleitung reversibel, da sich aquatische Populationen in der Regel weitgehend erholen können. Der Verursacher ist nicht unmittelbar betroffen, allerdings ist er im Fall der Schädigung anderer haftbar und wegen des punktuellen Charakters der in Frage stehenden Störfälle zumindest identifizierbar.

7.3.3.4 Treibhauseffekt

Klimawirkungen sind von globaler Relevanz. Schäden treten mit zeitlich verzögerter Wirkung auf. Es wird von einem katastrophalen Ausmaß der Wirkungen ausgegangen, das alle Ebenen betrifft. Die gesamte Weltbevölkerung ist über Generationen hinweg betroffen, unabhängig davon, wie groß ihr Anteil an der Verursachung war. Schäden bzw. die Konzentrationen sind nicht oder nur über lange Zeiträume hinweg reversibel. Die einzig mögliche Risikomanagementmaßnahme ist die vorbeugende Vermeidung der Emission von klimawirksamen Gasen. Die Erreichung der bisher hierzu international und national gesteckten Ziele ist noch nicht gesichert und mit hohem gesamtgesellschaftlichen Aufwand verbunden.

7.3.3.5 Persistenz

Die Persistenz in Verbindung mit der hohen Reichweite ergibt eine globale Relevanz. Das Ausmaß von Schäden ist unbekannt. Es kann von Null bis hin zu folgeschweren Ausmaßen reichen. Sowenig nach heutigem Stand des Wissens negative Wirkungen nachgewiesen sind, sowenig sind sie auszuschließen. Die Emission großer Mengen H-FKW in die Umwelt kommt also einem Großexperiment mit ungewissem Ausgang in globalem Maßstab gleich. Eine Rückholung von Substanzen aus der Atmosphäre ist nicht möglich. Werden negative Wirkungen erkennbar, müssen Substitutionsanstrengungen unternommen werden, die bei einer breiten Verankerung von Technologien mit hohem Aufwand für alle Beteiligten verbunden sind. Nach heutigem Erfahrungsstand können technische Lösungen, die zur Akkumulierung persistenter Stoffe in der Umwelt führen, nicht als zukunftsweisend aufgefasst werden.

7.3.3.6 Zusammenfassung der Bewertung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in den Risikokategorien Brand- und Explosionsgefahr und Toxizität Risiken der akuten Gefährdung von Mensch (Arbeitnehmer und Nutzer) und aquatischer Umwelt bestehen. Art der Gefährdung und der eindeutige Zusammenhang von Ursache und Wirkung ermöglichen wirksame Risikomanagementmaßnahmen. Trotz dieser Risikomanagementmaßnahmen können Restrisiken verbleiben, die eine Substitution durch Substanzen, die diese Risiken a priori ausschließen, wünschens- und erstrebenswert machen. Eine Verlagerung zu Risiken im Bereich der Klimawirkung und der Persistenz kann jedoch nicht gerechtfertigt werden, da diese Risiken in ihrem potenziellem Gesamtausmaß und der Schwierigkeit, wirksame Risikomanagementmaßnahmen einzusetzen, als schwerwiegender zu gewichten sind. De facto bringt die Verwendung von H-FKW anstelle von Pentan, Propan, Ammoniak und CO₂ eine Entlastung vor allem der Hersteller von Risikomanagementmaßnahmen hinsichtlich des Brand- und Explosionsschutzes und der Anlagensicherheit zur Vermeidung von toxischen Gewässeremissionen und Gefährdung von Personen mit sich. Dem gegenüber steht eine Verlagerung auf zeitlich und räumlich weitreichendere Risiken mit schwerwiegenderen Folgen, die diffus und verursacherfern auftreten und gesamtgesellschaftlich getragen werden müssen.

Im Vergleich zu den hier betrachteten Alternativen ist die Verwendung von H-FKW-365mfc als Treibmittel in Dämmstoffen zur Dämmung von Dächern und Kühlefahrzeugen und von H-FKW-404A als Kältemittel in Supermarktkühlungen somit nicht nur die ungünstigere Variante hinsichtlich der über den gesamten Lebensweg auftretenden Umweltbelastungen, sie widerspricht auch einer gerechten Verteilung von Nutzen und Lasten und dem Verursacherprinzip.

7.3.4 Übertragbarkeit

Im Rahmen der drei in dieser Studie untersuchten Anwendungsbeispiele konnte gezeigt werden, dass eine uneingeschränkte Handhabung von fluorierten Treibhausgasen zu ökologisch nachteiligen Situationen führen würde. Es wurde aber deutlich, dass die Spezifika der jeweiligen Anwendungen auch bei verwandten Anwendungen teils stark von einander abweichen können. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Anwendungsfälle sollte daher nur mit großer Umsicht erfolgen.

7.4 Offene Fragen

Die in der Vergangenheit durchgeführten Untersuchungen zum Umweltverhalten fluorierter Treibhausgase stellten eine vergleichsweise solide Ausgangsposition für dieses Forschungsvorhaben dar. Dennoch muss eine Anzahl von relevanten offenen Fragen für weitere Forschungsaktivitäten empfohlen werden.

Zusätzlich zu den umweltgefährdenden Auswirkungen, die von der Emission aller Treibhausgase ausgehen, ergibt sich im Rahmen der Umwelthandlungsziele einer vorsorgenden Stoffpolitik im Zusammenhang mit H-FKW ein Handlungsbedarf aufgrund der Kombination der Eigenschaften Persistenz und hohe Mobilität der H-FKW sowie der Persistenz, Mobilität und Bioakkumulierbarkeit des Abbauproduktes Trifluoressigsäure (TFA).

Sehr deutlich wurde auch, dass das toxikologische und Umweltverhalten einzelner H-FKW recht stark von deren Schwestersubstanzen abweichen kann. Es darf daher bei der Einführung neuer H-FKW keinesfalls von einer weitgehenden Identität der Eigenschaften ausgegangen werden. Die vergleichsweise sorgfältigen Prüfungen einiger neuerer Substanzen von kommerziell großer Relevanz sollte auf weniger gut untersuchte fluoriierte Altstoffe ausgedehnt werden. Dies sollte andererseits natürlich auch und gerade für im Massenmarkt neue Fluororganika wie Hydro- bzw. Perfluorether, -amine, -ketone oder -nitrate (vgl. z. B. (Tapscott et al. (1996), WMO (1999)) gelten.

Der Verbleib der H-FKW am Ende der Lebensdauer der untersuchten Produkte stellt sich als ein Schlüsselfaktor in den Treibhausbilanzen heraus. Erst in der Folge einer durchgreifenden Erhöhung der Entsorgungssicherheit werden H-FKW mit ihren halogenfreien Alternativen in dieser Hinsicht konkurrieren können.

Die Emission von Neben- und Zwischenprodukten aus der Herstellung fluorierter Treibhausgase konnte mangels belastbarer Daten im Rahmen dieser Studie nur ansatzweise untersucht und bewertet werden. Es scheint sich aber zu erhärten, dass hier mit der Emission von diversen chlorierten und fluorierten Substanzen neben deren Klimarelevanz weiterer Untersuchungsbedarf besteht.

7.5 Zusammenfassung und Ausblick

Die hauptsächlich als Ersatzstoffe für die ozonschädigenden FCKW und H-FCKW produzierten fluorierten Treibhausgase (insbesondere H-FKW) werden bei Fortschreibung gegenwärtiger Trends im Laufe der nächsten 20 Jahre auf ein jährliches Marktvolumen von weltweit bis zu etwa 500.000 Tonnen kommen. Hauptanwendungen werden dabei vor allem die stationäre Kälte- und Klimatechnik, Autoklimaanlagen und die Herstellung von Hartschäumen sein, in denen sich über die nächsten zwei Dekaden voraussichtlich ein Bestand von etwa vier Millionen Tonnen fluorierter Treibhausgase aufbaut. Für das Jahr 2020 wird ein jährliches Emissionsniveau von etwa 300.000 Tonnen prognostiziert. Aufgrund ihrer hohen Flüchtigkeit und Wasserunlöslichkeit verbleiben einmal emittierte fluoriierte Treibhausgase bis zu ihrem Abbau fast vollständig in der Atmosphäre.

Diese Studie kommt zu dem Ergebnis, dass als stoffintrinsic Eigenschaften der untersuchten fluorierten Substanzen insbesondere ihre Klimawirksamkeit und ihre Persistenz negativ hervorstechen. Auf der Positivseite wurden ihre i.d.R. gering ausgeprägte direkte Toxizität und ihr spezifisch sehr niedriger Beitrag zur Bildung von Photo-smog identifiziert.

Der Sachverhalt, dass sich toxische Trifluoressigsäure (TFA) als Abbauprodukt einiger wichtiger H-FKW in Gewässern anreichern und damit zu einem ökologischen Problem würde, hat in der Vergangenheit eine große Rolle in der Diskussion um H-FKW gespielt. In dieser Studie wurde aufgezeigt, dass neuere Forschungsergebnisse darauf hinweisen, dass andere industrielle, aber wohl auch natürliche Quellen von TFA bereits heute Konzentrationen von TFA in der Umwelt aufgebaut haben, die die Werte aus einem zukünftigen Abbau von H-FKW stark überschreiten.

Mit Hilfe der differenzierten Betrachtung der stoffintrinsic Eigenschaften im Zusammenspiel mit der anwendungsbezogenen Gewichtung der Wirkkategorien und der Erstellung einer Klimabilanz unter Berücksichtigung des Lebensweges konnte gezeigt

werden, dass am ehesten ein fallweises Vorgehen geeignet ist, um die Entscheidung für oder wider den Einsatz von fluorierten Treibhausgasen zu treffen. In den untersuchten Anwendungsbeispielen konnte gezeigt werden, dass der Einsatz fluorierter Treibhausgase zu einer für das Klima deutlich nachteiligen Situation führt.

Im Rahmen von zwei in dieser Studie untersuchten Anwendungsbeispielen (PU-Dachdämmplatt und PU-Dämmung im Kühlaufleger) aber auch anderer einschlägiger Analysen (z.B. Harnisch und Schwarz, 2003) zeigt sich, dass bereits heute in vielen früher den FCKW angestammten Anwendungen für fluorierte Treibhausgase die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu neuen Alternativtechnologien nicht oder nur marginal gegeben ist. Es wird aber etwa am Beispiel der Supermarkt-Verbundkälteanlage deutlich, dass es ebenso weiterhin Anwendungsfälle gibt, in denen fluorierte Treibhausgase gegenüber Alternativsubstanzen deutliche Wirtschaftlichkeitsvorteile aufweisen. Weitere wichtige Einzelergebnisse der Untersuchungen der Anwendungsbeispiele sind in den jeweiligen Zusammenfassungen in den Abschnitten 5.2.6, 5.3.5 und 6.8 zu finden.

Beim Vergleich und der Bewertung technischer Systeme, in denen fluorierte Treibhausgase und entsprechende Alternativstoffe zur Anwendung kommen, zeigt sich eine erhebliche Dynamik, mit der sich technische Eigenschaften und Kostendaten verändern und sich das Portfolio verfügbarer Technologien erweitert.

Bis zu einem gewissen Grad werden heutige Kostennachteile des Einsatzes alternativer Substanzen in gesamtwirtschaftlicher Sicht durch ihre niedrigen spezifischen Vermeidungskosten kompensiert. Die Reduktionen leisten dann einen vergleichsweise kostengünstigen Beitrag zum Klimaschutz (ein oft verwendetes Kriterium ist <20 € pro Tonne vermiedenes CO₂-Äquivalent). Bisweilen sind Alternativtechnologien mit höheren Vermeidungskosten auch unter Einbeziehung dieses Kriteriums zur Zeit allerdings noch zu kostspielig, als dass ihre Verwendung volkswirtschaftlich allein aus Gründen des Klimaschutzes heute angezeigt wäre. Andere ökologische Erwägungen wie etwa die Vermeidung der von persistenten Stoffen ausgehenden Risiken können in Grenzfällen den Ausschlag für eine vom Gesetzgeber eingeleitete Substitution geben.

Jenseits der gebotenen Kosteneffizienz von Klimaschutzmaßnahmen sollte nach Ansicht der Autoren nicht unberücksichtigt bleiben, dass durch einen heute induzierten Systemwechsel später erhebliche Kosten vermieden werden können, wenn die Kosten für die Entwicklung, spätere Anpassung und schließlich folgende Substitution einer nicht langfristig einsetzbaren Technik von Anfang an vermieden werden.

Die Autoren der Studie fordern, dass der Gesetzgeber ist in dieser Situation vorausschauend die Entwicklung, Erprobung und Verbreitung neuer klimafreundlicher Technologien durch einschlägige Maßnahmenpakete fördert, ohne dabei Anwendern und Konsumenten unvermeidbare zusätzliche Risiken oder Kosten aufzubürden. Dies könnte z.B. innerhalb des durch die Empfehlungen zur Förderung des Einsatzes alternativer Substanzen im Abschlussbericht des Europäischen Klimaschutzprogramms (EC, 2001) abgesteckten Rahmens erfolgen. Aufgrund der fundamentalen Probleme bei der zeitnahen und anlagenspezifischen Erfassung der Emissionen fluorierter Treibhausgase (vgl. z.B. Schwarz und Harnisch (2003) im Falle von Autoklimaanlagen), werden nach Ansicht der Autoren marktbasierende Instrumente wie der Emissionshandel für fluorierte Treibhausgase ungeeignet bleiben.

Ordnungsrechtliche Maßnahmen scheinen hier nach Ansicht der Verfasser am ehesten geeignet, um die aus Gründen des Klimaschutzes aber auch der stoffpolitischen Nachhaltigkeit und Vorsorge angezeigte stufenweise Substitution fluorierter Treibhausgase zu ermöglichen und zu beschleunigen. Sie würden nicht zuletzt im internationalen Kontext dazu beitragen, die von der Wirtschaft oft eingeforderte klare Orientierung in Hinblick auf die Richtung der weiteren technologischen Entwicklung zu geben.

8 Danksagung

Die Autoren danken den folgenden Personen für ihre inhaltliche Unterstützung des Projektes und die Bereitstellung von vertiefenden Hintergrundinformationen:

Dr. Rolf Albach (Bayer AG, Geschäftsbereich Polyurethane, Leverkusen)
Werner Backes (Euram GmbH / Thermo King Niederlassung, Griesheim)
Prof. Dr. Karlheinz Ballschmiter (Universität Ulm - Bereich für Analytische Chemie und Umweltchemie)
Prof. Dr. R.E. Banks (University of Manchester)
Dr. Manfred Burke (Frigoblock Grosskopf GmbH, Essen)
Dr. Anton Demharter (Puren-Schaumstoff GmbH Kunststoffwerke, Überlingen)
Prof. Dr. Wolfgang Dekant (Universität Würzburg - Lehrstuhl für Toxikologie)
Dr. Thomas Ehret (Paul Bauder GmbH & Co KG, Stuttgart)
Dr. James Franklin (Solvay - Belgien)
Werner Friedrich (Kögel Fahrzeugwerke AG, Werk Karlsdorf)
Siegfried Haaf (Linde AG, Köln)
Walter Häge (Kögel Fahrzeugwerke AG, Ulm)
Rainer Hensiek (Elastogran GmbH, Lemförde)
Brent Hoare (Greenhill Technology Association, Australien)
Michel Höll (Lamberet-Kühlfahrzeuge GmbH, Ulm)
Michael Holthaus (Carrier Transicold, Georgsmarienhütte)
Prof. Dr. Michael Kauffeld (FH Karlsruhe)
Dr. Andreas Kicherer (BASF - Ludwigshafen)
Peter Krämer (Euram GmbH / Thermo King Niederlassung, Griesheim)
Dr. Guiseppe Malinverno (Ausimont - Italien)
Dr. Archie McCulloch (Marbury Consultants - Großbritannien)
Wolfgang Piech (Metro Group Buying GmbH, Düsseldorf)
Johannes Pierick (Schmitz Cargobull AG, Horstmar)
Ewald Preisegger (Solvay Fluor und Derivate GmbH, Hannover)
Rolf Schmidt (Rewe, Köln)
Bernhard Schrempf (ATP-Prüfstelle bei TÜV Süddeutschland, München)
Prof. Dr. Paul Sharrat (University of Manchester, Großbritannien)
Dr. Michael Sonnekalb (Konvekta AG, Schwalmstadt)
Dr. Rainer Welte (Bayer AG, Geschäftsbereich Polyurethane, Leverkusen)
Dr. Lothar Zipfel (Solvay Fluor und Derivate GmbH, Hannover)

Besonderer Dank für ihre Unterstützung während der Durchführung des Projektes gilt Frau Katja Schwaab und Herrn Dr. Wolfgang Plehn von Umweltbundesamt in Berlin. Unser Dank gilt darüber hinaus allen weiteren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Umweltbundesamtes, die zu dieser Studie mit zahlreichen Anregungen und Hintergrundmaterialien beigetragen haben.

Das Projekt wird mit Mitteln des Deutschen Bundesministerium für Umwelt, Reaktorsicherheit und Naturschutz (Geschäftszeichen: UBA Z 1.6 – 50 422/195) finanziert.

9 Abkürzungsverzeichnis

AFEAS	Alternative Fluorocarbon Environmental Acceptability Study
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff (vollhalogeniert)
DKV	Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein
DifB	Deutsches Institut für Bautechnik
GWP	Global Warming Potential
H-FKW	Fluorkohlenwasserstoff
H-FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff (teilhalogeniert)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
NK	Normalkühlung
ODP	Ozone Depletion Potential
PU	Polyurethan
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
TFA	Trifluoressigsäure bzw. engl. trifluoroacetic acid
TK	Tiefkühlung
TRGS	Technische Richtlinie für Gefahrstoffe
VOC	Volatile Organic Compounds
WLG	Wärmeleitfähigkeitsgruppe

10 Literatur

- AFEAS; Workshop on the environmental fate of trifluoroacetic acid; Proceedings of the Workshop 3-4 March 1994, Miami Beach, Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study (AFEAS), Washington, 1994.
- AFEAS, Production and sales report 1996; Alternative Fluorocarbon Environmental Acceptability Study, Science & Policy Associates, Inc., Washington, 1998.
- AFEAS; Final Report prepared for AFEAS on the Development of a Global Emission Function for Blowing Agents used in Closed Cell Foam, submitted by CALEB Management Services, Bristol (UK), September 2000.
- Ahlers J., Substitution and precaution –Both on principle?; Conference Proceedings - The Role of Precaution in chemicals policy; Diplomatic Academy Vienna, ISBN 3-902021-29-2, November 2001.
- Albach, Dr. Rolf, Bayer AG, Geschäftsbereich Polyurethane, Leverkusen, pers. Mitt. März 2002/Juli 2003.
- Allmann, R. and S. Koritnig; Fluorine; in Handbook of Geochemistry, edited by K.H. Wedepohl, Vol II-1, Springer Verlag, Berlin, 1978.
- ATP-Prüfstelle bei TÜV Süddeutschland, München, pers. Mitt. 6.3. 2002;
- Ballschmiter, K.; Persistent, ecotoxic, and bioaccumulative compounds and their possible environmental effects; Pure & Appl. Chem., Vol. 68, pp. 1771-1780, 1996,
- Banks, R.E. und P.N. Sharrat; Environmental impacts of the manufacture of HFC-134a; University of Manchester, November 1996.
- Banks, R.E., E.K. Clarke, E.P. Johnson, P.N. Sharrat; Comparative life-cycle assessment of the impacts associated with fire-extinguishants HFC-227ea and IG-541; Trans IchemE, 76, Part B, 1998.
- Barnard W.R. und D.K. Nordstrom; Fluoride in precipitation-II. Implications for the geochemical cycling of fluorine; *Atm Env*, Vol 16, No.1, pp 105-111, 1982
- Bayer AG: Herstellung von Polyurethan (PUR)-Hartschaumstoff. Autoren: Dr. Manfred Kapps, Siegfried Buschkamp, Geschäftsbereich Polyurethane, Strategisches Marketing Insulation, Leverkusen, Technische Information Nr. 12/2000.
- Bayer AG: Stand der europäischen Normung für PUR-Hartschaumstoffe im Bauwesen. Autor: Dr.-Ing. Robert Walter, Geschäftsbereich Polyurethane, Leverkusen, Technische Information Nr. 10/2001.
- Befragung KühltFahrzeugehersteller; Im Februar und März 2002 durchgeführte, im August 2003 aktualisierte, schriftliche und mündliche Befragung von zahlreichen Experten aus dem Sektor Bau, Ausstattung & Nutzung von KühltFahrzeugen:
- KühltFahrzeug-Anbieter: Schmitz Cargobull AG, Horstmar; Kögel Fahrzeugwerke AG, Ulm Donau; Ackermann Fahrzeugbau AG AG, Willisau; Vischer Karosseriebau GmbH, Stuttgart; LAMBERET-KühltFahrzeuge GmbH, Ulm Donau;
- Kälteaggregat-Anbieter: Große Kracht Josef GmbH & Co. KG Osnabrücker Kältebetrieb (Thermo King), Osnabrück; Thermo King Euram GmbH, Haan; Carrier Transicold, Georgsmarienhütte. FRIGOBLOCK Grosskopf GmbH, Essen. Konvekta AG, Schwalmstadt.
- Anwender: Kraftverkehr Nagel, Versmold; Spedition Baumann GmbH, Frankfurt am Main; Schöller Lebensmittel GmbH & Co. KG, Nürnberg (Fuhrpark).
- PU-Grundstoff-Anbieter: Bayer AG, Geschäftsbereich Polyurethane, Leverkusen; Elastogran GmbH (BASF-Gruppe), Lemförde.
- Anlagenbauer: Hennecke Maschinenfabrik GmbH, Sankt Augustin.
- Benesch, J.A. und M.S. Gustin ; Uptake of trifluoroacetate by Pinus ponderosa via atmospheric pathway; *Atm Env*, Vol 36 No.7, pp. 1233-1235, 2002.

- Benesch JA, Gustin MS, Cramer GR, Cahill TM; Investigation of effects of trifluoroacetate on vernal pool ecosystems; *Environ Toxicol Chem* Vol. 21 No. 3, pp. 640-647, 2002.
- Betriebssicherheitsverordnung; Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Bereitstellung von Arbeitsmitteln und deren Benutzung bei der Arbeit, über Sicherheit beim Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen und über die Organisation des betrieblichen Arbeitsschutzes (Betriebssicherheitsverordnung – BetrSichV)“ vom 27. September 2002 (BGBl. I S.3777)..
- BEWAG; Lebensmittelhandel – Kostensenkung durch effizienteren Energieansatz; BEWAG AG, Berlin, 1996.
- BGV DV; Norddeutsche Metall-Berufsgenossenschaft (Hrsg.): BG-Vorschrift Kälteanlagen, Wärmepumpen und Kühleinrichtungen, 1997.
- BMUJF; Energiebranchenkonzept Nr. 2 Lebensmitteleinzelhandel; Schriftenreihe des Österreichischen Bundesministeriums für Umwelt, Jugend und Familie (7/97), Wien, 1997
- Boutonnet, J.C., P. Bingham, D. Calamari, C. de Rooij, J. Franklin, T. Kawano, J.M. Libre, A. McCulloch, Malinverno, J.M. Odom, G.M. Rusch, K. Smythe, I. Sobolev, R. Thompson, J.M. Tiedje; *Hum. Ecol. Risk Assess.* 5 (1): 59-124,1999.
- Christoph, E.; Bilanzierung und Biomonitoring von Trifluoracetat und anderen Halogenacetaten; Dissertationsschrift, Universität Bayreuth, 2002
- Collins, M.A., G.M. Rusch, F. Sato, P.M. Hext, R.J. Millischer; 1,1,1,2-Tetrafluoroethane: repeat exposure inhalation toxicity study in the rat, developmental toxicity in the rabbit, and genotoxicity in vitro and in vivo; *Fudam. Appl. Toxicol.*, Vol. 25, 271-280, 1995.
- De Angelis, M. and M. Legrand; Origins and variations of fluoride in Greenland precipitation; *J Geophys Res* , Vol **99**, D1, pp 1157-1172, 1994.
- De Haes, U.; Towards a methodology for life cycle impact assessment; U. de Haes (ed.), SETAC-Europe, Brussels, September 1996.
- Dekant, W.; Toxicology of chlorofluorocarbon replacements; *Env. Health Perspectives*; Vol. 104, Suppl. 1, pp. 75-83, 1996.
- Demharter, A. (Puren-Schaumstoff GmbH Kunststoffwerke) Überlingen, pers. Mitt. Februar/März 2002
- DIBt; Bauregelliste A, Bauregelliste B, Bauregelliste C – Ausgabe 2002/1. Deutsches Institut für Bautechnik (Hrsg.) Berlin 2002.
- DIN EN 378 Teil 1-4: Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen - Teil 1: Grundlegende Anforderungen, Definitionen, Klassifikationen und Auswahlkriterien; Teil 2: Konstruktion, Herstellung, Prüfung, Kennzeichnung und Dokumentation; Teil 3: Aufstellungsort und Schutz von Personen; Teil 4: Betrieb, Instandhaltung, Instandsetzung und Rückgewinnung; Ausgabe:2003-10, Beuth, Berlin 2003.
- DIN 8975-11; Norm-Entwurf: Kälteanlagen und Wärmepumpen mit dem Kältemittel Ammoniak - (zusätzliche) Anforderungen, Ausgabe:1999-12, Beuth, Berlin 1999.
- Druckgeräteverordnung; Vierzehnte Verordnung zum Gerätesicherheitsgesetz (Druckgeräteverordnung -14. GSGV) (Artikel 3 der Verordnung vom 27. September 2002 (BGBl. S. 3777, 3806) BGBl. I S. 3777 vom 2. Oktober 2002.
- DKV; Energiebedarf für die technische Erzeugung von Kälte, Statusbericht des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins Nr. 22, Juni 2002.
- EC; Technical guidance document in support of Commission directive 93/67/EEC on risk assessment for new notified substances and Commission regulation (EC) No 1488/94 on risk assessment for existing substances; Luxembourg, 1996.
- EC; European Climate Change Programme – Long Report; European Commission, DG Environment, Juni 2001. <http://europa.eu.int/comm/environment/climat/eccp.htm>

- EEA 2001; Harremoës P. et al.; Late lessons from early warnings: the precautionary principle 1896-2000; European Environment Agency; Kopenhagen, 2001
- EGV 1999; Vertrag von Amsterdam zur Änderung des Vertrags über die Europäische Union, der Verträge zur Gründung der Europäischen Gemeinschaften, sowie einzelner damit zusammenhängender Rechtsakte, unterzeichnet in Amsterdam am 2. Oktober 1997 (Abl. C340 vom 10.11.1997)
- EHI, Handel aktuell 2001 – Struktur, Kennzahlen und Profile; Euro-Handelsinstitut, Köln, 2002
- EHI; Einrichtungskosten im Einzelhandel 2001; Euro-Handelsinstitut, Köln, 2002
- Ellis, D.A., S.A. Mabury, J.W. Martin, D.C.G. Muir; Thermolysis of fluoropolymers as a potential source of halogenated organic acids in the environment; *Nature*, Vol. 412, pp. 321-324, 2001.
- Ellis DA, Martin JW, Muir DCG, Mabury SA; The use of F-19 NMR and mass spectrometry for the elucidation of novel fluorinated acids and atmospheric fluoroacid precursors evolved in the thermolysis of fluoropolymers; *Analyst* Vol. 128 No. 6, pp. 756-764, 2003
- Emptage, M., J. Tabinowski, J.M. Odom; Effect of fluoroacetates on methanogenesis in samples from selected methanogenic environments; *Env. Sci. Tech.*, Vol. 31, pp. 732-734, 1997.
- EnEV; Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung (EnEV)), November 2001.
- Eurovent-Certification; Eurovent - Zertifizierungsprogramm für Verkaufskühlmöbel ; <http://www.eurovent-certification.com/Programmes/ProIndex.asp>; 2001
- Frank, H., A. Klein, D. Renschen; Environmental Trifluoroacetate; *Nature*, 382, p. 34, 1996.
- Frischknecht, R. Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel - Ökobilanzen von Wärmepumpen und Kälteanlagen; Schlußbericht, Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW), Bundesamt für Energie, Bern, 1999a.
- Frischknecht, R. Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel - Ökobilanzen von Wärmepumpen und Kälteanlagen; Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW), Anhang zum Schlußbericht, Bundesamt für Energie, Bern, 1999b.
- GefStoffV; Verordnung zum Schutz vor gefährlichen Stoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV) v. 15.1.1999 (BGBl. I S. 2233), zul. geändert am 20.7.2000 (BGBl. I S. 1076)
- Giroto, S., S. Minetto, P. Neksa; Commercial refrigeration System with CO₂ as refrigerant – experimental results; Proceedings of the 2003 International Congress of Refrigeration, Washington, August 2003.
- Haaf, S.; Ammoniak-Kälteanlage für Supermärkte; *Die Kälte & Klimatechnik*, Nr. 8, S. 520-533, 1998.
- Harnisch, J, I. Sue Wing, H.D. Jacoby, R.G. Prinn; Primary Aluminum Production: Climate Policy, Emissions and Costs; MIT-Joint Program on the Science and Policy of Global Change Report Series, Report No. 44, 1998. <http://web.mit.edu/globalchange/www/>
- Harnisch, J.; Reactive fluorine; in 'Reactive halogens in the atmosphere' edited by P. Fabian and O. Singh, Handbook of Environmental Chemistry, Springer-Verlag, Berlin, pp. 81-109, 1999.
- Harnisch, J. and C.A. Hendriks; Economic Evaluation of Emission Reductions of HFCs, PFCs and SF₆ in Europe; Special Report - Contribution to the study "Economic Evaluation of Sectoral Emission Reduction Objectives for Climate Change" on behalf of the Directorate General Environment of the Commission of the European Union, Prepared by Ecofys energy & environment; Cologne, April 2000. http://europa.eu.int/comm/environment/enveco/climate_change/emission_reductions.pdf

- Harnisch, J., M. Frische, R. Borchers, A. Eisenhauer, A. Jordan; Natural fluorinated organics in fluorite and rocks; *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 27, No. 13, pp. 1883-1886, 2000a.
- Harnisch, J., O. Stobbe, D. de Jager; Abatement of Emissions of Other Greenhouse Gases: "Engineered Chemicals"; by order of the International Energy Agency Greenhouse Gas R&D Programme; Cheltenham, February 2001.
- Harnisch, J. und W. Schwarz; Costs and the impact on emissions of potential regulatory framework for reducing emissions of hydrofluorocarbons, perfluorocarbons and sulphur hexafluoride; Im Auftrag der DG Umwelt der Europäischen Kommission, Brüssel, Februar 2003.
- Hayman, G.D., R.G. Derwent; Atmospheric chemical reactivity and ozone-forming potentials of potential CFC replacements; *Environ Sci Technol*, Vol 31, pp 327-336, 1997.
- Heinbokel, B.; CO₂ als Kälteträger und Kältemittel in der Supermarkt-Tiefkühlung; *KI Luft- und Kältetechnik*; Nr. 10, S. 484-488, 2001.
- Huey, L.G., D.R. Hanson, Lovejoy, E.R.; Atmospheric fate of CF₃OH 1: Gas phase thermal decomposition; *J Geophys Res*, Vol 100, D9, pp 18771-18774, 1995.
- ILT; Dichtheit von Kälteanlagen; Institut für Luft- und Kältetechnik; Dresden, 1999.
- IPCC; Climate Change - The IPCC Scientific Assessment; Intergovernmental Panel on Climate Change, World Meteorological Organization & United Nations Environmental Programme, Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC; Climate Change 1995 - The second IPCC Scientific Assessment; Intergovernmental Panel on Climate Change, World Meteorological Organization & United Nations Environmental Programme, Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC; Climate Change 2001 - The Third Assessment Report - Working Group 1, Cambridge, 2001.
- IPCC; IPCC/OECD/IEA Programme for National Greenhouse Gas Inventories, Good Practice in Inventory Preparation for Industrial Processes and the New Gases, Meeting Report Washington DC, United States, 26-28 January 1999, 2000.
- IPCS; Concise International Chemical Assessment Document No. 11: 1,1,1,2-Tetrafluoroethane; World Health Organisation, Geneva, 1998.
- Jordan, A. and H. Frank; Trifluoroacetate in the environment. evidence for sources other than HFC/HCFCs; *Environ. Sci. Technol.*, 33, pp. 522-527, 1999.
- March (1998): Opportunities to Minimise Emissions of HFCs from the European Union; Commissioned by Directorate General Enterprise of the European Commission; United Kingdom.
- Kanakidou, M., F.J. Dentener, P.J. Crutzen; A global three dimensional study of the fate of HCFCs and HFC-134a in the troposphere; *J Geophys Res*, Vol 100, D9, pp 18781-18801, 1995.
- Kannan, K., J. Koistinen, K. Beckmen, T. Evans, J.F. Gorzelany, K.J. Hansen, P.D. Jones, E. Helle, M. Nyman, J.P. Giesy; Accumulation of perfluorooctane sulfonate in marine mammals; *Env. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 8, pp. 1593-1598, 2001a.
- Kannan, K., J.C. Franson, W.W. Bowerman, K.J. Hansen, P.D. Jones, J.P. Giesy; Perfluorooctane sulfonate in fish-eating water birds including bald eagles and albatrosses; *Env. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 15, pp. 3065-3070, 2001b.
- Kauffeld, M., P. Bertelsen, T.M. Hansen, K.G. Christensen; CO₂-Anwendungen in Dänemark; *KI Luft- und Kältetechnik*, Nr. 1, S. 27-32, 2002.
- KBA (Kraftfahrt-Bundesamt), Flensburg, Zulassungen bzw. Anmeldungen von fabrikneuen Kraftomnibussen, Lastkraftwagen, Zugmaschinen, übrigen Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach dem zulässigen Gesamtgewicht im Jahr 2001 in Deutschland, in: VDA (Verband der Automobilindustrie) Hrsg, Tatsachen und Zahlen, 66. Folge 2002, Frankfurt/Main 2002.

- Kim, B.R., M.T. Suidan, T.J. Wallington, X.Du; Biodegradability of trifluoroacetic acid; *Env. Eng. Sci.*, Vol. 17 (6), pp. 337-342, 2000.
- Klein, A.; Halogenierte Essigsäuren in der Umwelt; Dissertationsschrift, Universität Bayreuth, Shaker-Verlag, 1997.
- Klinke; Klinke A., Renn O.; Prometheus Unbound Challenges of Risk Evaluation, Risk Classification and Risk Management, Working Paper; Akademie für Technikfolgenabschätzung No. 153/November 1999.
- Ko, M.K.W., N.D. Sze, J.M. Rodriguez, D.K. Weissenstein, C.W. Heisey, R.P. Wayne, P. Biggs, C.E. Canosa-Mas, H.W. Sidebottom, J. Treacy; CF₃ chemistry: potential implications for stratospheric ozone; *Geophys Res Lett*, Vol **21**, pp 101-104, 1994.
- KOM 2000; Mitteilung der Kommission - die Anwendbarkeit des Vorsorgeprinzips. KOM (2000)1 endgültig; Brüssel, 2.2.2000
- KOM 2001a; Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen zum sechsten Aktionsprogramm der Europäischen Gemeinschaft für die Umwelt; KOM(2001) 31 endgültig, Brüssel 24.1.2001
- KOM 2001b; Mitteilung der Kommission – Nachhaltige Entwicklung in Europa für eine bessere Welt: Strategie der Europäischen Union für die nachhaltige Entwicklung; KOM (2001) 264 endgültig; Brüssel, 15.5.2001
- KOM 2001c; Weissbuch – Strategie für eine zukünftige Chemikalienpolitik. KOM(2001) 88 endgültig; Brüssel, 27.2.2001
- KOM 2003; Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on certain fluorinated greenhouse gases, KOM(2003) 492, Brüssel 11.8.2003
- Kotamarthi, V.R., J.M. Rodriguez, M.K. Ko, T.K. Tromp, N.D. Sze; Trifluoroacetic acid from degradation of HCFCs and HFCs: a three dimensional modeling study; *J. Geophys. Res.*, Vol. 103, pp. 5747-5758, 1998.
- Krähling, H. und S. Kröm; HFC-365mfc as blowing – and insulation agent in polyurethane rigid foams for thermal insulation. Life Cycle Assessment accompanying application development and market positioning. Final report, Hanover (Germany), March 2000;
- Kroeze, C.: 'Fluorocarbons and SF₆' A report to the National Institute of Public Health and Environmental Protection of the Netherlands, The Netherlands, February 1995.
- Leisewitz, A. und W. Schwarz (Öko-Recherche): Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen zur Substitution umweltrelevanter Flammschutzmittel, Band II: Flammhemmende Ausrüstung ausgewählter Produkte – anwendungsbezogene Betrachtung: Stand der Technik, Trend, Alternativen, im Auftrag des Umweltbundesamts, Dezember 2000;
- Likens, G.E., S.L. Tartowski, T.W. Berger, D.G. Richey, C.T. Driscoll, H.G. Frank, A. Klein; Transport and fate of trifluoroacetate in upland forest and wetland ecosystems; *Proc. Natl. Akad. Sci. USA*, Vol. 94, pp. 4499-4503, 1997.
- Linde; Linde Refrigeration Engineering Phasing out CFCs and HCFCs in the food trade; Linde AG, 1997.
- Lloyd, S.C., D.M. Blackburn, P.M.D. Foster; Trifluoroethanol and its oxidative metabolites: comparison of in vivo and in vitro effects in rat testis; *Toxicol. Appl. Pharmacol.*, Vol. 92, 390-401, 1988.
- Lovejoy, E.R., L.G. Huey, D.R. Hanson; Atmospheric fate of CF₃OH 2: Heterogenous reaction; *J Geophys Res*, Vol **100**, D9, pp 18775-18780, 1995.
- Maiss, M. und C.A.M. Brenninkmeijer; Atmospheric SF₆, trends, sources and prospects. *Env. Sci. Tech.*, 32 (20) 3077-3086, 1998.
- March; Opportunities to Minimise Emissions of HFCs from the European Union; Commissioned by Directorate General Enterprise of the European Commission; United Kingdom, September 1998.

- March; UK Emissions of HFCs, PFCs, and SF₆ and Potential Emission Reduction Options; Commissioned by the Department of the Environment, Transport and the Regions, United Kingdom, January 1999.
- Martin, J.W., J. Franklin, M.L. Hanson, K.R. Solomon, S.A. Mabury, D.A. Ellis, D.C.G. Muir; Detection of chlorodifluoroacetic acid in precipitation: a possible product of fluorocarbon degradation; *Env. Sci. Tech.*, Vol. 34, pp. 274-281, 2000.
- McCulloch, A., P.M. Midgley, D.A. Fisher; Distribution of emissions of chlorofluoro-carbons (CFCs) 11, 12, 113, 114 and 115 among reporting and non-reporting countries in 1986; *Atm. Environ.*, 28, pp. 2567-2582, 1994.
- McCulloch, A.; CFC and Halon replacements in the environment; *J. Fluorine Chem.*, 100, pp. 163-173, 1999.
- McFarland, M., 2000: Applications and Emissions of Fluorocarbon Gases: Past, Present and Prospects for the Future. In: *Non-CO₂ greenhouse gases: scientific understanding, control and implementation*; pp. 65-82, Kluwer Publishers, 2000.
- Midgley, P. and A. McCulloch; Production, sales and emissions of halocarbons from industrial sources; in 'Reactive halogen compounds in the atmosphere' edited by P. Fabian and O. Singh, *Handbook of Environmental Chemistry*, pp. 155-190, Springer-Verlag, Berlin, 1999.
- Müller-Herold 2002; Quantitative Vorsorgebewertung neuer Chemikalien im Hinblick auf globale Gefährdungsszenarios; *GAIA* 11 no.1, pp 6-7, 2002
- NASA/NOAA/AFEAS; Proceedings of the workshop on the atmospheric degradation of HCFCs and HFCs (Boulder, 17-19 November 1993); NASA, NOAA and AFEAS, 1993.
- Nielsen, O.J., B.F. Scott, C. Spencer, T.J. Wallington, J.C. Ball; Trifluoroacetic acid in ancient freshwaters; *Atm. Env.*, Vol. 35, pp. 2799-2801, 2001.
- OECD; Organisation for Economic co-operation and development; *OECD Environmental Strategy for the first decade of the 21st century*; 2001
- Öko-Institut; Brohmann B. et.al.; Gutachten zur Erfassung und Systematisierung von Methoden zur Risikoabschätzung und -bewertung und der damit verbundenen Probleme Entwurf – Endbericht; Öko-Institut unveröffentlicht, 2001.
- Öko-Recherche; 'Aktuelle und künftige Emissionen treibhauswirksamer fluorierter Verbindungen in Deutschland', Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dezember, 1996.
- Öko-Recherche; 'Emissions and Reduction Potentials of Hydrofluorocarbons, Perfluorocarbons and Sulphur Hexafluoride in Germany'; A study commissioned by the German Environmental Protection Agency, Germany, October, 1999.
- Öko-Recherche; Leisewitz A. et.al.: Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen zur Substitution umweltrelevanter Flammenschutzmittel. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Berlin 2001.
- Öko-Recherche; „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), Im Auftrag des Umweltbundesamtes, März, 2003.
- OSPAR 2001; Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks; Konsolidierte Fassung des Übereinkommens von 1992, sowie der Erweiterung des Übereinkommens im Jahre 1998 um Anlage V und dazu gehörigem Anhang 3; Stand 15.8.2001; <http://www.bmu.de>
- Papasavva, S. und W.R. Moomaw, Life-cycle global warming impact of CFCs and CFC-substitutes for refrigeration; *J. Industr. Ecol.*, Vol. 1 (4), p. 71-79, 1998.
- Paul Bauder GmbH & Co KG (Th. Ehret), Stuttgart, pers. Mitt. Februar/März 2002;

- Puren-Schaumstoff GmbH Kunststoffwerke (M. Mattausch; A. Demharter), Überlingen, pers. Mitt. Februar/März 2002;
- Ravishankara, A.R., S. Solomon, A.A. Turnipseed, R.F. Warren; Atmospheric lifetimes of long-lived halogenated species; *Science*, **259**, S. 194-199, 1993.
- Ravishankara, A.R., A.A. Turnipseed, N.R. Jensen, S. Barone, M. Mills, C.J. Howard, S. Solomon; Do hydrofluorocarbons destroy stratospheric ozone?; *Science*, Vol **163**, pp 71-75, 1994.
- Rehbinder, E. und C. Schmieling; Öko-Bilanzen als Instrumente des Umweltrechtes; Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 2001.
- Reilly, J., R. Prinn, J. Harnisch, J. Fitzmaurice, H. Jacoby, D. Kicklighter, P. Stone, A. Sokolov, C. Wang; Multi-Gas Assessment of the Kyoto Protocol; *Nature*, **401**, pp. 549-555, 1999.
- Richtlinie 1996; RICHTLINIE 96/61/EG DES RATES vom 24. September 1996 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (*Amtsblatt Nr. L 257 vom 10/10/1996 S. 0026 – 0040*)
- Richter, S., K.-G. Steinhäuser, H. Fiedler; Globaler Vertrag zur Regelung von POPs: The Stockholm Convention; *Z. Umweltchem. Ökotox.*, **13** (1), pp. 39-44, 2001.
- Risikokommission; Neuordnung der Verfahren und Strukturen zur Risikobewertung und Standardsetzung im gesundheitlichen Umweltschutz der Bundesrepublik Deutschland. Erster Bericht über die Arbeit der Risikokommission. Im Auftrag des Bundesministeriums für Gesundheit und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Berlin 2002.
- Römpp, A., O. Klemm, W. Fricke, H. Frank; Haloacetates in fog and rain; *Env. Sci. Tech.*, Vol. **35**, pp. 1294-1298, 2001.
- Saether, O.M. und B.T. Andreassen; Amounts and sources of fluoride in precipitation over Southern Norway; *Atm. Env.*, Vol. **29**, pp. 1785-1793, 1995.
- Scheringer, M.; Persistenz und Reichweite von Umweltchemikalien; Wiley-VCH, Weinheim, 1999.
- Schwarz W. und J. Harnisch; Establishing the Leakage Rates of Mobile Air Conditioners; Im Auftrag der DG Umwelt der Europäischen Kommission, Brüssel, April 2003.
- Scott, B.F., D. MacTavish, C. Spencer, W.M.J. Strachan, D.C.G. Muir; Haloacetic acids in Canadian lake waters and precipitation; *Env. Sci. Tech.*, Vol. **34**, pp. 4266-4272, 2000.
- Smith, F.A. und H.C. Hodge; Airborne fluorides and man: part 1; *CRC Crit Rev Env Contr*, Vol **8**, No. **4**, pp 293-371, 1979.
- Solvay Management Support (H. Krähling; S. Krömer, I Mersiowsky); High Performance Thermal Insulation for Buildings in Spain and Portugal. Life Cycle Assessment on HFC-365mfc-blown rigid Polyurethane Sprays, Hannover, März 2001.
- SOMS; Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, Implementation Strategy on Management of Substances Progress Report; The Hague 2001
- SOU; Statens Offentliga utredningar – Summary of the report of the Swedish Committee on New Guidelines of Chemicals Policy; Stockholm, 5.6.2000
- SRU; Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (SRU) - Sondergutachten Umwelt und Gesundheit 1999
- STEP-HALOCSIDE/AFEAS; Proceedings of the Workshop „Kinetics and mechanisms for the reaction of halogenated organic compounds in the troposphere“; Dublin, 14-16 May 1991, University College Dublin, Dublin, 1991.
- STEP-HALOCSIDE/AFEAS; Proceedings of the Workshop „Kinetics and mechanisms for the reaction of halogenated organic compounds in the troposphere“; Dublin, 23-25 March 1993, University College Dublin, Dublin, 1993.
- Streit, B.; Lexikon Ökotoxikologie; VCH Verlag, Weinheim, 1991.

- Sydow v. L., A.B. Grimvall, H.B. Boren, K. Laniewski, A.T. Nielsen; natural background levels of trifluoroacetate in rain and snow; *Env. Sci. Tech.*, Vol. 34, pp. 3115-3118, 2000.
- Tapscott, R.E., E.W. Heinonen, G.D. Brabson; Advanced Agent Identification and Preliminary Assessment; The University of New Mexico - Center for Global Environmental Technologies; Report on request of the Advanced Agent Working Group; 1996.
- Technischer Ausschuss für Anlagensicherheit beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Abschlussbericht des Arbeitskreises Anlagenüberwachung. Ganzheitliche Anlagenüberwachung TAA-GS-29, 2003.
- Tickner 2001; Tickner, J.A., Precautionary assessment: a framework for integrating science, uncertainty and preventive public policy, in: Conference Proceedings - The Role of Precaution in chemicals policy, Diplomatic Academy Vienna, November 2001
- Technische Regeln zur Druckbehälterverordnung - Druckbehälter TRB 801 - Besondere Druckbehälter nach Anhang II zu § 12 DruckbehV. Vom 21. Dezember 1983, BArbBl Nr. 02/1984 S. 92, berichtigt BArbBl Nr. 5/98, 4/91, 5/93, 5/95, 11/95, 10/98 geändert am 21.05.2001, BArbBl Nr. 8/2001 S.107 zuletzt geändert am 28. Mai 2005; BArbBl Nr. 9/2002 S. 129
- Tromp, T.K., M.K.W. Ko, J.M. Rodriguez, N.D. Sze; Potential accumulation of a CFC-replacement degradation product in seasonal wetlands, *Nature*, 376, pp 327-330, 1995.
- UBA; Umweltbundesamt (Hrsg.) Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC; Erich-Schmidt-Verlag, Berlin 1999a.
- UBA; Umweltbundesamt; Anforderungen an Stoffeinträge in Gewässer – Hinweise für Stoffanwender; Texte 60/99 Berlin 1999b.
- UBA; Umweltbundesamt; Leitfaden für Formulierer und andere gewerbliche Anwender chemischer Stoffe; Texte 88/99 Berlin 1999c.
- UBA Umweltbundesamt, Bewertung in Ökobilanzen Methode des Umweltbundesamtes nur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043 Version '99; UBA Texte 92/99, Berlin 1999d.
- UBA; Daten zur Umwelt 2000; Berlin, 2000.
- UBA; Nachhaltigkeit und Vorsorge bei der Risikobewertung und beim Risikomanagement von Chemikalien - Teil I: Neue Strategien zur ökologischen Risikobewertung und zum Risikomanagement von Stoffen; J. Ahlers et al., Umweltbundesamt, Texte 30/01, Berlin, 2001.
- UBA; Zentrale Melde- und Auswertestelle für Störfälle und Störungen in verfahrenstechnischen Anlagen (ZEMA); Jahresbericht 2001. Umweltbundesamt, Berlin 2003.
- UN-ECE; Protocol concerning the control of emissions of volatile organic compounds or their transboundary fluxes; Economic Commission for Europe, United Nations, New York & Geneva, 1994.
- UNFCCC; Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen, Vereinte Nationen, Genf, 1992. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convger.pdf>
- VDEW, Pressemitteilung vom 18.06.2001, <http://www.vdew.de>; 2001.
- Visscher, P.T., C.W. Culbertson, R.S. Oremland; Degradation of trifluoroacetate in oxic and anoxic sediments; *Nature*, Vol 369, pp 729-731, 1994.
- WBGU 1998; Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen; Welt im Wandel, Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken, Jahresgutachten 1998; Springer Verlag 1999. Welte, Rainer (Bayer AG,

- Geschäftsbereich Polyurethane, Strategisches Marketing Insulation/Disconti Application), Leverkusen, pers. Mitt. 5.3.2002.
- Wiegand C, Pflugmacher S, Giese M, Frank H, Steinberg C; Uptake, toxicity, and effects on detoxication enzymes of atrazine and trifluoroacetate in embryos of zebrafish; *Ecotoxicology Environmental Safety* Vol. 45 No. 2; pp. 122-131, 2000
- WMO; Scientific assessment of ozone depletion: 1994; Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 37, World Meteorological Organization, Geneva, 1995.
- WMO; Scientific assessment of ozone depletion: 1998; Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 44, World Meteorological Organization, Geneva, 1999.
- Wobst, E., Otto D.: Ammoniak-Kälteanlagen – Erfassung und Bewertung von Vorschriften sowie die Zusammenstellung von Anwendungsgrenzen. Forschungsrat Kältetechnik e.V. (Hrsg.), Frankfurt 1994.
- Wolfer et.al. 1999: Ammoniak und Kohlenwasserstoffe als Kältemittel: Risikoanalyse, Produkthaftung und Strafrecht. Bundesamt für Energie (Hrsg.), Bern 1999.
- Wujcik, C.E., T.M. Cahill, J.N. Seiber; Determination of trifluoroacetic acid in 1996-1997 precipitation and surface waters in California and Nevada; *Environ. Sci. Technol.*, 33, pp. 1747-1751, 1999.

11 Anhang : Hintergrund zu Bewertungsansätzen

11.1 Risikobewertung

11.1.1 Risikobewertung im Rahmen des EU-Chemikalienrechts

Eine Risikobewertung umfasst nach der Richtlinie 93/67/EWG (für neue Stoffe) und nach der EG-Verordnung 1488/94 (für Altstoffe) folgende Schritte:

Abbildung 43 – Schritte der EU-Risikobewertung von Alt- und Neustoffen

Beschaffung der Informationen	
Ermittlung der Wirkungen Gefahrenpotenzial (R-Sätze) Dosis- (Konzentrations-)/ Wirkungsermittlung	Expositionsermittlung Expositionsermittlung der Bevölkerung (Arbeitnehmer, Verbraucher, über die Umwelt exponierte Bevölkerung) Exposition Umwelt (Wasser, Boden, Luft)
Risikobeschreibung	
Menschliche Gesundheit	Umwelt
Bewertung der Wirkungsdaten und Vergleich mit den Expositionsdaten	

Die Methoden zur Bestimmung der physikalisch-chemischen Eigenschaften von Stoffen und Zubereitungen sowie ihrer Toxizität und Ökotoxizität sind in Anhang V der EG Richtlinie 67/548/EWG festgelegt. Zu den jeweiligen Einstufungsmethoden (z.B. als "sehr giftig für Wasserorganismen") sind quantitative Schwellenwerte (im Beispiel "96h LC₅₀(Fisch)²⁹ oder 48h EC₅₀(Daphnia)³⁰ oder 72h IC₅₀(Alge)³¹ ≤ 1 mg/l") definiert. Die detaillierte Verfahrensweise ist im "Technical Guidance Document" (TGD) der Europäischen Kommission beschrieben (KOM 1996) :

Ausgehend von den ermittelten Daten zu Gefahrenpotenzial und Wirkgrenzen erfolgt in Kombination mit gemessenen, modellierten oder per Konvention festgelegten Expositionsdaten die Risikobeschreibung. Zur Beschreibung der Gesundheitsgefahren werden erwartete Expositionen mit den NOAEL (No observed adverse effect level) oder den LOAEL (Lowest observed adverse effect level) in Beziehung gesetzt. Analog werden zur Beschreibung der Umweltwirkungen mögliche Umweltkonzentrationen (Predicted Environmental Concentration PEC) in Beziehung zu den Konzentrationen gesetzt, unter der

²⁹ Konzentration im Wasser, die im Labor nach 96 Stunden zum Tod von 50% einer Fischpopulation führt.

³⁰ Konzentration im Wasser, die im Labor nach 48 Stunden Immobilisation von 50% einer Daphnienpopulation führt.

³¹ Konzentration im Wasser, die im Labor nach 72 Stunden zu einer 50% Reduktion der Wachstumsrate in einer Algenpopulation führt.

keine Schädigung erwartet wird. Im abschließenden Schritt der Risikobewertung werden gegebenenfalls erforderliche weitere Untersuchungen oder Maßnahmen zur Risikoreduzierung vorgeschlagen.

Das Umweltbundesamt hat die Kritik zu dieser Vorgehensweise, insbesondere hinsichtlich der Bewertung der Umweltrisiken in UBA (1999a) zusammengefasst. Die EU-Risikobewertung wird zwar als eine wichtige Hilfsgröße für die Stoff- und Produktbewertung anerkannt, jedoch als unzureichend hinsichtlich einer vorsorgenden und nachhaltigen Stoffpolitik kritisiert. Neben einer Kritik an den Methoden zur Feststellung der Gefahrenpotenziale, die grundsätzlich zu einer Unterschätzung von Schadstoffemissionen führt, weil z.B. die Neben- und Abbauprodukte und real vorkommende Bedingungen nicht ausreichend berücksichtigt werden, wird auf eher grundsätzlicher Ebene die fehlende Berücksichtigung von langen Zeitabläufen, von vergleichenden Bewertungen, von möglichen Wechselwirkungen, von Datenlücken und Nicht-Wissen kritisiert. In UBA (2001) wird in Hinblick auf die Fortschreibung des Technical Guidance Documents (TGD) auch die Schließung von Lücken zum Meeres- und Grundwasserschutz und des Luftbereichs gefordert. Kritisiert wird insbesondere das PEC/PNEC Konzept, das letztlich impliziert, dass die lokalen und globalen Senken durch die einzelnen Stoffe bis zur PNEC-Konzentration aufgefüllt werden dürften, was in Widerspruch zum Verbot einer Verschlechterung steht.

Als Elemente, die im Rahmen einer an der Vorsorge orientierten Stoffbewertung Anwendung finden sollten, werden vom Umweltbundesamt die Anwendung des Minimierungs- und Substitutionsprinzips sowie die Einbeziehung stoffinhärenter Risikopotenziale als zusätzliche, unabhängige Bewertungsgrößen gefordert.

11.1.2 Begriffe: Risiko, Unsicherheit, Unbestimmtheit, Ungewissheit, Nicht-Wissen

Risiko ist in naturwissenschaftlichem Sinn das Produkt von Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit. Je mehr empirische Daten über mögliche Schäden und über die Anzahl von eingetretenen Schäden vorhanden sind, desto besser sind die Voraussetzungen für die Bestimmung einer hohen Abschätzungssicherheit. Besteht vollkommene Abschätzungssicherheit handelt es sich strenggenommen nicht mehr um ein Risiko, sondern um eine Gefahr. Die bei der Beschreibung eines Risikos zu berücksichtigenden Unsicherheiten werden dabei begrifflich und methodisch unterschieden: Schwankungsbreiten, die sich aus den statistischen Berechnungsverfahren ergeben, werden als statistische Unsicherheiten bezeichnet. Unbestimmtheit besteht, wenn zwar das Schadenspotenzial bekannt ist, aber Kenntnisse zur Eintrittswahrscheinlichkeit fehlen. Sind sowohl Schadensausmaß als auch Eintrittswahrscheinlichkeit unbekannt, spricht man von Nicht-Wissen. Nicht-Wissen und Unbestimmtheit werden unter dem Begriff Ungewissheit zusammengefasst. Ein historisches Beispiel für Risiken, die sich aus Nicht-Wissen ergeben können, ist die Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht durch FCKW (WBGU (1998)). Ein Beispiel für Unbestimmtheit wäre ein Stoff mit einem hohen stoffintrinsic Gefahrenpotenzial, dessen Wirkungen jedoch wegen fehlender Kenntnis zu Verteilung und Exposition nicht ermittelt werden können.

Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen (WBGU) hat in seinem Gutachten weitere Kriterien eingeführt, die eine Typisierung von Risiken ermöglichen. Zur Berücksichtigung von Unsicherheiten und Unbestimmtheiten werden die Kriterien Abschätzungssicherheit der Eintrittswahrscheinlichkeit und

Abschätzungssicherheit des Ausmaßes der Schäden eingeführt, sowie die Kriterien Ubiquität, Persistenz, Irreversibilität, Verzögerungswirkung und soziales Mobilisierungspotenzial.

An Hand dieser Kriterien lassen sich Risiken sechs Typen zuordnen, die in unterschiedlichen Risikobereichen angesiedelt werden: Normalbereich, Grenzbereich und Verbotsbereich (WBGU (1999)). Dabei bezeichnet der Normalbereich nicht Situationen mit einem Null-Risiko, sondern solche, die mit der „klassischen“ Risikoformel Schadensausmaß x Eintrittswahrscheinlichkeit gut erfassen lassen und die durch die existierenden Risikomanagementmaßnahmen ausreichend kontrolliert werden können (Renn (1999)). Tabelle 41 zeigt die Ableitung der Risikotypen an Hand der Risikokriterien.

Tabelle 41 - Ableitung von Risikotypen an Hand von Risikofaktoren

Risikotyp	Eintrittswahrscheinlichkeit	Abschätzungssicherheit	Schadensausmaß	Abschätzungssicherheit	Ubiquität	Persistenz	Irreversibilität	Verzögerungswirkung	Mobilisierungspotenzial	Beispiel
Damokles	-	++	++	++						Kernenergie
Zyklop	?	-, ?	++	+						Überschwemmung
Pythia	?	--, ?	?	--, ?						BSE
Pandora	?	?	?	?	++	++	++			Persistente organische Verbindungen
Kassandra	+, ++	-	+, ++	+				++		Klimawandel
Medusa	-	-	-	+					++	Elektromagnetische Felder

-- gering

- eher gering

+ eher hoch

++ hoch,

? unbekannt

Quelle: nach WBGU (1999)

Abbildung 44 zeigt die vom WBGU (1999) abgeleiteten Risikotypen und ihre Zuordnung zu den Risikobereichen.

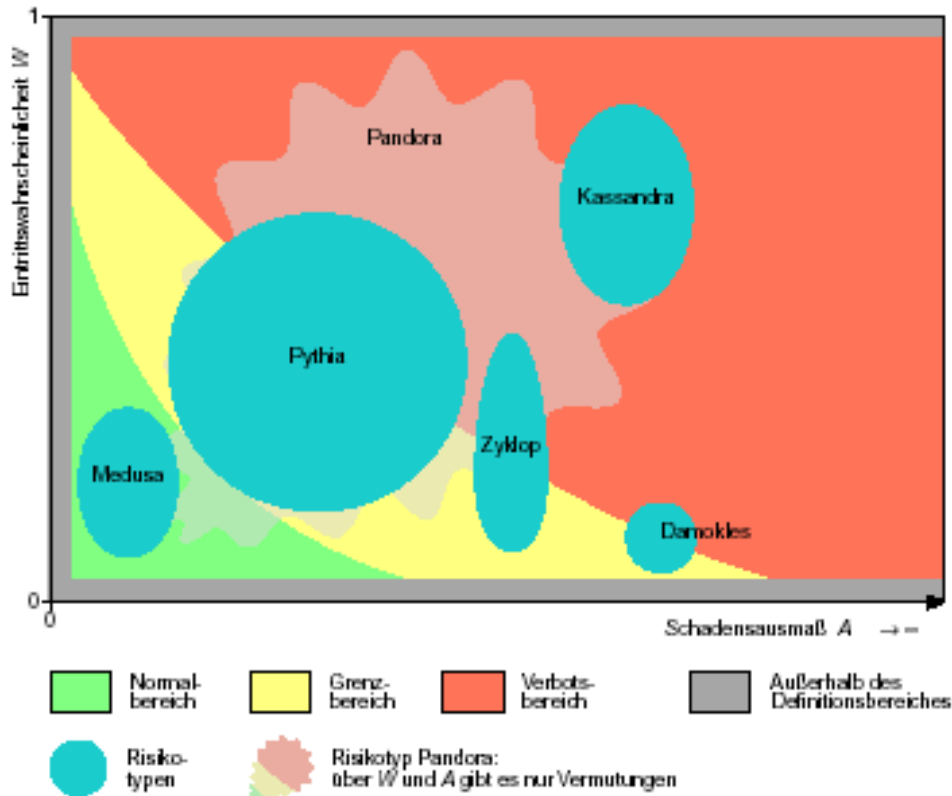


Abbildung 44 – Risikotypen im Normal-, Grenz- und Verbotsbereich (WBGU (1999))

Aus der Zuordnung zu den Risikobereichen lassen sich Handlungsmaximen für das Risikomanagement ableiten. Maßnahmen sollten die Verschiebung aus dem Verbots- und Grenzbereich in den Normalbereich zum Ziel haben.

Ein Beispiel aus dem Chemikalienbereich für ein Risiko im Normalbereich wäre der diffuse Einsatz des leichtentzündlichen Benzins. Nach WBGU (1999) sind beispielsweise die Risiken durch die Freisetzung persistenter organischer Schadstoffe (POP) und endokrin wirksame Stoffe dem Risikotyp Pandora zuzuordnen. Wirksame Maßnahmen für diesen Risikotyp umfassen die Erforschung und Förderung von Substituten, Mengen- und Ausbreitungsbegrenzungen bis hin zu Verboten und Schadensmanagement wie z.B. technische Schutzmaßnahmen.

Risiken durch Chemikalien sind wegen der fehlenden Kenntnis der Basisdaten zu 99% der Chemikalien generell durch ein hohes Maß an Nicht-Wissen gekennzeichnet. Grundsätzlich ist dieses Defizit aber durch die systematische Erarbeitung der Basisdaten, wie sie das Weissbuch zur Chemikalienpolitik vorsieht, reduzierbar. Gerade hinsichtlich langfristiger und weiträumiger Wirkungen von Chemikalien, komplexer Wirkmuster und bislang unbekannter oder ungeklärter Wirkungen sind jedoch Bewertungsansätze erforderlich, die über das Paradigma „Sicher sind alle Substanzen, solange das Gegenteil nicht bewiesen ist“ hinausgehen (z.B. Tickner (2001)). Die Frage ist also, welche systematischen und begründeten Bewertungsmechanismen den Unsicherheiten und Ungewissheiten sowie unterschiedlichen Risikodimensionen bei der Bewertung von Stoffen gerecht werden können.

11.1.3 Ansätze einer vorsorgeorientierten Risikobewertung von Stoffen

11.1.3.1 Late Lessons from Early Warnings

Die Europäische Umweltagentur hat in der Studie „Late lessons from early warnings“ (EEA 2001) an Hand von Fallstudien zu historischen umwelt- und gesundheitsbezogenen Schadensfälle, u.a. zu Asbest, PCB, FCKW, MTBE untersucht, welche bei vorsorgenorientierten Entscheidungsmechanismen beachtet werden sollten, um Schäden und gesellschaftliche Kosten solchen Ausmaßes in Zukunft zu vermeiden.

Von den 12 Lektionen der EEA, die im Rahmen einer Risikobewertung³² berücksichtigt werden können, sind zu nennen:

- Wahrnehmung und Differenzierung von Unsicherheit, Unbestimmtheit und Nicht-Wissen
- Beachtung von Früh-Warn-Kriterien wie Persistenz und Bioakkumulierbarkeit
- Identifizierung von „blinden Flecken“ durch Berücksichtigung einfacher Parameter wie z.B. der produzierten Menge eines Stoffes
- Sicherstellen, dass die tatsächlichen Praxisbedingungen der Anwendungen berücksichtigt werden
- Identifizieren von Substitutionsmöglichkeiten mit geringerem Risikopotenzial

11.1.3.2 Strategy on Management of Substances

In den Niederlanden wurde mit der „Strategy on Management of Substances“ (SOMS (2001)) unter Beteiligung aller interessierten Kreise eine umfassende Strategie erarbeitet, die im Dezember 2001 von holländischen Ministerrat angenommen wurde. Als Grundlage für ein vorsorgeorientiertes Management von Chemikalien wurden Kriterien für ein Bewertungssystem zur Klassifizierung von Substanzen in fünf Klassen von geringer bis sehr hoher Besorgnis festgelegt. Dieser „Quick-Scan“ erfolgt an Hand eines Basissatzes stoffintrinsischer Eigenschaften³³ unter Berücksichtigung der Datenlage und der Datenqualität. So führt das Fehlen von Daten oder das Vorhandensein „weicher“ Daten zur Einstufung in Klassen mit höherer Besorgnis. In einem nächsten Schritt werden die Stoffe in Abhängigkeit von den Verwendungsmustern bestimmten Risikomanagementkategorien zugeordnet..

11.1.3.3 TRGS 440 –Spaltenmodell

Die Technische Richtlinie für Gefahrstoffe 440 (TRGS 440) der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitssicherheit erläutert die Ermittlungspflichten nach § 16 und 36 der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) zur Prüfung von Ersatzverfahren und –stoffen mit einem geringeren gesundheitlichen Risiko. Das „Spaltenmodell“ der TRGS 440 ordnet R-Sätze fünf Gefährdungsklassen von sehr hoch bis vernachlässigbar zu. Gefährdungsklassen werden in sechs Bewertungskategorien (Spalten) ermittelt, z.B. akute Gesundheitsgefahren, chronische Gesundheitsgefahren usw. Das Spaltenmodell geht von einer weitgehend vollständigen

³² Eine erfolgreiche Risikominimierung erfordert nach dem Schritt der Risikobewertung auch ein angemessenes Risikomanagement und eine entsprechende Risikokommunikation. Der Schwerpunkt der vorliegenden Studie liegt auf der Risikobewertung. Grundsätzlich lassen sich Aspekte des Risikomanagements nicht aus einer umfassenden Bewertung ausklammern.

³³ Reduzierter Datensatz nach Anhang VII A der Richtlinie 67/548/EWG zu Persistenz, Bioakkumulierbarkeit, Toxizität, Humantoxizität, Kanzerogenes, Mutagenes und reproduktionstoxisches Potenzial, Wirksamkeit als endokriner Disruptor

Datenlage aus. Eine Berücksichtigung der Datenqualität erfolgt in der vergleichenden Auswertung. Der Schwerpunkt der TRGS 440 liegt bestimmungsgemäß in der Beurteilung arbeitsplatzbezogener Risiken, eine differenzierte Betrachtung der Lebensabschnitte vor und nach der Produktion erfolgt nicht.

11.1.3.4 Leitfaden für Formulierer und andere gewerbliche Anwender chemischer Stoffe

Im Rahmen der Studie „Anforderungen an Stoffeinträge in Gewässer“ (UBA (1999b)) wurden von Ökopol zehn Bewertungsmethoden untersucht, die in unterschiedlichen Kontexten und mit unterschiedlichen Gewichtungen und Zielsetzungen stoffliche Wirkungen auf Gewässer bewerten. Auf der Basis der Ergebnisse wurde der „Leitfaden für Formulierer und andere gewerbliche Anwender chemischer Stoffe“ (UBA (1999c)) erstellt. Stoffe werden an Hand ausgewählter Stoffeigenschaften und Nutzungsmuster fünf Risikoklassen zugeordnet, wobei das Fehlen von Daten ebenfalls zu einer Einordnung in eine hohe Risikoklasse führt. Der Leitfaden ist auf Wirkungen auf Gewässer zugeschnitten, das in dargestellte Risikoprofil lässt sich aber grundsätzlich auf andere Fragestellungen erweitern.

Tabelle 42 Risikoprofil nach (UBA (1999c))

Stoffeigenschaft	Zunehmendes Risiko				
	I	II	III	IV	IVa
CMR ³⁴	keine Hinweise		Verdacht CM	erwiesen	unbekannt
...					
Nutzungsmuster					
Menge	sehr niedrig	niedrig	mittel	hoch	unbekannt
Gebrauchsmuster bei Kunden	geschlossene Anwendung	industrielle Nutzung	weit gestreute Nutzung	umweltoffene Anwendung	unbekannt
...					

11.1.3.5 Persistenz, Reichweite und Bioakkumulierbarkeit

Scheringer (1999) entwickelte als Erweiterung der wirkungsgestützten Bewertung mit dem Konzept der Persistenz und Reichweite einen expositionsgestützten Ansatz. Das Konzept wird derzeit im Rahmen des EU Forschungsprojektes „Precautionary Screening of New Organic Chemicals with Respect to Global Threat Potentials“ weiter entwickelt. Dabei klassifiziert der sogenannte „Pandora-Filter“ Substanzen an Hand der Parameter Halbwertszeit, Reichweite und Bioakkumulierbarkeit. Ein Test mit 33 organischen Massenschemikalien und 23 der in den Montreal-/Kyoto/Stockholm-Abkommen meist genannten Stoffe zeigt, dass der Filter bei entsprechender Kalibrierung eine Identifizierung der klimarelevanten und ozonerstörenden Substanzen ermöglicht hätte (Müller-Herold (2002)).

Dass neben stoffintrinsic Eigenschaften wie z.B. Kanzerogenität auch Eigenschaften wie Persistenz, Reichweite oder Bioakkumulierbarkeit zur Bewertung von Substanzen herangezogen werden sollen und dass hohe Persistenz oder Bioakkumulierbarkeit auch als

³⁴ CMR (Kanzerogene, mutagene und reproduktionstoxische Stoffe)

Auslöser für die Beschränkungsmaßnahmen herangezogen werden sollten, ist in der wissenschaftlichen und politischen Diskussion nicht unumstritten. Persistenz oder Bioakkumulierbarkeit bedeuten per se noch keine Gefährdung der menschlichen Gesundheit oder der Umwelt. Sie sind allerdings Indikatoren für die Globalität, die Langfristigkeit und die Irreversibilität von Risiken und für die Beanspruchung der Assimilationskapazität von Organismen und Umweltkompartimenten. Dennoch befürchtet der Sachverständigenrat für Umweltfragen in seinem Gutachten von 1998, dass einseitig auf die Merkmale Persistenz und Ubiquität gestützte Bewertungen zu „spekulativer“ Vorsorge führen. Getragen werden diese Bedenken wohl auch von der Befürchtung, dass durch solch einen Ansatz massive Einschränkungen von verwendeten Massenschemikalien begründet werden können und damit ökonomische Belastungen über der Grenze der wirtschaftlichen Zumutbarkeit hinaus verursacht werden (SRU (1998)). Selbst aus dieser konservativen Sicht dürfte allerdings nichts dagegen sprechen, Persistenz, Reichweite und Bioakkumulierbarkeit im Rahmen von differenzierten Bewertungen und Substitutionsentscheidungen als ergänzende Parameter heranzuziehen und sie als wichtige Warnsignale in der Risikobewertung von Stoffen zu berücksichtigen, gerade wenn es um neue Stoffe geht, deren zukünftige Verwendung in großen Mengen vorgesehen ist.

Im Rahmen einer vom Öko-Institut betreuten Master- und Staatsexamensarbeit (Wurstthorn 2001) wurden 25 Bewertungsmethoden zur Beurteilung persistenter und bioakkumulativer Schadstoffe an Hand dreier Fallbeispiele (Perfluoroktansulfonaten, Tributylzinn, Methyl-tertiär-Butylether) untersucht und im Ergebnis ein praxisnahes Bewertungsmodul zur Beurteilung persistenter und bioakkumulativer Eigenschaften entwickelt.

Nach Feststellung des Risikos durch diese Eigenschaften muss dann in einem nächsten Schritt geklärt werden, wie diese Eigenschaften im Verhältnis zu den weiteren Beurteilungskriterien eines Stoffes gewichtet werden können.

11.2 Gewichtung von Wirkungskategorien

Bei der vergleichenden Bewertung von Systemen (Produkten, Stoffen, Verfahren) müssen Vor- und Nachteile in unterschiedlichen Wirkungskategorien gegeneinander abgewogen werden. Es gibt derzeit jedoch keine anerkannte Methode, beispielsweise die hohe Treibhausrelevanz des einen Stoffes und die toxikologische Relevanz eines anderen Stoffes auf einen gemeinsamen Nenner und Vergleichsmaßstab zu bringen. Eine Rangbildung verschiedener umwelt- und gesundheitsrelevanter Wirkungen muss auf der Basis naturwissenschaftlicher Grundlagen stattfinden, kann jedoch nur unter Berücksichtigung der Werturteile und des Risikoverständnisses unterschiedlicher gesellschaftlicher Akteure und gesellschaftspolitischer Prioritäten erfolgen.

Das Umweltbundesamt hat in (UBA 1999d) eine Methode zur Hierarchisierung von Wirkungskategorien auf der Grundlage von Informationen zu „Ökologischer Gefährdung“, „Distance-To-Target“ und „Spezifischem Beitrag“ eine Gewichtung von Wirkungskategorien erarbeitet.

Die Beurteilung der Bewertungsfelder „Ökologischer Gefährdung“ und des „Distance-To-Target“ erfolgt dabei nach den Kriterien in 2.4.

Für die Normierung des „Spezifischen Beitrags“ wird der systemspezifische Beitrag einer Wirkungskategorie in Bezug gesetzt zur Gesamtbelastung dieser Wirkungskategorie. Er kann nur spezifisch für ein System ermittelt werden.

Tabelle 43 - Kriterien für Ökologische Gefährdung und Distance-To-Target (UBA 1999d)

Ökologische Gefährdung	Distance-To-Target
potenzielles Schadensausmaß	Abstand zwischen Ist-Zustand und Soll-Zustand (Umweltqualitätsziel, ersatzweise Umwelthandlungsziel)
Irreversibilität	Trend der Belastungen (Steigend oder fallend)
Ubiquität	Durchsetzbarkeit und Wirksamkeit von Maßnahmen
Unsicherheit und Ungewissheit	

Die Ergebnisse der drei Bewertungsfelder werden jeweils in fünf Klassen (A = sehr groß – E= sehr gering) eingeteilt. Tabelle 44 fasst die Festlegungen des Gremiums zu „Ökologischem Beitrag“ und „Distance-To-Target“ zusammen.

Tabelle 44 – Hierarchisierung von Wirkungskategorien nach UBA (1999d)

Wirkungskategorie	Ökologischer Beitrag	Distance-To-Target
Versauerung	B	B
Treibhauseffekt	A	A
Stratosphärischer Ozonabbau	A	D
Ressourcenbeanspruchung	C	B
Photochemische Oxidantienbildung	D	B
Naturraumbeanspruchung	A	B (A,C)
Terrestrische Eutrophierung	B	B
Aquatische Eutrophierung	B	C

Für die Wirkungskategorien „Direkte Humantoxizität“ und „Direkte Schädigung von Ökosystemen“ gibt es derzeit kein methodisches Konzept zur Aggregation. Eine Bewertung kann somit nicht für die Kategorien insgesamt, sondern nur durch Bewertung der einzelnen toxischen Wirkungen erfolgen.

Diese Vorgehensweise und die entsprechenden Festlegungen wurden explizit zur Anwendung in Ökobilanzen erarbeitet und sind nicht auf andere Bewertungszusammenhänge oder die umweltpolitische Schwerpunktsetzung übertragbar. Die zu Grunde liegenden Kriterien (s. Abschnitt 2.4), die sich aus der wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Diskussion zu Umweltzielen, Risiko, Gefahrenabwehr und Vorsorge ableiten und die Methodik der Konsensfindung in einem mit den unterschiedlichen Interessengruppen besetzten Gremium sind jedoch auf ähnlich gelagerte Problemstellungen der Bewertung übertragbar.