

Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und
Reaktorsicherheit

Forschungsbericht 298 41 256

**Emissionen und Minderungspotential von HFKW, FKW und SF₆
in Deutschland**

von

Dr. Winfried Schwarz
Dr. André Leisewitz

Öko-Recherche
Büro für Umweltforschung und -beratung GmbH
Frankfurt/Main

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Oktober 1999

Berichts - Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB	2.	3.
4. Titel des Berichts Emissionen und Minderungspotential von HFKW, FKW und SF ₆ in Deutschland		
5. Autoren, Namen, Vornamen Dr. Winfried Schwarz, Dr. André Leisewitz		8. Abschlußdatum 21.09.1999
		9. Veröffentlichungsdatum Oktober 1999
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Öko-Recherche, Büro für Umweltforschung und -beratung GmbH, Kaiserstr. 61, 60329 Frankfurt am Main		10. UFOPLAN - Nr. 298 41 256
		11. Seitenzahl XII + 142
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt, Bismarckplatz 1, 14193 Berlin		12. Literaturangaben 215
		13. Tabellen und Diagramme 90 + 42
		14. Abbildungen 3
15. Zusätzliche Angaben		
16. Kurzfassung Die fluorierten Verbindungen Schwefelhexafluorid (SF ₆), perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe (PFC) und wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW) sind Treibhausgase, deren Reduktion im Rahmen der Klimarahmenkonvention beschlossen wurde. Die Studie prognostiziert für Deutschland die Emissionsentwicklung 1995-2010 mit und ohne zusätzliche emissionsmindernde Maßnahmen. Nach dem Business-as-Usual-Szenario steigen die Emissionen der drei fluorierten Treibhausgase 1995-2010 von 11,1 auf 27,4 Mio. t CO ₂ -Äquivalente. Der Anstieg wird zu 72% von HFKW getragen, die vor allem in der Kälte- und stationären Klimatechnik, mobilen Klimaanlage, zur Schäumung von extrudiertem Polystyrol (XPS) und bei PU-Montageschaum eingesetzt werden. Größter SF ₆ -Emittent sind Schallschutzscheiben, die meisten PFC-Emissionen stammen aus der Halbleiterindustrie und der Aluminiumherstellung. Auch nach dem Minderungsszenario wird eine Stabilisierung der Emissionen fluoriert Gase nicht erreicht. Lediglich ihr Anstieg verlangsamt sich. Er verläuft von 11,1 auf 14,9 Mio. t CO ₂ -Äquivalente. Die vorgeschlagenen Maßnahmen zur Verlangsamung des Emissionsanstiegs sind bei Kälte- und stationären Klimaanlage eine Wartungspflicht, bei mobilen Klimaanlage der Kältemittel-Ersatz von HFKW durch CO ₂ , bei der XPS-Schäumung die partielle HFKW-Substitution durch CO ₂ und Ethanol, bei PU-Montageschaum der 95%-ige HFKW-Ersatz durch brennbare Kohlenwasserstoffe. Im Bereich der Schallschutzscheiben wird ein völliger SF ₆ -Verzicht für möglich gehalten. Auch die PFC-Emissionen der Halbleiterindustrie können durch neue Verfahren der Prozeßkammer-Reinigung um 85% sinken.		
17. Schlagwörter Fluorierte Verbindungen; Klimawandel; Wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW); FCKW-Ersatz; Kältemittel; Treibmittel; Schwefelhexafluorid (SF ₆); Perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe (PFC); Halbleitergase; Emissionen treibhauswirksamer Verbindungen; Deutschland		
18. Preis	19.	20.

Report Cover Sheet

1. Report No. UBA-FB	2.	3.
4. Report Title Emissions and Reduction Potentials of Hydrofluorocarbons, Perfluorocarbons and Sulphur Hexafluoride in Germany		
5. Authors, Family Names, First Names Dr. Winfried Schwarz, Dr. André Leisewitz		8. Report Date 21.09.1999
		9. Publication Date October 1999
6. Performing Organization (Name, Address) Öko-Recherche, Büro für Umweltforschung und -beratung GmbH, Kaiserstr. 61, D-60329 Frankfurt am Main		10. UFOPLAN - Ref. No. 298 41 256
		11. No. of Pages XII + 142
7. Sponsoring Agency (Name, Address) Umweltbundesamt (German Federal Environmental Agency), Bismarckplatz 1, D-14193 Berlin		12. No. of References 215
		13. No. of Tables, Diagrams 90 + 42
		14. No. of Figures 3
15. Supplementary Notes A full-length German version of this report is available from the sponsoring agency.		
16. Abstract The greenhouse gases subject to emission reduction commitments under the UN Climate Convention include the fluorinated compounds sulphur hexafluoride (SF ₆), perfluorocarbons (PFCs) and hydrofluorocarbons (HFCs). The present study projects the emissions of these gases in Germany over the 1995–2010 period, with and without additional emission abatement efforts. In the business-as-usual scenario, total emissions of the three fluorinated gases rise over the 1995–2010 period from 11.1 to 27.4 million tonnes CO ₂ equivalent. This rise is 72% attributable to HFCs, used above all for refrigeration and stationary air-conditioning, for mobile air-conditioning, for blowing extruded polystyrene (XPS) foam and for one-component polyurethane (PU) foam. Soundproof glazing is the largest SF ₆ emissions sector. Most PFC emissions come from semiconductor manufacturing and aluminium smelting. The reduction scenario, too, does not achieve stabilization of fluorinated gas emissions. The rate of growth is only slowed, with 11.1 million tonnes CO ₂ equivalent in 1995 growing to 14.9 million in 2010. The measures proposed to attenuate emissions growth are: mandatory equipment maintenance in refrigeration and stationary air-conditioning, refrigerant substitution of HFCs by CO ₂ in mobile air-conditioning, partial HFC substitution by CO ₂ and ethanol in XPS foam blowing, 95% HFC substitution by flammable hydrocarbons in one-component PU foam. Complete SF ₆ phase-out is considered to be feasible in soundproof glazing. The PFC emissions of the semiconductor industry can be cut by 85% by new chamber cleaning technologies.		
17. Keywords Blowing Agents; CFC Substitution; Climate Change; Fluorinated Compounds (FCs); Germany; Global Warming; Greenhouse Gases; Hydrofluorocarbons (HFCs); New Gases; Perfluorocarbons (PFCs); Refrigerants; Sulphur Hexafluoride (SF ₆)		
18. Price	19.	20.

Inhalt

Inhalt	I
Enleitung	V
Zusammenfassung	VI
1. Emissionen 2010 von HFKW, FKW und SF ₆ im BaU-Szenario	VI
Emissionsquellen verschiedener Größe im BaU-Szenario	VI
2. Emissionen 2010 von HFKW, FKW und SF ₆ im Minderungsszenario	VIII
Das Minderungspotential der einzelnen Emissionsquellen	VIII
3. Folgerungen für eine Politik der Emissionsminderung	XI
Anhang	XII
I. HFKW	1
Überblick	7
1 BaU-Emissionsprognose 2010 – Szenario I	1
2 Relative Emissionsminderung bis 2010 – Szenario II	3
Anhang. Die Jahre 1995 bis 1997	6
1. Kälte- und stationäre Klimaanlage	7
1 Inlands-Neuverbrauch und Emissionen 1995 - 1997	8
2 BaU-Emissionsprognose 2010 - Szenario I	10
3 Relative Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II	14
2. Mobile Klimaanlage	17
1 Inlands-Neuverbrauch und Emissionen 1995 - 1997	17
1.1 Pkw-Klimaanlagen	18
1.2 Sonstige Mobilklimaanlagen	19
2 BaU-Emissionsprognose 2010 - Szenario I	20
2.1 Pkw-Klimaanlagen	20
2.2 Sonstige Mobilklimaanlagen	22
3 Relative Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II	23
3.1 Pkw-Klimaanlagen mit CO ₂ als Kältemittel ab 2007	23
3.2 Sonstige mobile Klimaanlage	25
4 Vergleich der Emissionen aus Mobilklimaanlagen in Szenario I mit II	27
3. PU-Montageschaum	29
1 Inlands-Verbrauch und -Emissionen 1995 - 1997	29
2 BaU-Emissionsprognose 2010 - Szenario I	30
3 Relative Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II	31
4. PU-Schaumprodukte	33
1 Inlands-Verbrauch und -Emissionen 1995-1997	33
2 Zu aktuellen und künftigen Treibmitteln bei PU-Hartschaum	33
2.1 HFKW-134a als Zusatz-Treibmittel für Sandwichelemente	34
2.2 Neue flüssige HFKW für Kleinanwendungen	34
2.3 Emissionsprofile von 134a und 245fa/365mfc aus PU-Hartschaum	35
3 BaU-Emissionsprognose bis 2010 -Szenario I	35
3.1 Emissionen von 134a bis 2010	36
3.2 Emissionen von 245fa/365mfc	36
4 Relative Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II	36
4.1 HFKW-Einsatz bis 2010 um 50% gegenüber Szenario I verringert	37

4.2 Verminderte HFKW-Emissionen	37
5 Beitrag zum Treibhauseffekt aller PU-Hartschaum-HFKW (Szenario I und II)	38
5 XPS-Hartschaum	40
1 Treibmittel ab 2000	40
<i>Verbrauchs- und Emissionsfaktoren</i>	41
2 BaU-Emissionsprognose 2010 - Szenario I	41
3 Relative Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II	42
4 Beitrag zum Treibhauseffekt im Vergleich Szenario I mit II	43
6. Asthma-Dosieraerosole	44
1 Inlands-Verbrauch und -Emission 1995-1997	44
2 BaU-Emissionsprognose bis 2010 - Szenario I	45
3 Relative Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II	45
7. Halbleiterfertigung	48
1 Inlands-Verbrauch und -Emissionen 1995-1997	48
2 BaU-Emissionsprognose 2010 - Szenario I	48
3 Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II	48
8. Sonstige HFKW	49
1 Inlands-Verbrauch und -Emissionen 1995-1997	49
1.1 <i>HFKW-23 als Nebenprodukt</i>	49
1.2 <i>Technische Aerosole</i>	49
2 Emissionsprognose bis 2010	50
2.1 <i>Neu: HFKW als Feuerlöschmittel</i>	50
2.2 <i>Neu: HFKW als Reinigungs-Lösemittel</i>	51
2.3 <i>Technische Aerosole auch mit flüssigen HFKW</i>	52
3 Beitrag zum Treibhauseffekt	52
Nachweise zu H-FKW	53
II. Schwefelhexafluorid - SF₆	59
Überblick	59
1 BaU-Emissionsprognose 2010 – Szenario I	59
2 Emissionsminderung bis 2010 – Szenario II	61
Anhang: Die Jahre 1995 bis 1997	64
1. Elektrische Betriebsmittel	65
1 SF ₆ -befüllte elektrische Betriebsmittel: Schaltanlagen und Wandler	65
1.1 <i>Schaltanlagen und -geräte der Hoch- und Mittelspannung</i>	65
1.2 <i>Hochspannungs-Meßwandler</i>	65
1.3 <i>Der inländische SF₆-Bestand in elektrischen Betriebsmitteln</i>	65
2 Inlandsverbrauch 1995-1997	66
3 Inlands-Emissionen 1995-1997	66
3.1 <i>Werksverluste der Hersteller</i>	66
3.2 <i>Montageverluste der Hersteller</i>	67
3.3 <i>Leckagen bei Betreibern</i>	67
3.4 <i>Wartungsverluste bei Betreibern</i>	67
4 Emissionsprognose bis 2010	68
4.1 <i>Künftige Werksverluste</i>	69
4.2 <i>Künftige Montageverluste</i>	69
4.3 <i>Künftige Betreiberemissionen</i>	69
4.4 <i>Summe von Hersteller- und Betreiberemissionen bis 2010</i>	70
5 Zur Vermeidung von Verschrottungsemissionen nach 2010	72

2. Schallschutzscheiben	73
1 SF ₆ als Schalldämmgas	73
2 Inlands-Verbrauch und -Emissionen 1995-1998	74
2.1 SF ₆ -Verbrauch 1995-1998	74
2.2 SF ₆ -Emissionen 1995-1998	75
2.2.1 Befüllungsverluste (Überfüllung)	75
2.2.2 Bestandsemissionen	75
2.2.3 Entsorgungsverluste	75
2.2.4 Menge und Zusammensetzung der Emissionen 1995-1998	76
3 BaU-Emissionsprognose bis 2010 - Szenario I	76
4 Relative Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II	78
5 Beitrag zum Treibhauseffekt im Vergleich der Szenarien I und II	80
3. Autoreifen	81
1 Erhöhte Druckstabilität dank SF ₆	81
2 Inlands-Verbrauch und -Emissionen 1995-1998	81
3 Sicherheits- und ökologische Bedenken gegen SF ₆ im Reifen	82
4 BaU-Emissionsprognose 2010 - Szenario I	84
5 Relative Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II	84
6 Beitrag zum Treibhauseffekt durch SF ₆ -Emissionen aus Autoreifen	85
7 SF ₆ -Alternativen	85
4. Magnesiumguß	86
1 Inlands-Verbrauch und -Emissionen 1995-1997	86
SF ₆ -Ersparnis durch neue Ofentechnologie	87
2 BaU-Emissionsprognose bis 2010 - Szenario I	88
3 Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II	89
4 Emissionsentwicklung im Vergleich beider Szenarien	90
5. Halbleiterfertigung	91
1 Inlands-Verbrauch und -Emissionen 1995-1997	91
2 BaU-Emissionsprognose 2010 - Szenario I	91
3 Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II	91
6. Sonstige Bereiche	92
1 Tandem-Teilchenbeschleuniger mit Van-de-Graaff-Generatoren	92
2 Hochspannungs-Elektronenmikroskope	93
3 Röntgen-Materialuntersuchungsgeräte	94
4 Röntgen-Therapiegeräte (Linearbeschleuniger)	95
5 Tracergas für die Untersuchung von Luftströmungen	95
6 Flugzeugradar	96
7 Reinigungsgas für Sekundäraluminiumguß	96
8 Sondergebiete einschl. Füllgas in Sportschuhen	97
9 Vermutete, aber nicht verifizierte SF ₆ -Anwendungen	97
10 Beitrag zum Treibhauseffekt 1995-1997	98
11 Emissionsprognose bis 2010	98
Nachweise zu SF₆	99
III. Perfluorierte Kohlenwasserstoffe - PFC	103
Überblick	103
1 BaU-Emissionsprognose 2010 - Szenario I	103
2 Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II	105
Anhang: Die Jahre 1995 bis 1997	108

1. CF₄ und C₂F₆ aus der Aluminiumelektrolyse	109
1 Der Anodeneffekt	109
1.1 Die Aluminium-Elektrolyse	109
1.2 Der plötzliche Spannungsanstieg	110
1.3 Löschung und Vermeidung des Anodeneffekts	110
1.4 Oxidzufuhr - Schlüssel zur Senkung der Anodeneffekt-Frequenz	111
1.4.1 Oxidzufuhr von der Seite (SWPB)	111
1.4.2 Einfache Zufuhr durch die Mitte (CWPB)	111
1.4.3 Punktdosierung durch die Mitte (PFPB)	111
2 Emissionen in Deutschland 1995-1997	112
3 BaU-Emissionsprognose 2010 - Szenario I	113
4 Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II	115
2. PFC als Halbleiter-Ätzgase	117
1 Verbrauch und Emissionen in Deutschland 1995-1997	117
2 BaU-Emissionsprognose 2010 - Szenario I	118
3 Relative Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II	118
3. CF₄ in der Leiterplattenfertigung	120
4. C₃F₈ als Kältemittel	121
1 Verbrauch und Emissionen in Deutschland 1995-1997	121
2 Emissionsprognose bis 2010	122
Nachweise zu PFC	123
IV. Fluorierte Gase in der Halbleiterfertigung	125
Vorbemerkung	125
1. Plasmaätzen mit fluorierten Gasen	125
2. Inlandsverbrauch 1995-1997	125
3. Emissionen 1995-1997 in Deutschland	126
3.1 FC-Umsetzungsraten im Plasma	126
3.2 FC-Abgasreinigung	127
3.3 Emissionen	128
3.4 Schematische Darstellung des FC-Stoffstroms 1997	129
4. BaU-Emissionsprognose bis 2010 - Szenario I	129
5. Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II	131
5.1 Technologische Umbrüche beim FC-Einsatz	131
5.2 Die Annahmen für eine Emissionsminderung 2010 gegenüber 1995	132
5.3 Minderungsszenario bis 2010	133
Nachweise FC-Halbleitergase	136
Tabellen	137
Diagramme und Abbildungen	140
Kenndaten fluorierte Verbindungen	142
Erläuterung	142

Emissionen und Minderungspotential von HFKW, FKW und SF₆ in Deutschland

Einleitung

Das von der 3. Vertragsstaatenkonferenz der Klimarahmenkonvention in Kyoto am 10. Dezember 1997 angenommene Protokoll verpflichtet die Industriestaaten erstmals in rechtsverbindlicher Form zur Reduktion der Treibhausgasemissionen. Weltweit sollen diese bis 2008/2012 gegenüber dem 1990er Niveau um 5,2% sinken. Einige Industrieländer, darunter die EU, haben sich zu einem höheren Reduktionsbeitrag verpflichtet. Nach einem Beschluß des EU-Ministerrats vom Juni 1998 ist die Bundesrepublik Deutschland an der EU-intern vereinbarten Lastenteilung überdurchschnittlich beteiligt. Deutschland verpflichtete sich, die Summe der Treibhausgas-Emissionen bis 2008/2012 um 21% vermindern.

Das Klimaprotokoll von Kyoto umfaßt nicht nur die Treibhausgase CO₂, Methan und Distickstoffoxid, sondern zusätzlich auch die fluorierten Gase HFKW (wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe), FKW (perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe bzw. PFC, wie sie nachfolgend in ihrer englischen Abkürzung bezeichnet werden) und SF₆ (Schwefelhexafluorid). Das Reduktionsziel um 5,2% (weltweit) oder um 21% (Deutschland) bezieht sich nicht auf jedes einzelne der sechs Gase, sondern auf ihre Summe oder ihren "Korb" (gas basket) in CO₂-Äquivalenten. Das allgemeine Bezugsjahr ist 1990; für die drei fluorierten Treibhausgase kann auch 1995 gewählt werden.

Die Klimawirksamkeit der fluorierten Verbindungen resultiert aus ihren langen, über mehrere Jahrzehnte (HFKW) bzw. Jahrhunderte (PFC, SF₆) reichenden atmosphärischen Verweilzeiten, verbunden mit hoher spezifischer Absorption im treibhausrelevanten infraroten Spektralbereich. Fluorierte Verbindungen stellen die mit Abstand treibhauswirksamsten Stoffe in der Atmosphäre dar. Das als Maßzahl zum Vergleich mit CO₂ als Referenzsubstanz herangezogene Global Warming Potential (GWP) liegt für HFKW und PFC im Bereich zwischen 1000 und 10 000, für SF₆ sogar bei 23 900.

Fluorierte Verbindungen wurden erst in den letzten Jahren auf ihre Klimarelevanz hin intensiver untersucht. Dabei wurde auch offenkundig, daß es über ihre Emissionsquellen auf der Erde zwar allgemeine Kenntnisse gibt, daß aber zu wenig konkretes Wissen über die quantitativen Beiträge der einzelnen Emissionsquellen vorliegt. In vielen Ländern wurden daher Untersuchungen angestellt mit dem Ziel, die Anwendungsgebiete fluoriertem Treibhausgas zu identifizieren, ihre aktuellen und künftigen Verbrauchs- und Emissionsmengen zu kalkulieren und Möglichkeiten zur Emissionsdämpfung abzuschätzen.

In diesem Zusammenhang entstand die vorliegende Studie über Emissionen treibhauswirksamer fluoriertem Verbindungen in Deutschland. Sie baut auf einer im Jahre 1996 im Auftrag des Umweltbundesamtes erstellten ersten Untersuchung über HFKW, PFC und SF₆ auf.¹

¹ Schwarz, W./Leisewitz, A. (Öko-Recherche): Aktuelle und künftige Emissionen treibhauswirksamer fluoriertem Verbindungen in Deutschland, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin, Dezember 1996.

Zusammenfassung

Ausgehend von den aktuellen Verbräuchen und Emissionen der drei fluorierten Treibhausgase HFKW, SF₆ und PFC in Deutschland zwischen 1995 und 1997 wird für jeden einzelnen ihrer Anwendungssektoren eine Emissionsprognose mit und ohne emissionsmindernde Maßnahmen bis zum Jahr 2010 erstellt.

Ein Business-as-Usual-Szenario nimmt an, daß gegenwärtige Nutzungstrends einschließlich heute bereits eingeleiteter Emissionsminderungen anhalten und schreibt diese bis 2010 fort. In einem Minderungsszenario werden aus heutiger Sicht realisierbare Potentiale zur Emissionsdämpfung oder Substitution in jedem einzelnen Sektor ausgeschöpft. Es werden nur solche Emissionsminderungen berücksichtigt, die nicht durch Nachteile an anderer Stelle in ihrer ökologischen Wirkung aufgehoben werden.

Eine Stabilisierung der Emissionen fluorierten Gase wird weder im BaU- noch im Minderungsszenario erreicht. Durch Minderungsmaßnahmen kann jedoch ihr Anstieg um 150% zwischen 1995 und 2010 auf einen Anstieg um etwa 34% begrenzt werden.

1 Emissionen 2010 von HFKW, FKW und SF₆ im BaU-Szenario

Im BaU-Szenario steigen die Emissionen von HFKW, SF₆ und PFC bis 2010 insgesamt von 11,1 auf 27,4 Mio. t CO₂-Äquivalente oder um 146% an (s. Tabelle I).

Am stärksten nehmen erwartungsgemäß die HFKW-Emissionen zu, die erst seit 1990 gezielt als Nachfolgestoffe für FCKW und HFCKW hergestellt werden. Sie wachsen von 1995 bis 2010 von 3,1 Mio. t CO₂-Äquivalente auf 19,8 Mio. t oder etwa um den Faktor 6. Der Anstieg der Gesamtemissionen der fluorierten Treibhausgase wird im wesentlichen durch die HFKW getragen (s. Tabelle I und Diagramm I).

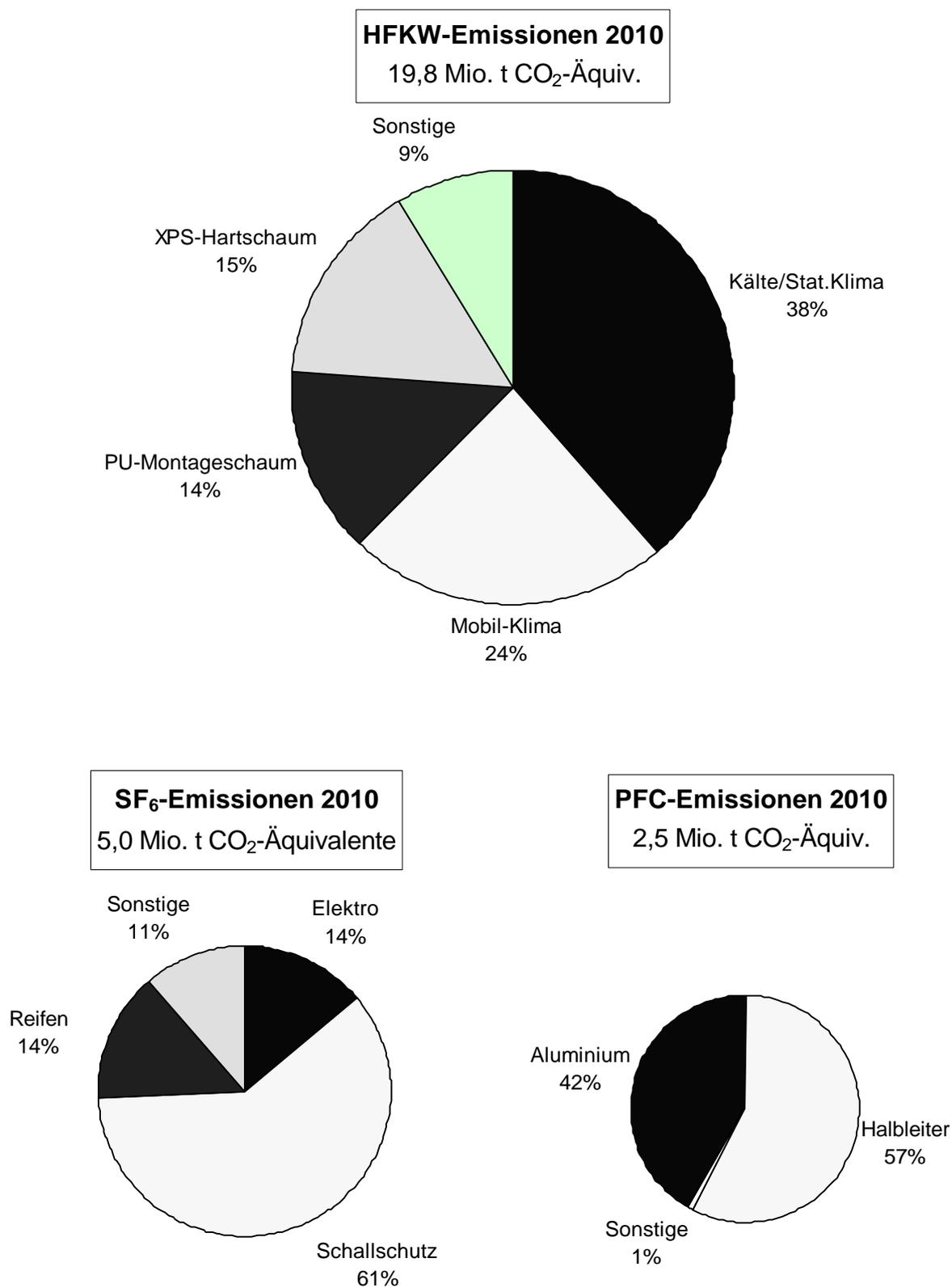
Tab. I: Emissionen der drei fluorierten Treibhausgase 1995-2010 nach BaU-Szenario in Mio. t CO₂-Äquivalente					
	1995	2000	2005	2010	1995-2010
1. HFKW	3,13	8,35	14,98	19,84	+ 534%
2. SF ₆	6,22	3,69	4,01	5,01	- 19%
3. PFC	1,76	1,83	2,03	2,52	+ 43%
Gesamt	1991,11	1998,87	2011,02	2022,37	+ 146%

Die SF₆-Emissionen sinken im gleichen Zeitraum von 6,2 auf 5,0 Mio. t CO₂-Äquivalente. Das ist ein Rückgang um 19%. Die PFC nehmen dagegen bis 2010 um 43% zu, nämlich von 1,8 auf 2,5 Mio. t CO₂-Äquivalente.

Emissionsquellen verschiedener Größe im BaU-Szenario

Über 86% der Emissionen fluorierten Treibhausgase oder 23,6 Mio. t CO₂-Äquivalente sind im Jahr 2010 aus den sieben größten der achtzehn Anwendungssektoren zu erwarten. Es sind vier Anwendungen von HFKW, eine Anwendung von SF₆ und zwei PFC-Emissionsquellen. Die nachfolgenden Kreisdiagramme stellen sie in ihren prozentualen Anteilen an den Emissionen der drei verschiedenen Treibhausgase dar.

Abb. 1: Emissionen von HFKW, SF₆ und PFC im Jahr 2010 nach einzelnen Quellen ohne Minderungsmaßnahmen
 Summe: 27,4 Mio. t CO₂-Äquivalente



In der Reihenfolge ihrer Emissionsgröße sind die wichtigsten Sektoren (vgl. Tabelle III), gemessen an der Summe der Emissionen aller drei Treibhausgase:

1. Kälte- und stationäre Klimaanlage (HFKW)	7,7 Mio. t CO ₂ -Äquiv.
2. Mobile Klimaanlage (HFKW)	4,7 Mio. t CO ₂ -Äquiv.
3. Schäumung von extrudierem Polystyrol (HFKW)	3,0 Mio. t CO ₂ -Äquiv.
4. Schallschutzscheiben (SF ₆)	3,0 Mio. t CO ₂ -Äquiv.
5. Polyurethan-Montageschaum (HFKW)	2,7 Mio. t CO ₂ -Äquiv.
6. Halbleiterfertigung (PFC)	1,4 Mio. t CO ₂ -Äquiv.
7. Aluminiumherstellung (PFC)	1,1 Mio. t CO ₂ -Äquiv.

2 Emissionen 2010 von HFKW, FKW und SF₆ im Minderungsszenario

Im Minderungsszenario sinken bis 2010 nicht nur die Emissionen von SF₆, sondern auch von PFC gegenüber dem Bezugsjahr 1995. Die SF₆-Emissionen halbieren sich, indem sie von 6,2 auf unter 3,0 Mio. t CO₂-Äquivalente zurückgehen (Tabelle II). Die PFC-Emissionen sinken von 1,8 auf 1,1 Mio. t CO₂-Äquivalente oder um 35%, statt - wie im BaU-Szenario - um 43% zu steigen.

	1995	2000	2005	2010	1995-2010
1. HFKW	3,13	7,59	10,67	10,77	+ 244%
2. SF ₆	6,22	3,53	2,66	2,95	- 53%
3. PFC	1,76	1,76	1,44	1,14	- 35%
Gesamt	1991,11	1997,88	2004,77	14,86	+ 34%

Die HFKW-Emissionen werden in ihrem Anstieg gedämpft. Dieser verläuft von 3,1 auf 10,8 Mio. t CO₂-Äquivalente (Tabelle II). Das ist ein Zuwachs um 244% und nicht um 534% wie im BaU-Szenario. Er ist aber noch groß genug, um die Gesamtemissionen aller fluorierten Treibhausgase gegenüber 1995 absolut um 34% wachsen zu lassen, von 11,1 auf 14,9 Mio. t CO₂-Äquivalente (Tabelle II).

Im Jahr 2010 beträgt das Minderungspotential der vorgeschlagenen Maßnahmen etwa 12,5 Mio. t CO₂-Äquivalente oder rd. 46%.

Das Minderungspotential der einzelnen Emissionsquellen

Für die Umweltpolitik ist außer der Größe der einzelnen Emissionsquellen wichtig zu wissen, welche Sektoren die günstigsten Chancen bieten, treibhauswirksame Emissionen einzudämmen. In der Regel weisen die stärksten Emissionsquellen auch das größte absolute Minderungspotential auf (vgl. Tabelle III).

Fünf der achtzehn Emissions-Sektoren haben in der Periode von 1995 bis 2010 ein Minderungspotential von mehr als 1 Mio. t CO₂-Äquivalente: die drei HFKW-Anwendungen Kälte- und stationäre Klimatechnik, PU-Montageschaum und XPS-Schäumung, die SF₆-Anwendung Schallschutzscheiben und die PFC-Anwendung Halbleiterfertigung (vgl. Tabelle III, rechte Spalte).

- Das größte Minderungspotential hat die Kälte- und stationäre Klimatechnik, die zugleich größte Emissionsquelle im BaU-Szenario ist. Die Emissionen nach dem Minderungsszenario betragen im Jahre 2010 statt 7,7 Mio. t CO₂-Äquivalente nur noch 4,1 Mio. t - 3,6 Mio. t weniger als im BaU-Szenario. Die Minderung resultiert aus einer allgemeinen Wartungspflicht für Kälte- und Klimaanlageanlagen über 1 kg Kältemittel. Diese allein senkt die Gesamt-Emissionen von HFKW, PFC und SF₆ (27,4 Mio. t CO₂-Äquivalente) um 13%.
- Um 9% sinken die Emissionen durch teilweise HFKW-Substitution bei Treibmitteln für PU-Montageschaum, und zwar durch einen 95%-igen Ersatz durch einfache Kohlenwasserstoffe. Dadurch können HFKW-Emissionen im Umfang von 2,7 Mio. t CO₂-Äquivalente auf 0,2 Mio. t zurückgeführt werden.
- Auch der drittgrößte Minderungseffekt gegenüber dem BaU-Szenario ergibt sich durch HFKW-Substitution. Wird bei rd. 40% der XPS-Schaumplatten auf HFKW zugunsten CO₂ plus Ethanol als Treibmittel verzichtet, können die Emissionen aus dieser Anwendung von 3 Mio. t CO₂-Äquivalente auf 1,7 Mio. t sinken. Die Emissionen aller betrachteten fluorierten Gase im Jahr 2010 (27,4 Mio. t CO₂-Äquivalente) gingen mit dieser Maßnahme um 1,3 Mio. t CO₂-Äquivalente oder um 5% zurück.
- Die viertgrößte Minderung der BaU-Gesamtemissionen kann in der Halbleiterindustrie bewirkt werden, wenn ab dem Jahr 2000 die Reinigung der Prozeßkammern konsequent auf ein neues Verfahren (Reinigung mit im Mikrowellenplasma vorge-spaltem NF₃) umgestellt wird. Von 1,4 Mio. t CO₂-Äquivalente sinken die PFC-Emissionen auf weniger als 0,2 Mio. t CO₂-Äquivalente. Die gesamten Emissionen der fluorierten Gase HFKW, PFC und SF₆ würden dadurch um über 4% gesenkt.
- Ein Minderungspotential von 1 Mio. t CO₂-Äquivalente könnte erschlossen werden, wenn zur Schalldämmung von Isolierglas kein SF₆ mehr neu eingesetzt wird. Von den 3 Mio. t CO₂-Äquivalente, die in 2010 aus Schallschutzscheiben emittieren, bleiben zwar noch 2 Mio. t Emissionen aus der jährlichen Fensterentsorgung. Es fallen aber die hohen Befüllungsverluste weg.

Tab. III: Anwendungssektoren fluorierter Treibhausgase nach Größe der 2010-Emissionen in Mio. t CO₂-Äquivalente nach beiden Szenarien			
Anwendung	Emissionen in Mio. t CO ₂ -Äquivalente		Minderungspotential*
	nach BaU-Szenario	nach Minderungsszen.	
1. Kälte/stationäres Klima	7,66	4,11	3,55
2. Mobile Klimaanlageanlagen	4,69	3,86	0,83
3. XPS-Schaum	3,04	1,73	1,31
4. Schallschutzscheiben	3,02	2,01	1,01
5. PU-Montageschaum	2,74	0,19	2,55
6. Halbleiter (PFC)	1,45	0,19	1,26
7. Aluminiumverhüttung	1,05	0,92	0,13
8. Autoreifen	0,72	0,00	0,72
9. Dosieraerosole	0,68	0,17	0,51
10. PU-Schaumprodukte	0,68	0,45	0,23
11. Rest	1,70	1,30	0,40
Summe	27,43	14,93	12,5

* Differenz zwischen BaU-Szenario und Minderungsszenario in Mio. t CO₂-Äquivalente.

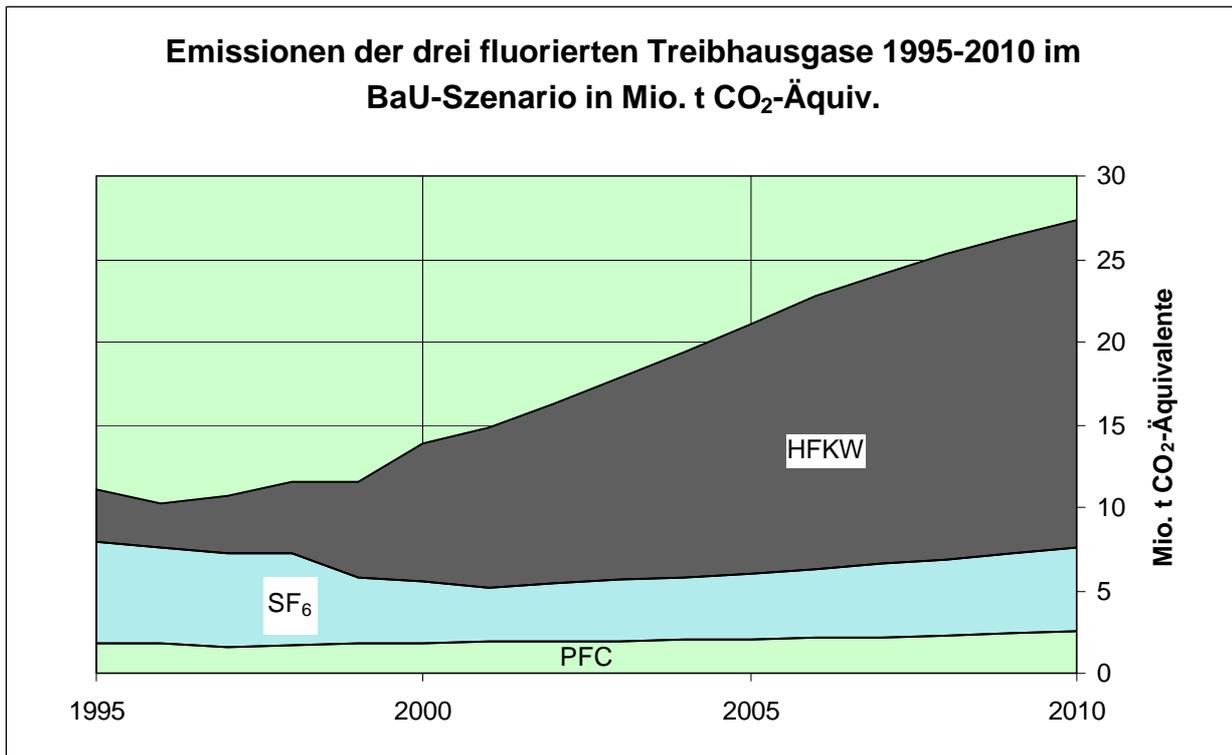


Diagramm I: Emissionen der drei fluorierten Treibhausgase 1995-2010 im BaU-Szenario in Mio. t CO₂-Äquivalente. Die starke Zunahme der Emissionen bis 2010 auf über 27 Mio. t CO₂-Äquivalente wird fast ausschließlich von den HFKW (dunkle Fläche oben) getragen. SF₆- und PFC-Emissionen (Flächen darunter) zusammengenommen sinken bis 2001, steigen danach bis 2010 aber wieder an.

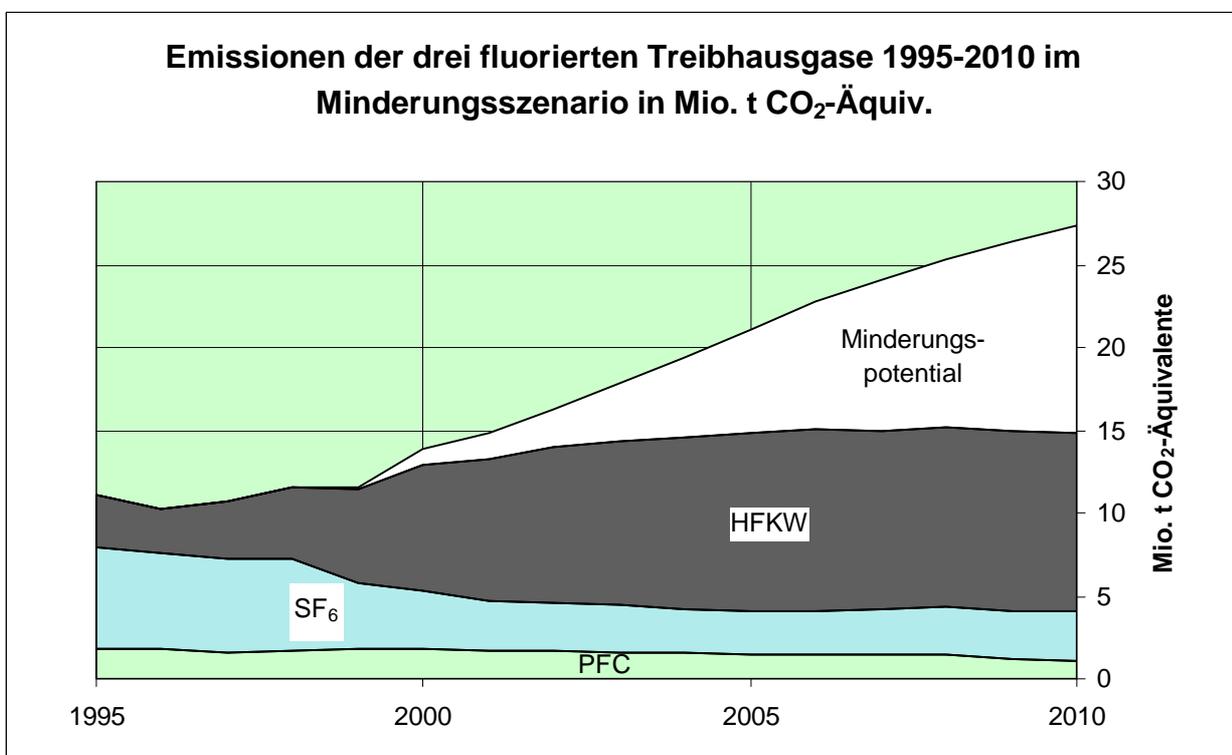


Diagramm II: Emissionen der drei fluorierten Treibhausgase 1995-2010 im Minderungsszenario in Mio. t CO₂-Äquivalente. Sowohl die SF₆- als auch PFC-Emissionen (untere Flächen) sinken zwischen 1995 und 2010. Entscheidend für das Minderungspotential (weiße Fläche oben) ab dem Jahr 2000 ist aber der im Vergleich zu Diagramm I moderate Anstieg der HFKW.

Zu den Sektoren mit Minderungspotential über 1 Mio. t CO₂-Äquivalente gehört im Grunde auch die zweitgrößte Emissionsquelle des BaU-Szenarios, die mobilen Klimaanlage. Zwar liegt ihr Minderungspotential 2010 erst bei 0,8 Mio. t CO₂-Äquivalente, aber nur, weil der emissionssenkende Faktor, die Kältemittel-Umstellung von HFKW auf CO₂, seine Wirkung erst einige Jahre später voll entfaltet.²

Mit den genannten sechs Maßnahmen könnten bereits 84% des gesamten Minderungspotentials (12,5 Mio. t CO₂-Äquivalente) ausgeschöpft werden (Tabelle III, rechts).

3 Folgerungen für eine Politik der Emissionsminderung

An dem Umstand, daß die Masse des Minderungspotentials der Emissionen fluoriierter Treibhausgase in sechs Anwendungssektoren konzentriert ist, kann sich eine Politik der Emissionsminderung orientieren, wenn sie Schwerpunkte setzen muß. Sie sollte jedoch nicht übersehen, daß in den übrigen zwölf Sektoren immerhin ein Minderungspotential von zusammen 2 Mio. t CO₂-Äquivalente enthalten ist.

Die Erinnerung daran ist umso wichtiger, als sich zeigt, daß selbst die Implementierung aller vorgeschlagenen Maßnahmen die Emissionen bis zum Jahre 2010 keineswegs unter den Stand des Bezugsjahres 1995 senken wird. Deutschland hat sich verpflichtet, die Summe aller Treibhausgasemissionen (fluorierte und nichtfluorierte Verbindungen) gegenüber 1995 um 21% zu vermindern. Die Ausschöpfung des hier veranschlagten Minderungspotentials für die drei Gruppen der fluorierten Treibhausgase führt aber sogar zu einer Steigerung der treibhauswirksamen Emissionen um 34%. Dieser Emissionszuwachs muß an anderer Stelle (CO₂, CH₄, N₂O) kompensiert werden. Schon von daher verbietet es sich, irgendeinen möglichen Reduktionsbeitrag treibhauswirksamer Emissionen auszulassen. Vielmehr sind Anstrengungen notwendig, weitere Minderungspotentiale zu erschließen.

Die Bedeutung der Emissionen von HFKW, SF₆ und PFC erscheint, gemessen an den deutschen Gesamtemissionen direkter Treibhausgase, relativ gering. Ihr zusammengefaßter Anteil an den Gesamtemissionen - ausgedrückt in CO₂-Äquivalenten (nach GWP mit Zeithorizont von 100 Jahren) - betrug 1995 ca. 1 Prozent. Dennoch wäre es aus ökologischer Sicht unangebracht, die fluorierten Treibhausgase zu vernachlässigen. Denn ohne Minderungsmaßnahmen wird sich im Jahr 2010 ihr Anteil an den gesamten direkten Treibhausgasemissionen auf etwa 3 Prozent erhöht haben. Dazu kommt, daß eine Umkehr des Emissionstrends für die mengenmäßig wichtigste Gruppe der fluorierten Gase, die HFKW, mittelfristig nicht in Sicht ist.

Im übrigen ist darauf zu verweisen, daß sich die treibhauswirksamen Gesamtemissionen aus einer Vielzahl von für sich genommen meist kleinen Einzelquellen speisen, die bei der notwendigen Reduktion der Treibhausgase alle auf Minderungsmöglichkeiten zu überprüfen sind.

² Nach dem Jahr 2020 könnten HFKW-Emissionen aus mobilen Klimaanlage ganz wegfallen, was eine Emissionsminderung um jährlich 4,7 Mio. t CO₂-Äquivalente bedeutet.

Anhang

Die Tabellen IV bis VII dienen der Vervollständigung der umweltrelevanten Emissionsdaten der fluorierten Treibhausgase in Deutschland.

Die Tabellen IV und V enthalten die Emissionen für die Stichjahre 1995, 2000, 2005 und 2010 in Tonnen pro Jahr: Tabelle IV nach BaU-Szenario und Tabelle V nach Minderungsszenario.

Tab. IV: Emissionen der drei fluorierten Treibhausgase 1995-2010 nach BaU-Szenario in t pro Jahr					
	1995	2000	2005	2010	1995-2010
1. HFKW	2135	9298	14361	18825	+ 782%
2. SF ₆	260	154	168	210	- 20%
3. PFC	258	259	181	340	+ 32%
Gesamt	4633	11696	16700	21370	+ 630%

Tab. V: Emissionen der drei fluorierten Treibhausgase 1995-2010 nach Minderungsszenario in t pro Jahr					
	1995	2000	2005	2010	1995-2010
1. HFKW	2135	7294	9421	9984	+ 368%
2. SF ₆	260	148	111	124	- 52%
3. PFC	258	250	204	165	- 36%
Gesamt	2653	7692	11726	12268	+ 287%

Die Tabellen VI und VII enthalten die realen Emissionen der Jahre 1995 bis 1997: Tabelle VI in Tonnen pro Jahr und Tabelle VII in Mio. t CO₂-Äquivalente.

Tab. VI Emissionen der drei fluorierten Treibhausgase 1995-1997 in t/a			
	1995	1996	1997
1. HFKW	2135	2435	2884
2. SF ₆	260	243	238
3. PFC	258	265	221
Summe	4646	4937	5338

Tab. VII: Emissionen der drei fluorierten Treibhausgase 1995-1997 in Mio. t CO₂-Äquivalente			
	1995	1996	1997
1. HFKW	3,13	2,58	3,45
2. SF ₆	6,22	5,81	5,70
3. PFC	1,76	1,83	1,55
Summe	2004,11	2004,22	2005,7

I. HFKW

Überblick

Seit Ende 1990 werden wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW) als ozon-schichtneutrale Ersatzstoffe für FCKW und HFCKW angeboten. Ihr gegenüber FCKW und HFCKW im allgemeinen deutlich geringeres, aber durchaus nennenswertes Treibhauspotential (GWP) wirft die Frage nach den durch sie bedingten Auswirkungen auf das Klima auf. Für die Entwicklung der von Deutschland ausgehenden künftigen HFKW-Emissionen werden nachfolgend bis zum Jahr 2010 in jedem Anwendungssektor jeweils zwei Szenarien aufgestellt, von denen jedes möglich und realistisch ist.

Szenario I ist ein Business-as-Usual-Szenario (BaU) und schreibt die gegenwärtigen Trends fort. Szenario II ist ein Minderungsszenario: In ihm werden aus heutiger Sicht realisierbare Potentiale zur Emissionsdämpfung bzw. Substitution in jedem HFKW-Sektor ausgeschöpft. Dabei kommen nur Emissionsminderungen infrage, die nicht durch Nachteile an anderer Stelle in ihrer ökologischen Wirkung neutralisiert werden.

Im - aus sechs sektoralen BaU-Szenarien zusammengefaßten - Gesamtszenario I steigen die Emissionen bis 2010 auf über 18 800 t, im Gesamtszenario II im gleichen Zeitraum nur auf knapp 10 000 t (53%). In Bezug auf den Treibhauseffekt führt Szenario I zu 19,8 Mio. t CO₂-Äquivalente, Szenario II nur zu 10,8 Mio. t. Das bedeutet eine Entlastung um 9 Mio. t CO₂-Äquivalente oder um 45%.

1 BaU-Emissionsprognose 2010 - Szenario I

Das Szenario I basiert für 1995 bis 2010 auf folgenden sektorspezifischen Annahmen¹:

1. In der Kälte- und stationären Klimatechnik werden alle noch vorhandenen HFCKW durch HFKW ersetzt. Die Substitution ist 2010 bei einem Kältemittelbestand von 30 000 t abgeschlossen. Die gegenwärtigen jährlichen Emissionsraten und Rückgewinnungsanteile bei der Entsorgung bleiben bis 2010 konstant.
2. Bei mobilen Klimaanlage hält der Anstieg der Pkw-Klimatisierung an, bis der gesamte Fahrzeugbestand eine Ausrüstungsquote von 75% erreicht hat. Der Kältemittelbestand umfaßt bei dieser Quote knapp 30 000 t HFKW (134a). Die Füllmenge der Klimaanlage sinkt jährlich um 1%, die Emissions- und Rückgewinnungsraten bleiben bis 2010 so groß wie gegenwärtig.
3. Beim PU-Montageschaum beträgt das jährliche Wachstum des inländischen Dosenabsatzes 5%. Die Treibmittelrelation zwischen 134a und 152a ist 2 zu 1. Die HFKW-Menge pro Normaldosis sinkt kontinuierlich von 75 auf 66 Gramm.
4. Bei PU-Schaumprodukten wird bei Kleinanwendungen ab 2004 das Treibmittel HFCKW-141b im Verhältnis 1 zu 1 durch neue flüssige HFKW ausgetauscht. Bei PU-Sandwichenelementen werden in 50% der Fälle HFCKW durch CO₂ mit HFKW-Zugaben ersetzt. (Die anderen 50% setzen keine halogenierten Treibmittel ein.)
5. Bei Dämmplatten aus XPS-Hartschaum erfolgt ab 2000 bei allen inländischen Herstellern der Treibmittelumstieg von HFCKW auf die HFKW-134a und 152a.
6. Bei Treibmitteln für Asthma-Dosieraerosole erfolgt bis 2004 der FCKW-Ersatz zu 100 Prozent durch HFKW-134a und 227. Die Treibmittelmenge bleibt gleich.
7. In der Halbleiterfertigung steigen die Emissionen von HFKW-23 im Maße des 6%-igen jährlichen Wachstums des Inlandsverbrauchs für das Strukturätzen.

¹ Der Bereich "Sonstiges" wird nicht nach zwei Szenarien getrennt. Seine Emissionen sind in beiden Gesamtszenarien gleich.

Unter diesen Annahmen ergeben sich für 1995-2010 für alle Sektoren zusammen die in Tabelle 1 dargestellten Emissionen. Sie steigen von 1995 bis 2010 rechnerisch von 2135 auf 18 825 Tonnen - auf fast das Neunfache.

Tab. 1: HFKW-Emissionen nach Sektoren nach BaU-Szenario I 1995-2010 in t pro Jahr				
	1995	2000	2005	2010
1. Kälte/Stationäre Klimaanlage	126	1219	2457	3180
2. Mobile Klimaanlage	126	1016	2352	3611
3. PU-Montageschaum	1680	1958	2437	3000
4. PU-Schaumprodukte	0	197	495	679
5. XPS-Hartschaum	0	4654	6013	7745
6. Dosieraerosole	0	120	400	400
7. Halbleiter	3	5	6	8
8. Sonstiges	200	129	201	202
Summe	2135	9298	14361	18825

- Die mit Abstand meisten HFKW-Emissionen, nämlich 7745 t oder 41%, gehen im Jahr 2010 von den Anlagen zur XPS-Schäumung aus (Tabelle 1, Zeile 5). Zu 20% handelt es sich um den HFKW-134a, zu 80% um den HFKW-152a. Die Relation bei den Emissionen unterscheiden sich stark von der Zusammensetzung des Verbrauchs, weil der HFKW-152a im ersten Jahr seiner Anwendung vollständig emittiert, während sich der HFKW-134a nur zu 25% im ersten Jahr verflüchtigt und zum größeren Teil im Produkt bleibt.
- Jeweils ca. 3000 t Emissionen gehen im Jahr 2010 von Kälte- und stationären Klimaanlage (3180 t), von mobilen Klimaanlage (3611 t) und vom PU-Montageschaum (3000 t) aus. Auf diese drei Sektoren entfallen 17%, 19% und 16% aller HFKW-Emissionen. Mobile Klimaanlage enthalten ausschließlich den HFKW-134a, für Montageschaum wird er zu zwei Drittel eingesetzt. Der Rest ist hier HFKW-152a. Von den großen HFKW-Anwendungen sind nur die Kälte- und stationären Klimaanlage keine Domäne von 134a oder 152a. Hier herrschen Mischungen definierter Zusammensetzung vor wie 404A/507, aber auch 410A und 407C. Deren Treibhauspotential ist überdurchschnittlich hoch.
- Gemäß Tabelle 2 (letzte Spalte) sind in 2010 die treibhauswirksamen Emissionen aus Kälte- und stationären Klimaanlage mit 7,66 Mio. t CO₂-Äquivalente mehr als doppelt so hoch wie die Emissionen vom XPS-Schäumen mit 3,04 Mio. t. Bei den emittierten HFKW verhält es sich umgekehrt. Vom XPS-Schäumen stammen 7745 t und von Kälte- und stationären Klimaanlage nur halb so viel: 3180 t. Der Hintergrund: Zum XPS-Schäumen wird in großer Menge der HFKW-152a eingesetzt, der das relativ niedrige GWP 140 hat. In Kälteanlagen überwiegt die Mischung 404A/507, die ein 23-fach höheres GWP aufweist, nämlich 3268.
- PU-Schaumprodukte (Integralschaum, Hartschaum in Kleinanwendungen und in Sandwichelementen) und Dosieraerosole bilden mit 679 t bzw. 400 t Emissionen (2010) kleinere HFKW-Sektoren. Allerdings besteht ihr Beitrag zum Treibhauseffekt aus jeweils 0,68 Mio. t CO₂-Äquivalente - zusammen über 1,3 Mio. t. PU-Schaum enthält neben dem HFKW-134a die neuentwickelten HFKW-245fa/365mfc (GWP 815), Dosieraerosole enthalten HFKW-134a oder den HFKW-227 (GWP 2900).

Tab. 2: HFKW-Emissionen nach Sektoren 1995-2010 nach BaU-Szenario I in Mio. t CO₂-Äquivalente				
	1995	2000	2005	2010
1. Kälte/Stationäre Klimaanlage	0,28	2,90	5,93	7,66
2. Mobile Klimaanlage	0,16	1,32	3,06	4,69
3. PU-Montageschaum	1,36	1,74	2,17	2,74
4. PU-Schaumprodukte	0	0,26	0,51	0,68
5. XPS-Hartschaum	0	1,73	2,31	3,04
6. Dosieraerosole	0	0,19	0,68	0,68
7. Halbleiter	0,04	0,05	0,07	0,10
8. Sonstiges	1,29*	0,16	0,25	0,25
Summe	3,13	8,35	14,98	19,84

* Der hohe Wert ergibt sich aus 1995 letztmalig (bis Jahresmitte) als Nebenprodukt der Synthese von HFCKW-22 freigesetzten 100 t HFKW-23 mit dem hohen GWP 11 700.

- Unter "Sonstiges" fallen die Emissionen von HFKW als Treibmittel und Lösemittel in technischen Aerosolen, als Feuerlöschmittel und (nur bis Mitte 1995) aus der Nebenreaktion der HFCKW-22-Synthese. Wegen dieses HFKW-Nebenprodukts war der Beitrag zum Treibhauseffekt 1995 sehr hoch (vgl. Tabelle 2). Er ist 2010 mit 0,25 Mio. t CO₂-Äquivalente viel geringer. Lediglich die Emissionen des HFKW-23 aus der Halbleiterfertigung sind mit 0,10 Mio t CO₂-Äquivalente kleiner. Es ist aber - dies als grundsätzlicher Vorbehalt - nicht auszuschließen, daß bis zum Jahr 2010 weitere Anwendungen von HFKW dazukommen, die heute noch nicht bekannt sind.

2 Relative Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II

Das Minderungsszenario beruht für 1995-2010 auf folgenden sektoralen Annahmen:

1. In der Kälte- und stationären Klimatechnik wird bis 2003 gesetzlich eine regelmäßige Wartung für Anlagen über 1 kg Kältemittel eingeführt. Dadurch sinken die laufenden sowie die Entsorgungs-Emissionen aus den betreuten Anlagen um die Hälfte.
2. Bei mobiler Klimatisierung (Straßenfahrzeuge) wird von 2007 bis 2009 generell die HFCKW-Klimaanlage durch die Anlage mit dem Kältemittel CO₂ abgelöst.
3. Bei PU-Montageschaum erfolgt ab 2000 schrittweise der Treibmittelumstieg auf halogenfreie (brennbare) Kohlenwasserstoffe, und zwar bis auf 5% HFKW-Rest für sicherheitsrelevante Anwendungen.
4. Bei PU-Schaumprodukten wird bei Kleinanwendungen das Treibmittel HFCKW-141b ab 2004 nur zur Hälfte durch flüssige HFKW ausgetauscht, und bei Sandwichelementen wird nur in 25% der Fälle (statt 50%) als Treibmittel CO₂ mit HFKW-Zugaben eingeführt. Alternativen sind jeweils Pentan oder CO₂ ohne HFKW.
5. Bei Dämmplatten aus XPS-Hartschaum wird bereits ab 2000 bei fast der Hälfte der inländischen Produktion statt HFKW als Treibmittel CO₂ plus Ethanol eingesetzt.
6. Bei Asthma-Dosieraerosolen erfolgt der FCKW-Ersatz nur zu 25% durch HFKW. In der Hauptsache setzen sich die Pulverinhalatoren durch.
7. In der Halbleiterfertigung werden ab dem Jahr 2000 neue Ätzkammern nur noch mit hocheffizienter Abgasreinigung installiert. Ab 2009 werden auch die Altanlagen durch neue ersetzt, die über Einrichtungen zur HFKW-Spaltung im Abgas verfügen.

Unter diesen Bedingungen ergeben sich für die Zeit bis 2010 für alle Sektoren zusammen die Emissionen lt. Tabelle 3. Sie steigen von 1995 bis 2010 von 2135 auf nur 9984 Tonnen. Das sind im Jahr 2010 etwa 47% weniger als nach Szenario I.

**Tab. 3: HFKW-Emissionen nach Sektoren nach Minderungsszenario II
1995-2010 in t pro Jahr**

	1995	2000	2005	2010
1. Kälte/Stationäre Klimaanlage	126	1219	1800	1721
2. Mobile Klimaanlage	126	1016	2322	2969
3. PU-Montageschaum	1680	1958	1053	150
4. PU-Schaumprodukte	0	197	413	426
5. XPS-Hartschaum	0	2653	3427	4415
6. Dosieraerosole	0	120	200	100
7. Halbleiter	3	4	4	1
8. Sonstiges	200	129	201	202
Summe	2135	7294	9421	9984

- Die XPS-Schäumung ist 2010 auch nach Szenario II größte Quelle von HFKW-Emissionen (4415 t), obwohl diese um 43% niedriger als in Szenario I sind.
- An zweiter Stelle folgen die mobilen Klimaanlage (2969 t). Deren relativ kleine Emissionsminderung um 18% gegenüber Szenario I im Jahr 2010 ist Folge der späten, ab 2007 beginnenden Einführung HFKW-freier Systeme. Zehn Jahre später könnten die Emissionen aus Fahrzeugklimaanlagen bereits der kleinste aller HFKW-Emissionssektoren sein - mit Tendenz gegen Null.

**Tab. 4: HFKW-Emissionen nach Sektoren nach Minderungsszenario II
1995-2010 in Mio. t CO₂-Äquivalente**

	1995	2000	2005	2010
1. Kälte/Stationäre Klimaanlage	0,28	2,90	4,30	4,11
2. Mobile Klimaanlage	0,16	1,32	3,02	3,86
3. PU-Montageschaum	1,36	1,74	0,96	0,19
4. PU-Schaumprodukte	0	0,26	0,43	0,45
5. XPS-Hartschaum	0	0,99	1,32	1,73
6. Dosieraerosole	0	0,19	0,34	0,17
7. Halbleiter	0,04	0,05	0,05	0,01
8. Sonstiges	1,29	0,16	0,25	0,25
Summe	3,13	7,59	10,67	10,77

- Nach dem Beitrag zum Treibhauseffekt (vgl. Tabelle 4) bleiben auch im Jahr 2010 Kälte- und stationäre Klimaanlage größte Emittentengruppe, auch wenn ihre Emissionen von 7,66 Mio. t CO₂-Äquivalente (Szenario I) auf 4,11 Mio. t sinken.
- Den mit über 90% stärksten Rückgang haben im Szenario II die Emissionen vom PU-Montageschaum. Nur noch 150 t statt 3000 t HFKW dienen als Treibmittel.
- Gemessen an den Emissionen nach Szenario I betragen die Emissionen aus Dosieraerosolen nur noch 25%, aus der Halbleiterindustrie nur noch 10%. Weniger stark ist der Emissionsrückgang bei den PU-Schaumprodukten.

Die unterschiedliche Emissionsentwicklung nach Szenario I und II für den ganzen Zeitraum 1995 bis 2010 wird grafisch in den Diagrammen 1 und 2 sichtbar:

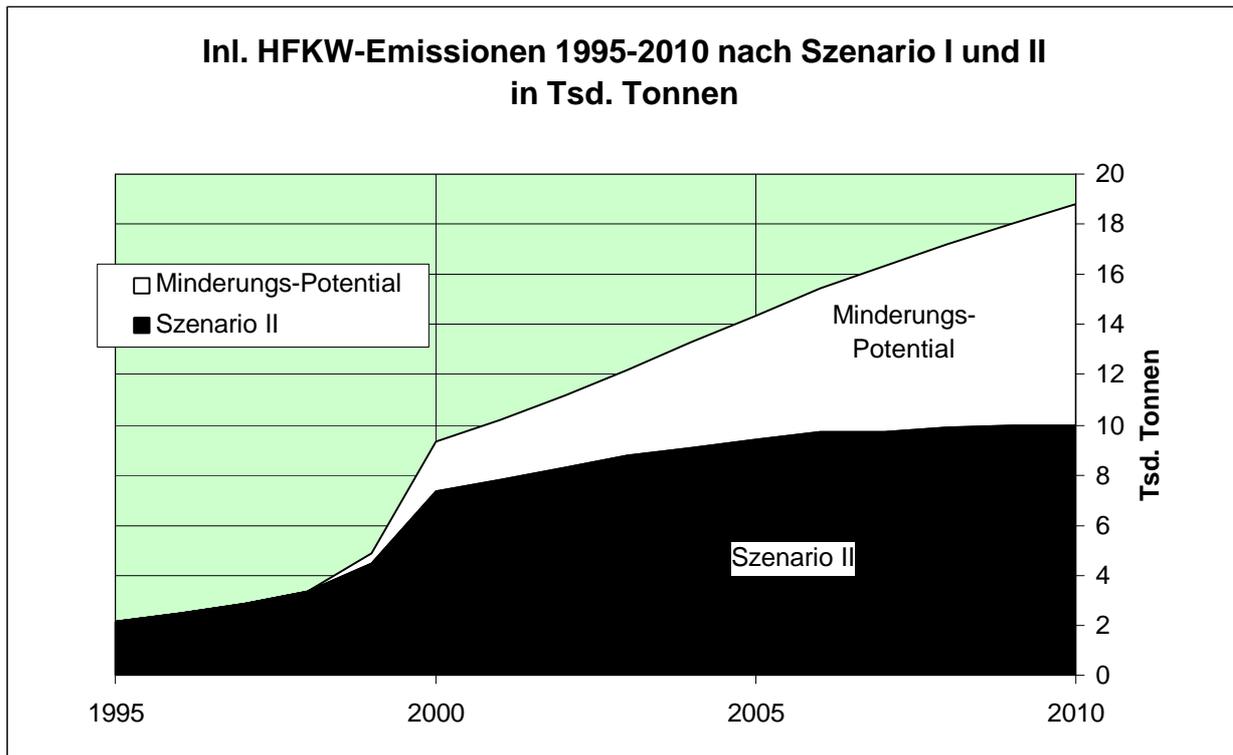


Diagramm 1: Inländische HFKW-Emissionen bis 2010 nach Szenario I und II in Tsd. Tonnen. Nach dem infolge des HFCKW-Ersatzes sprunghaften Anstieg um das Jahr 2000 entwickeln sich im Szenario II die Emissionen auf relativ gleichmäßigem Niveau und begründen bis 2010 eine wachsende Differenz zu den Emissionen nach Szenario I (Minderungspotential).

Diagramm 2 zeigt einen Anstieg der CO₂-Äquivalente nach Szenario I auf fast 20 Mio. t. Im Minderungsszenario liegen die Emissionen im Jahr 2010 nur wenig über 10 Mio. t.

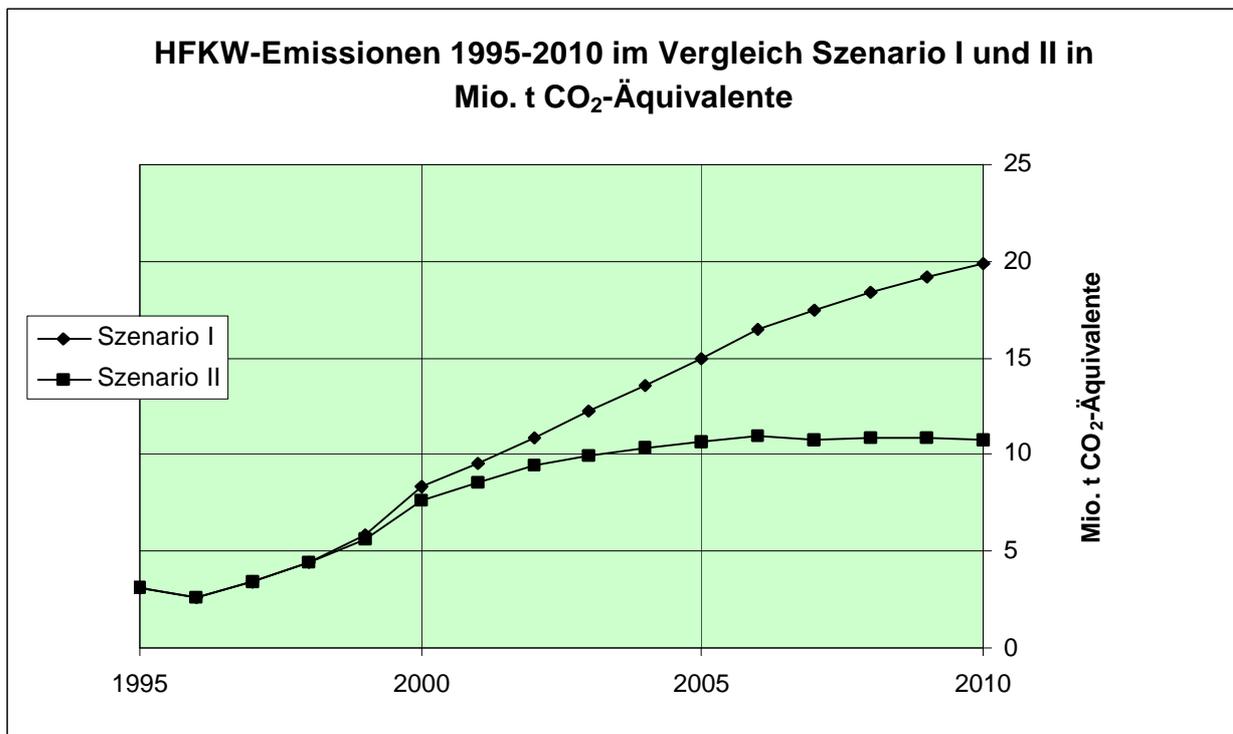


Diagramm 2: HFKW-Emissionen 1995-2010 im Vergleich Szenario I und II in Mio. t CO₂-Äquivalente. Die Emissionen steigen bis 2010 nach Szenario I auf fast 20 Mio. t CO₂-Äquivalente an. Im Szenario II beträgt der Wert im Jahre 2010 nur 54% davon.

Anhang : Die Jahre 1995 bis 1997

Die Tabellen 5 und 6 dienen der Vervollständigung der umweltrelevanten Emissionsdaten für die Jahre 1996 und 1997.

Emissionen 1995-1997 in Jahrestonnen

Tab. 5: Emissionen von HFKW nach Sektoren 1995-1997 in t/a			
	1995	1996	1997
1. Kälte/Stationäre Klimaanlage	126	289	510
2. Mobile Klimaanlage	126	233	386
3. PU-Montageschaum	1680	1749	1805
4. PU-Integralschaum	0	60	70
5. Dosieraerosole	0	0,2	9
6. Halbleiter	3	4	4
7. Sonstiges	200	100	100
Summe	4133	4434,2	4884

Beitrag zum Treibhauseffekt 1995-1997

Tab. 6: Emissionen von HFKW nach Sektoren 1995-1997 in Mio. t CO₂-Äquivalente			
	1995	1996	1997
1. Kälte/Stationäre Klimaanlage	0,28	0,65	1,18
2. Mobile Klimaanlage	0,16	0,30	0,50
3. PU-Montageschaum	1,36	1,39	1,48
4. PU-Integralschaum	0	0,08	0,09
5. Dosieraerosole	0	0,00	0,01
6. Halbleiter	0,04	0,05	0,05
7. Sonstiges	1,29	0,12	0,12
Summe	3,13	2,58	3,45

1 Kälte- und stationäre Klimaanlage

In diesem Kapitel geht es erstens um stationäre und mobile Kühlanlagen für Waren und Prozesse und zweitens um stationäre Klimaanlage für Gebäude. (Mobile Klimaanlage sind dem 2. Kapitel vorbehalten.) Der fragliche Bereich lässt sich in acht Sektoren gliedern, die nach ihrem Schätzanteil am inländischen Gesamtbestand halogenierter Kältemittel (FCKW, HFCKW, HFKW) wiedergegeben werden:

1. Gewerbekälte (ca. 40%).
 2. Mittelgroße Industriekälte mit Kolbenverdichteranlagen (20%).
 3. Kleinkühlgeräte unter 1 kg Kältemittel in Industrie und Gewerbe (20%).
 4. Große Industriekälte und große Klimaanlage (6-7%).
 5. Raumklimageräte bis 2 kg Kältemittel (5%).
 6. Mittelgroße Klimaanlage mit Kolbenverdichtern (3-4%).
 7. Transportkälte (2-3%)
 8. Haus-Wärmepumpen bis 2 kg Füllmenge (ca. 1%).
- Vor 1991 wurden in den acht Sektoren im wesentlichen drei Kältemitteln benutzt. FCKW-12 (R12) kühlt im normalen Temperaturbereich (0°C/+10°C) und das FCKW/HFCKW-Gemisch R502 bei Tieftemperaturen (-25°C/-10°C). Das quantitativ wichtigste Kältemittel HFCKW-22 (R22) wurde zur Kühlung bei mittleren Temperaturen und darüber hinaus in der Mehrzahl der Klimaanlage eingesetzt.
 - Aufgrund ähnlicher chemisch-physikalischer Eigenschaften sind HFKW die Mittel der Wahl, um jene chlorhaltigen ozonschichtschädigenden Substanzen zu ersetzen. Als Substitute kommen jedoch auch halogenfreie Stoffe infrage. Im Zuge des FCKW-Ausstiegs kam es in der zweiten Hälfte der 80er Jahre allenthalben zu einer Wiederentdeckung und Weiterentwicklung von Stoffen und Verfahren, die wegen der günstigen stofflichen Eigenschaften der FCKW (Unbrennbarkeit, Unpolarität, Ungiftigkeit) durch diese verdrängt und jahrzehntelang vernachlässigt worden waren. Das führte zum Verlust zahlreicher ehemaliger FCKW-Anwendungen an Verfahren und Stoffe ohne schädigende Wirkung auf Ozonschicht und Klima.
 - Die Suche nach langfristig versorgungssicheren Alternativen findet auch in der Kältetechnik statt, wo HFKW in Teilbereichen der Konkurrenz der Kältemittel Ammoniak, Kohlenwasserstoffe oder CO₂ ausgesetzt sind. So fehlt bei der Aufzählung der acht Sektoren der Kühl- und Klimaanlage einer, der in anderen Industrieländern bis zu 20% des Kältemittelbestandes ausmacht: Haushaltskühlgeräte. Diese werden in Deutschland mit Isobutan (R600a) gekühlt. R134a spielte hier nur vor 1994/95 eine vorübergehende Rolle².
 - Ein vergleichbares Ausscheiden eines ganzen HFKW-Anwendungsbereichs ist in den übrigen kälte- und klimatechnischen Sektoren nicht erfolgt und aus heutiger Sicht nicht zu erwarten. Vereinfacht gilt: R12 wurde und wird durch HFKW-134a und R502 und R22 wurden und werden durch die HFKW-Gemische R404A/R507 ersetzt. Für einige R22-Kühl- und die meisten R22-Klimaanwendungen sind die HFKW-Gemische 407C oder 410A geeignet. In den acht Sektoren werden die vier HFKW-Kältemittel 134a, 404A/507, 407C und 410A mittelfristig den Hauptteil der FCKW und HFCKW ersetzen.

² Im inländischen HFKW-Kältemittelbestand sind jene Haushaltsgeräte mit ca. 400 t 134a zusätzlich enthalten. Wegen der geringen Betriebsemissionen (<1%) kommen sie in dieser Studie nicht weiter vor.

- Tempo und Zeitpunkt der FCKW-Substitution durch HFKW hängen, abgesehen von der Marktverfügbarkeit der HFKW, von technischen und politischen Faktoren ab.

Der technische ist: Für den FCKW-Ersatz durch HFKW reicht bloßer Kältemittelwechsel in vorhandenen Kälte- und Klimaanlage selten aus. Dem Betrieb mit HFKW sind viele Bauteile und Prozeßhilfsmittel anzupassen, so daß ihr Einsatz praktisch oder tatsächlich eine neue Anlage bedingt. Reine HFKW werden daher meist erst beim Ersatz einer alten durch eine neue Kälte-Klimaanlage verwendet.

Soweit der Gesetzgeber, wie Ende 1995 in Deutschland für das Kältemittel R12, den FCKW-Ausstieg aus noch intakten Anlagen verlangte, nahmen ihre Betreiber nur in geringem Umfang vorzeitige Investitionen in HFKW-geeignete Anlagen vor. Vielmehr griffen sie die Angebote der Chemischen Industrie auf, Altanlagen bis zum Ende ihre Lebensdauer mit sogenannten Drop-In-Kältemitteln weiterzubetreiben (Schwarz/Leisewitz 1998). Das sind Kältemischungen, die zwar meist HFKW enthalten, aber zum bestimmenden Teil aus HFCKW, insbesondere R22, bestehen.³

Der politische Faktor ist der national gültige Zeitplan des FCKW-Ausstiegs. So sind EU-weit zwar seit 1995 alle vollhalogenierten FCKW verboten (R12, R502), aber teilhalogenierte sind nach der EU-Neuregelung (EC 98) für kältetechnische Neuanlagen erst ab 2001 und zur Altanlagen-Befüllung ab 2010 verboten. In Deutschland ist dagegen der HFCKW-22 in Neuanlagen aufgrund der FCKW-Halon-Verbots-Verordnung schon ab 1.1.2000 nicht mehr erlaubt.

- In Deutschland, wo nach 1999 keines der drei traditionellen Kältemittel mehr in Neuanlagen verwendet werden darf, ist der Druck auf die Hersteller kältetechnischer Anlagen besonders groß, rechtzeitig Ersatzstoffe auf den Markt zu bringen und auf diese Weise die Einführung der HFKW zu beschleunigen.

1 Inlands-Neuverbrauch und Emissionen 1995 - 1997

- Der jährliche Neuverbrauch von HFKW-Kältemitteln für inländische Anwendungen hat sich von 1995 bis 1997 von 1144 t auf 2418 t verdoppelt (Befragung Kältemittelhersteller).
- Die mit Abstand wichtigsten reinen HFKW-Kältemittel sind der Einstoff 134a und die Gemische 404A bzw. 507, die beide hauptsächlich aus 125 und 143a bestehen und in dieser Studie als einheitliches Kältemittel behandelt werden. Der Anteil von 134a und 404A/507 an den jährlichen Neuverbräuchen beträgt zusammen über 90%. Der Rest entfällt zu geringem Teil auf die Kältemittel R23, R407C und R410A und zu größerem Teil auf solche HFKW, die nur Komponenten in R22-basierten Drop-In-Kältemitteln sind. Vgl. Tabelle 7.

³ Dieser Punkt ist wichtig, weil die Vorgängerstudie (Schwarz/Leisewitz 1996) noch davon ausging, daß das FCKW-12-Verbot in Altanlagen einen sprunghaften Anstieg des Verbrauchs von 134a auslösen würde. Rückblickend müssen die für 1996 und 1997 vorausgesagten Verbräuche neuer Kältemittel zwar nicht in ihren absoluten Mengen korrigiert werden, aber in ihrer Zusammensetzung. Der reale Verbrauch von 134a (nicht von 404A/507) lag um 40% unter der Prognose. Die Differenz kam vor allem den neuen R22-haltigen Drop-In-Kältemitteln für Altanlagen zugute.

Tab. 7: Inl. Verbrauch und lfd. Emissionen von HFKW-Kältemitteln aus Kälte- und stationären Klimaanlage 1995-1997 in t und Mio. t CO₂-Äquiv.						
Kältemittel	1995		1996		1997	
	Verbrauch	Emission	Verbrauch	Emission	Verbrauch	Emission
134a	667	65	878	142	1067	229
404A/507	369	38	877	105	1141	215
Sonstige HFKW*	108	23	130	42	210	66
Summe in t	1144	126	1885	289	2418	510
Mio. t CO ₂ -Äquiv.		0,28		0,65		1,18

* 407C, 410A, 23; Drop-In-Komponenten: 125 aus 402A (60%), 408A (7%), 152a aus 401A/B (13%), 143a aus 408A (46%).

- Bei den beiden Hauptkältemitteln weist das Verbrauchswachstum von 404A/507 eine stärkere Dynamik als 134a auf. Gegenüber 134a war der Inlandsverbrauch von 404A/507 in 1995 noch deutlich geringer, 1996 lag er gleichauf, und seit 1997 ist 404A/507 mit 1141 t das verbrauchsstärkste Kältemittel (s. Tabelle 7).

Dafür gibt es Ursachen auf der Seite von R134a und auf der Seite von R404A/507:

Erstens hat 134a seit 1996 nicht in erwartetem Ausmaß die Rolle des aus Altanlagen binnen zweier Jahre (bis Mitte 1998) zu entfernenden FCKW-12 übernehmen können. Anders als bei Turboverdichter-Großanlagen wurde in der Gewerbekälte R12 zu ca. 50% durch R22-haltige Drop-In-Stoffe ersetzt - vor allem R401A, das nur zu 13% aus HFKW (152a) besteht (Schwarz/Leisewitz 1998, VI).

Zweitens hat der nahende Verbotstermin für R22 (1.1.2000) die Käufer von Neuanlagen, die R22-Anlagen ersetzen, in Richtung längerfristige Produktsicherheit sensibilisiert. Anlagen mit R22 haben gegen gleichartige Anlagen mit dem Kältemittel 404A/507 kaum mehr Marktchancen. Das starke Wachstum von 404A/507 geht in erheblichem Maß auf Kosten von R22.

- Obwohl auch 407C und 410A Ersatzstoffe für das auslaufende R22 sind - schwerpunktmäßig im Klimabereich -, ist ihr Verbrauch noch gering. Dies hängt mit dem Weltmarkt für Klimaanlage und -geräte zusammen, der von großen nordamerikanischen und fernöstlichen Unternehmen bestimmt wird. Der europäische Markt beträgt bei Klimaanlage nur 6% des Weltmarkts (Bailly 1998), und im Unterschied zu Deutschland ist in den großen Absatzländern R22 noch lange erlaubt. Außerdem verlangt 410A neue, druckfestere Komponenten, die erst seit kurzem verfügbar sind.
- Werden auf die acht Kältemittelbestände der Jahre 1995 bis 1997⁴, die aus den akkumulierten Verbräuchen der Jahre 1993 bis 1997 resultieren (Befragung Kältemittelhersteller), jeweils spezifische Emissionsraten⁵ angelegt, zeigen sich die Schätzwerte für die laufenden HFKW-Emissionen lt. Tabelle 7. In der Summe sind sie von 126 t (1995) über 289 t (1996) auf 510 t im Jahre 1997 angestiegen (vgl. Diagramm 3). Wie die Neuverbräuche bestehen auch die Emissionen zu fast 90% aus R134a und R404A/507, die wiederum beide etwa gleich groß sind.

⁴ Gemäß IPCC-Vorschlag ist die Summe der halben Bestände des Jahres n-1 und des Jahres n Bezugsgröße für die Emissionsraten, um laufende Emissionen des Jahres n abzuschätzen (IPCC 1999).

⁵ Zu ihrer Ermittlung siehe nächsten Abschnitt.

- Größter Einzelemittent ist die Gewerbekälte, von der 1997 ca. 77% der HFKW-Emissionen ausgingen. An zweiter Stelle folgt die Transportkälte mit 5% der Gesamtemissionen. Beides sind Sektoren mit hohen Emissionsraten (20 bzw. 15%).
- Der Beitrag zum Treibhauseffekt in CO₂-Äquivalenten aus allen acht Sektoren stieg von 1995 bis 1997 von 0,28 auf 1,18 Mio. Tonnen an - siehe Diagramm 3. (Der Schätzwert für 1998 beträgt 1,73 Mio. t.)

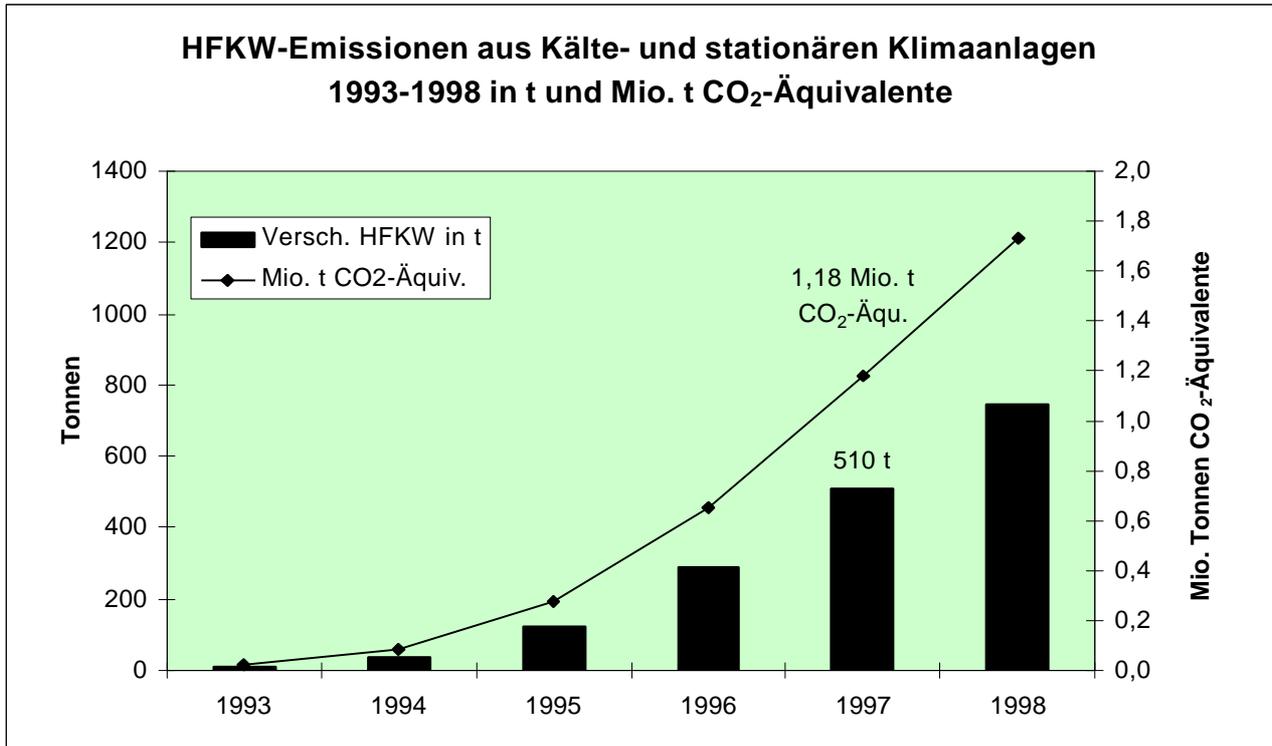


Diagramm 3: HFKW-Emissionen aus Kälte- und stationären Klimaanlage 1993-1998 in t und Mio. t CO₂-Äquivalente. Die HFKW-Emissionen (linke Achse) stiegen von 1995 bis 1997 von 126 auf 510 t (Säulen). Die Emissionen in CO₂-Äquivalenten (rechte Achse) stiegen entsprechend von 0,28 auf 1,18 Mio. t an (Linie). Das Diagramm enthält auch den Schätzwert für 1998: 746 t und 1,73 Mio. t CO₂-Äquivalente.

2 BaU-Emissionsprognose 2010 - Szenario I

Für prognostische Abschätzungen der HFKW-Emissionen aus den Sektoren der Kälte- und stationären Klimaanlage sind folgende Eckdaten erforderlich:

- Umfang der sektoralen HFKW-Bestände nach völligem FCKW-/HFCKW-Ersatz.
- Zusammensetzung dieser Bestände nach verschiedenen HFKW-Kältemitteln.
- Sektorspezifische Emissionsraten aus dem laufenden Betrieb.
- Rate der Kältemittel-Rückgewinnung bei der Entsorgung.
- Mittlere Anlagenlebensdauer (wegen des Zeitpunkts erster Entsorgungsemissionen).

Bis auf die Rückgewinnungsrate, für die mangels empirischer Basis generell ein vom IPCC (IPCC 99) vorgeschlagener Standardwert von 70% der ursprünglichen Kältemittelfüllung unterstellt wird, sind alle dem Emissionsmodell 2010 zugrundeliegenden Bestimmungsfaktoren (Eckdaten) in der Tabelle 8 wiedergegeben. Diese Transparenz soll die Prognosedaten nachvollziehbar machen.

Tab. 8: Eckdaten zur Bestimmung der HFKW-Emissionen aus Kühlanlagen und stationären Klimaanlage 1997 und 2010*

Anwendungen	Kältemittel	Bestand 1997	Bestand 2010
1. Haus-Wärmepumpen (LD 15a)			
~ 1,5 kg	ER 3,3%	22 t	80%
~ 0,6 kg	ER 2,5%		20%
	407C	250 t	80%
	410A		20%
2. Gewerbekälte (LD 10a)			
Neuanlagen	ER 15%	2774 t	134a
			404A/507
			407C
			410A
Altanlagen	ER 20%	507 t	12450 t
			152a 401
			125402/408
			143a 408
			134a 413
3. Großkälte u. Großklima (LD 25a)			
Turboverdichter	ER 5%	515 t	134a
Schraubenverd.			407C
			410A
			2000 t
4. Mittlere Industriekälte (LD 15a)			
Kolbenverdichter	ER 6%	418 t	134a
			404A/507
			23
			407C
			410A
			6000 t
5. Mittlere Klimaanlage (LD 15a)			
Kolbenverdichter	ER 5%	6 t	407C
			410A
			1000 t
6. Raumklimageräte (LD 15a)			
~ 1,5 kg	ER 2%	6 t	407C
			410A
			1500 t
7. Kleingeräte Ind./Gewerbe (LD 10a)			
< 1 kg	ER 1,5%	1150 t	134a
			404A/507
			407C
			6000 t
8. Transportkälte			
Kühl-Lkw LD10a	ER 20%	150 t	134a
			404A/507
			410A
			152a
Container LD15a	ER 10%	96 t	100%
Kühlschiffe LD30a	ER 25%	0 t	0%
			350 t
			29%
			54%
			17%
			0%
			370 t
			100%
			80 t
			100%
Summe/Durchschn.	ER 9%	5644 t	30000 t

Abkürzungen: ER = laufende Emissionsrate pro Jahr; LD = Lebensdauer in Jahren (a).

* Erläuterungen im nachfolgenden Text.

Das Zahlenwerk der Tabelle 8 ist eine Weiterentwicklung des 1996 verwendeten Schemas (Schwarz/Leisewitz 1996, 91).

Sowohl für die Aufgliederung des Gesamtbestandes in acht Sektoren als auch für die absoluten Umfänge und die internen Kältemittelzusammensetzungen der acht Bestände wurden nicht nur nationale Informationen eingeholt (Aktualisierung Eckdaten 1999), sondern auch zahlreiche in jüngerer Zeit veröffentlichte internationale Studien ausgewertet (UNEP-RTOC 1998; March 1998, 1999; AFCE 1998; DTI 1998; ECOFYS 1999). Für die Emissionsraten wurden auch die vom IPPC (1999) für die jeweiligen Anwendungen als typisch bezeichneten Standardwerte herangezogen.

Gleichwohl ist gerade bei den Emissionsraten Vorsicht angeraten. Die in der Literatur vorfindliche breite Streuung von Emissionsraten für identische Anwendungen ist nur teilweise Folge technischer Veränderung der Anlagendichtheit oder Ausdruck nationaler Unterschiede. In großem Maße resultiert sie aus realer Unsicherheit, da es praktisch nirgendwo solide empirische Erforschungen ihrer Größen gibt, die etwa auf einem mehrjährigen Monitoring der Nachfüllmengen beruhen (vgl. Johnson 1999). Vorliegende Studie kann diesen Mangel nicht beheben. Allerdings sind die Emissionsraten auf neue Anlagen (zweite Hälfte der 90er Jahre) bezogen und im unteren Bereich der Standardwerte von IPCC und UNEP-RTOC angesiedelt. Sie sind eher konservativ.

- Tabelle 9 gibt für einzelne Stichjahre und Diagramm 4 für den gesamten Zeitraum 1995-2010 die HFCKW-Emissionen wieder, die sich ohne revolutionäre technische Verbesserungen der Anlagendichtheit und ohne staatliche Regulierung ergeben. Dieses "Szenario I" basiert auf den in Tabelle 9 dargestellten Eckdaten, insbesondere der Konstanz der Emissions- und Rückgewinnungsraten⁶.

Tab. 9: Emissionen von HFCKW-Kältemitteln aus Kühl- und stationären Klimaanlageanlagen 1995-2010 nach BaU-Szenario I				
	1995	2000	2005	2010
Laufende Emissionen in t	126	1199	2216	2606
Entsorgungsemissionen in t	0	19	241	574
Gesamtemissionen in t	126	1219	2457	3180
<i>Emiss. in Mio. t CO₂-Äquivalente</i>	<i>0,28</i>	<i>2,90</i>	<i>5,93</i>	<i>7,66</i>

- Bis zum Jahr 2010 dauert der HFCKW-Ersatz an. Dann bestehen die acht Kältemittelbestände, die zusammen 30 000 t umfassen, ausschließlich aus HFCKW. Die laufenden Betriebs-Emissionen liegen dann bei 2606 t, was einer durchschnittlichen Emissionsrate von 8,7% pro Jahr entspricht. Die Betriebsemissionen (Anlagenundichtheiten, Wartungsverluste) erreichen im darauffolgenden Jahr⁷ ihr Maximum. Hinzu kommen Entsorgungsemissionen (Rückgewinnungsverluste bei der Verschrottung) in Höhe von 574 t. Beide zusammen bilden die Gesamtemissionen von 3180 t. Werden diese auf den Kältemittelbestand von 30 000 t bezogen, beträgt die Rate 10,6%.

⁶ Die verwendeten Emissionsraten werden im Unterschied zu anderen Emissionsprognosen bis 2010 nicht nach unten gesenkt, sondern konstant gehalten. Denn der in den nächsten zehn Jahren zu erwartenden höheren Dichtheit neuer Anlagen wirkt die alterungsbedingte Zunahme von Leckagerisiken bei den seit 1995 installierten Anlagen entgegen.

⁷ Die Emissionsraten beziehen sich auf die Bestandshälften des Vorjahres und des laufenden Jahres.

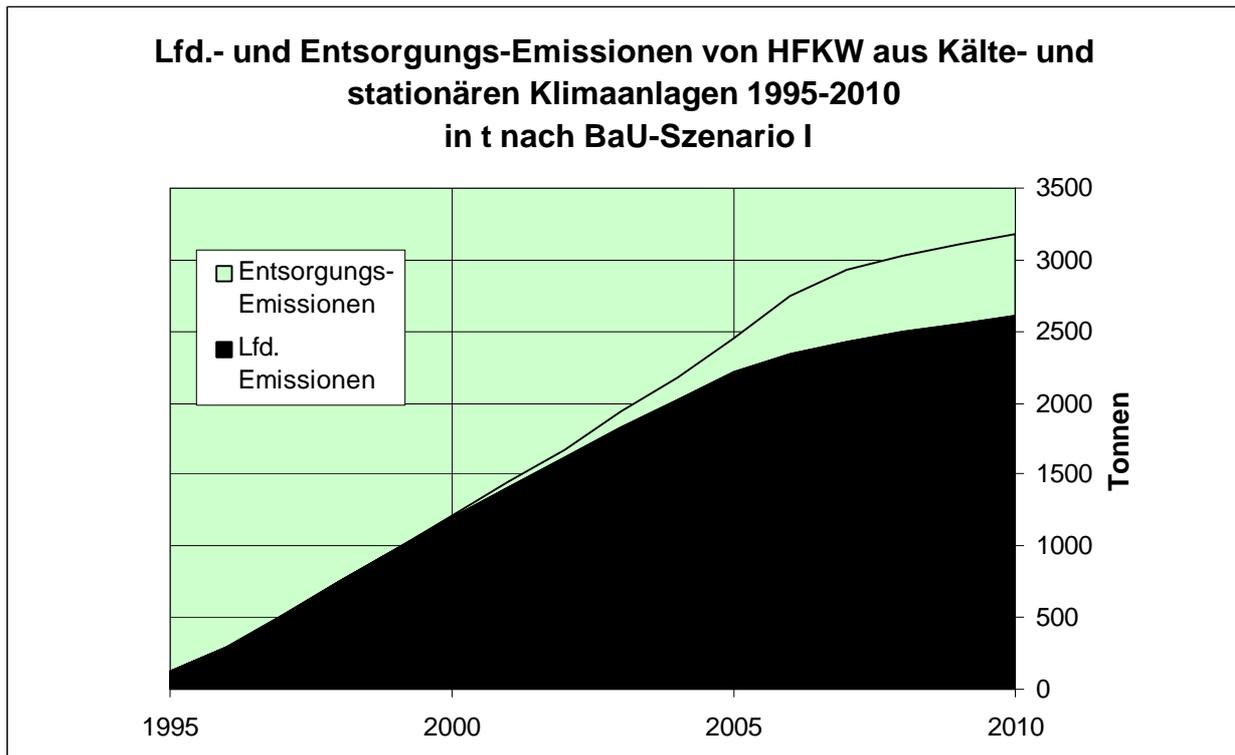


Diagramm 4: Lfd. und Entsorgungs-Emissionen von HFKW aus Kälte- und stationären Klimaanlage 1995-2010 in t (Szenario I). Die Betriebsemissionen (untere Fläche) steigen bis 2005 kontinuierlich auf über 2200 t an. Danach verlangsamt sich ihr Wachstum bis 2010, weil die emissionsstarken Anwendungen wie die Gewerbekälte ihren Endbestand bereits erreicht haben und der Bestand vor allem durch 407C- und 410A-gefüllte Klimaanlage wächst, die niedrigere Emissionsraten aufweisen. Die Entsorgungsemissionen (obere Fläche) nehmen erst nach 2003 stärker zu, wenn die ersten Anlagen außer Betrieb genommen werden.

- Während die laufenden Emissionen in der Zeit nach 2010 stabil weiter verlaufen, steigen die Entsorgungsemissionen noch ca. zehn Jahre lang weiter an. Dies ergibt sich erstens aus der unterschiedlichen Lebensdauer der HFKW-gefüllten Anlagen und zweitens aus den unterschiedlichen Zeitpunkten ihrer Einführung. Neue mittelgroße und Raum-Klimaanlagen enthalten erst seit Ende der 90er Jahre die HFKW-Blends 407C oder 410A statt des HFCKW-22. Im Jahre 2010 fallen aus diesen Anlagen noch keine Entsorgungsemissionen an. Dagegen setzen diese aus Anlagen der Gewerbe- und Transportkälte, aus industriellen und gewerblichen Kleinanlagen sowie aus seit 1995 von R12 auf R134a umgerüsteten Turboverdichtern schon ab 2003 ein. Sie wurden nicht nur zeitlich früher mit HFKW befüllt, sondern haben auch eine kurze (Rest)-Lebensdauer.
- Die Entsorgungsemissionen vor 2003 (Tabelle 9 gibt sie für 2000 mit 19 t an) sind besonderer Art. Es handelt sich um Rückgewinnungsverluste aus der Verschrottung von Altanlagen, die in den Jahren 1994 bis 1999 nicht mit reinen HFKW, sondern mit HFKW-haltigen Drop-In-Kältemitteln im Zuge des FCKW-12-Ersatzes befüllt wurden. Die Emissionen der als Drop-In-Gemischkomponenten dienenden HFKW-125, 152a und 143a fallen ab 1994 im laufenden Betrieb und ab 1999 auch bei der Verschrottung an. Ab 2005 spielen sie keine Rolle mehr.
- Der in CO₂-Äquivalenten ausgedrückte Beitrag zum Treibhauseffekt steigt von 1995 bis 2010 von 0,28 Mio. Tonnen auf 7,66 Mio. Tonnen an (vgl. Tabelle 9). (Daraus errechnet sich ein mittleres GWP der emittierten Kältemittel von knapp unter 2400.)

3 Relative Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II

- Als Kältemittel-Substitute mit nur geringem Treibhauspotential werden vor allem Kohlenwasserstoffe, Ammoniak und CO₂ diskutiert. Zweifellos wird Ammoniak (NH₃) in der Industriekälte seine führende Rolle ausbauen, doch diese Zunahme ist im Szenario I schon berücksichtigt. Der Durchbruch der CO₂-Technologie vor 2010 steht am ehesten bei der Pkw-Klimatisierung bevor, wenngleich mit ihr auch bei Wärmepumpen und Transport-Containern experimentiert wird (Süß 1999). Was Kohlenwasserstoffe betrifft, so bewähren sie sich bei kleinen hermetischen Verdichtern - in Haushaltsgeräten, Wärmepumpen und kleinen Raumklimageräten.
- Eine umfassende Ausweitung der Kohlenwasserstoffe (KW) in den großen Sektoren Gewerbe- und Industriekälte und Gebäudeklima ist aus heutiger Sicht bis 2010 nicht zu erwarten. Nach anfänglichen Versuchen einiger Lebensmittel-Handelsketten mit primärem KW-Kältemittelkreislauf und indirekter Kühlung ist die Erwartung bezüglich brennbarer Kältemittel für größere Anlagen wieder gedämpft. Der für indirekte Systeme erforderliche höhere Energiebedarf ist bislang nicht nur teurer, sondern trägt - zumindest in Deutschland - auch durch mehr CO₂ insgesamt stärker (> 10%) zum Treibhauseffekt bei als Direktsysteme (TEWI-Konzept). Dies sind Erfahrungen von Betreibern indirekt kühlender KW-Supermarktanlagen (Kalter/Boergen 1998).
- Unter der Voraussetzung mangelnder stofflicher Alternativen zu HFKW-Kältemitteln (Substitution) kommt der Minderung der Emissionen erhöhte Bedeutung zu. Es gibt in vielen Ländern Vorschriften zur Rückgewinnung von Kältemitteln (UNEP-RTOC 1998, 242). Die meisten beziehen sich aber ausschließlich auf chlorhaltige Substanzen (ODS). Dies gilt auch für den Vorschlag der Europäischen Kommission (EC 98), der für ODS eine jährliche Kontrolle der Anlagendichtheit vorsieht.
- Praktische Erfahrungen zum Einfluß gesetzlicher Regelungen auf Kältemittel-Emissionen aus stationären Kälteanlagen liegen aus den Niederlanden vor. Dort erließ der Staat 1994 (rückgehend auf 1992) Vorschriften zur Leckdichtheit von Kälteanlagen, die sich ausdrücklich auf alle halogenierten Kältemittel, nicht nur auf ODS, beziehen (Technical requirements for refrigeration equipment bzw. Regeling lekdichtheidsvoorschriften koelinstallaties 1994). Diese in Anlehnung an einen EU-Norm-Entwurf (prEN 378) entwickelte Regelung, die vor allem Anlagen > 3 kg Kältemittelfüllung betrifft (aber auch kleinere, wenn sie über 500 Watt Kälteleistung erbringen), umfaßt im wesentlichen zwei Teile: Erstens technische Vorschriften für Bau und Installation (Materialien, Komponenten, Art der Verbindungen usw.). Zweitens regelmäßige Inspektion und Wartung durch Betreiber und Sachverständige. Beides geschieht unter Aufsicht der unabhängigen Stiftung STEK (Techn. requirements 1994).
- Erste Auswertungen zeigen: Die niederländischen Kältemittellemissionen sind seit 1994 bei Anlagen, die unter die neue Regelung fallen, deutlich zurückgegangen. So haben sich die Jahresverluste bei 75 Supermärkten von 15% auf 3% vermindert (van Gerwen u.a. 1998). Sowohl van Gerwen (1999) als auch Graal (1999) führen die Emissionsreduzierung je zur Hälfte auf neue technische Anforderungen bzw. auf regelmäßige Wartung durch Sachverständige zurück.
- In Deutschland fordert der Verband des Kälteanlagenbauerhandwerks VDKF seit 1996 (VDKF 1996) eine rechtlich verbindliche Wartungspflicht für Kälte- und Klimaanlagen. In dem Arbeitsgespräch "Maßnahmen zur regelmäßigen Instandhaltung

von Kälte- und Klimaanlage" im Umweltbundesamt Berlin am 13.3.1996 wurde von den Kälteanlagenbauern auf Einsparungen bei Kältemitteln und Energieverbrauch infolge regelmäßiger Wartung hingewiesen, die deren zusätzliche Kosten decken. Von Betreiberseite wurde damals die Kostenneutralität mit Skepsis gesehen.

- Eine gesetzliche Verordnung zur regelmäßigen Wartung von Kälteanlagen ist in Deutschland auf der Grundlage des Chemikalien- oder des Immissionsschutzgesetzes machbar. Sie ist keine Maßnahme gegen die Verwendung von HFKW, sondern setzt diese voraus. Sie könnte binnen weniger Jahre die Emissionen aus den betreuten Kälteanlagen wenn nicht auf 25% senken, so doch halbieren. Zu beachten ist, daß die vom Kältehandwerk befürwortete Wartungspflicht nur eine der beiden Elemente der niederländischen Regelung ist, die außerdem technische Anforderungen an Bauteile, Installation usw. festlegt.
- Für die relative Emissionsminderung (Szenario II) wird unterstellt, daß ab 2003 in Deutschland eine Wartungspflicht für alle kälte- und climatechnischen Anlagen eingeführt wird. Ausgenommen sind - in Anlehnung an die bewährte Bagatellgrenze für den R12-Ersatz in Altanlagen - steckerfertige Geräte, falls das Kältemittel in einem dauerhaft geschlossenen Kreislauf geführt wird, und alle Anlagen, deren Kältemittelmenge unter 1 kg liegt. Damit betrifft die Regelung 75 Prozent des gesamten Kältemittelbestandes in kälte- und climatechnischen Anlagen. Aus der Wartungspflicht heraus fallen lediglich die Kleingeräte in Industrie und Gewerbe (6000 t Bestand in 2010), die meisten Raumklimageräte (1500 t Bestand in 2010) und die meisten Hauswärmepumpen (250 t Bestand in 2010).
- Als Effekt wird unterstellt, daß sowohl die Emissionen aus dem laufenden Betrieb als auch die Rückgewinnungsverluste bei den gewarteten Anlagen schrittweise sinken und spätestens nach fünf Jahren um die Hälfte niedriger sind als im Szenario I. Es ergeben sich dann die Werte von Tabelle 10 bzw. Diagramm 5:

Tab. 10: Emissionen von HFKW-Kältemitteln aus Kühl- und stationären Klimaanlage 1995-2010 nach Szenario II				
	1995	2000	2005	2010
Laufende Emissionen	126	1199	1579	1367
Entsorgungsemissionen	0	19	221	355
Gesamtemissionen in t	126	1219	1800	1721
<i>Emiss. in Mio. t CO₂-Äquivalente</i>	0,28	2,90	4,30	4,11

- Nach Einführung der Wartungspflicht (2003) betragen im Jahr 2010 die laufenden Emissionen gegenüber dem Szenario I statt 2606 nur noch 1367 t (52%) und die Entsorgungsverluste statt 574 nur noch 355 t (62%). Die Gesamtemissionen sind nicht 3180, sondern nur noch 1721 t (54%). Die Emissionsrate (Gesamtemissionen) beträgt, bezogen auf den Kältemittel-Gesamtbestand von 30 000 t, rd. 5,7%. Das ist gegenüber den 10,6% zwar keine Halbierung, da 25% des Kältemittelbestands von der Wartungspflicht ausgenommen sind, aber eine Senkung um 45%.
- Diagramm 5 zeigt den Emissionsverlauf im Szenario II. Eine Wartungspflicht führt dazu, daß die Emissionen (Gesamtemissionen) seit dem Zeitpunkt ihrer Einführung nicht mehr weiter ansteigen, wie dies im Szenario I der Fall ist, sondern auf gleichbleibendem Niveau verharren.

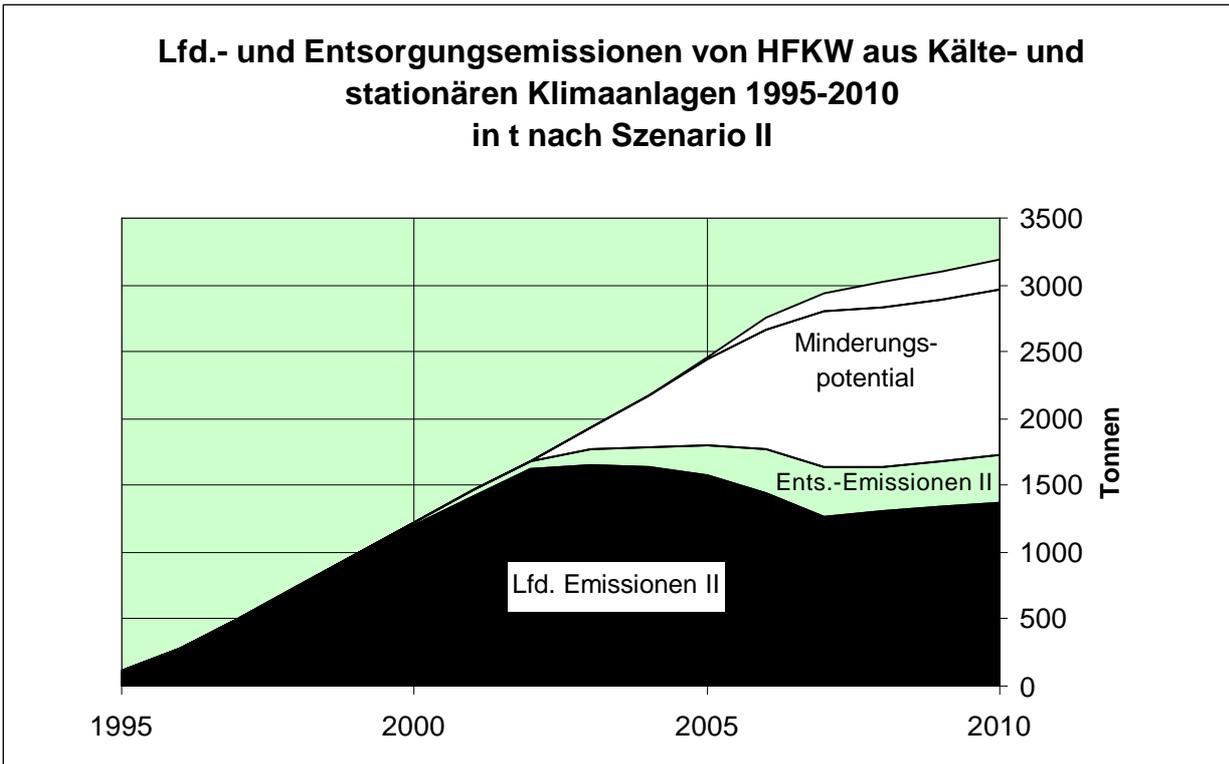


Diagramm 5: Lfd. und Entsorgungsemissionen von HFKW aus Kälte- und stationären Klimaanlagen 1995-2010 in t - Szenario I u. II. Statt wie im Szenario I (alle Flächen zusammen) steigen die Emissionen nach 2003 nicht mehr. Die Summe aus Lfd. und Entsorgungsemissionen (dunkle Flächen) bleibt bis 2010 auf viel niedrigerem Niveau relativ konstant.

- Der Beitrag zum Treibhauseffekt sinkt um 3,55 Mio. t CO₂-Äquivalente: von 7,66 Mio. auf 4,11 Mio. t. Die Verlaufskurven für Szenario I und II zeigt Diagramm 6.

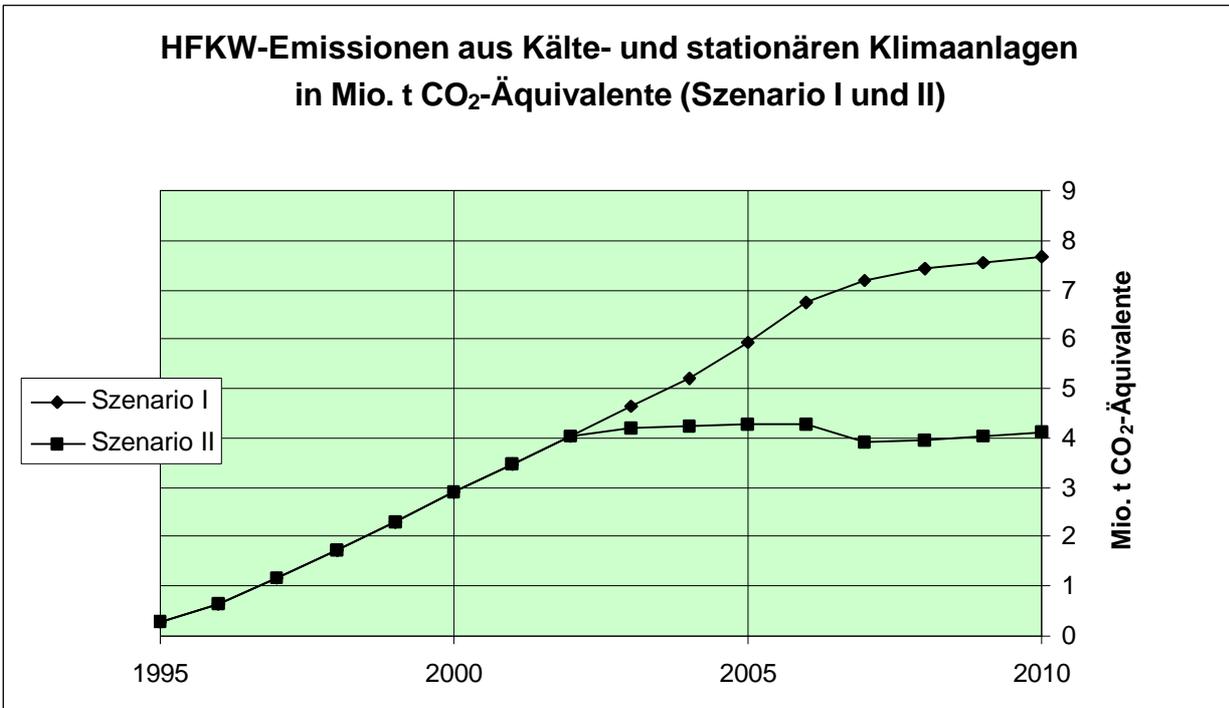


Diagramm 6: HFKW-Emissionen aus Kälte- und stationären Klimaanlagen in Mio. t CO₂-Äquivalente (Szenario I und II). Ab 2003 steigt der Beitrag zum Treibhauseffekt in Szenario II nicht mehr weiter an - wie das in Szenario I der Fall ist.

2 Mobile Klimaanlage

Mobile Klimaanlage sind Fahrzeugklimaanlagen in Personenkraftwagen (Pkw), Lastkraftwagen bzw. Nutzfahrzeugen (Nfz), Bussen, Schienenfahrzeugen und auf Schiffen. Bei Kältemittel-Bestand, -Verbrauch und -Emissionen dominieren die Pkw-Anlagen mit jeweils 95% Anteil. Nach der BaU-Prognose werden im Jahr 2010 alle inländischen mobilen Klimaanlage zusammen einen Bestand von 29 700 t HFKW aufweisen, etwa so viel wie Kälte- und stationäre Klimaanlage (30 000 t HFKW). Davon werden über 28 000 t HFKW in Pkw-Klimaanlagen enthalten sein. Diese werden nachfolgend getrennt von den sonstigen mobilen Klimaanlage behandelt.

Das HFKW-Kältemittel in mobilen Klimaanlage ist fast 100%-ig R134a. Es gibt zwei kleine Ausnahmen: Bei der Umrüstung alter R12-Klimaanlagen wurde zu einem geringen Anteil statt R134a das Drop-In-Kältemittel 413A eingefüllt, das jedoch seinerseits zu 88% aus R134a besteht. Die zweite Ausnahme sind neue Schiffsklimaanlagen, von denen in Deutschland nur die eine Hälfte mit R134a befüllt wird, während die andere Hälfte R404A/507 erhält. Der Neueinsatz von R404A/507 beträgt aber nur 1,5 t jährlich.

1 Inlands-Neuverbrauch und Emissionen 1995 - 1997

Die Umstellung von R12 auf R134a währte bei werkseitig klimatisierten Neufahrzeugen für den inländischen Markt von April 1992 bis Oktober 1993. Das betrifft Pkw aus inländischer und ausländischer Produktion genauso wie Nutzfahrzeuge, Busse und Eisenbahnwaggons. Lediglich der kleine Bereich der Schiffsklimatisierung fällt aus dem Rahmen: Bis 1996 enthielten Neuanlagen ausschließlich R22. Erst seit 1997 ist die Umstellung auf R134a oder R404A in Gang gekommen (Haug 1999). Die zur nachträglichen Installation angebotenen Automobil-Klimaanlagen waren bis Ende 1994 ebenfalls auf R134a umgestellt. Altfahrzeuge mit R12-Klimaanlagen dürfen in Deutschland bis zur Außerbetriebnahme grundsätzlich weiter genutzt werden. Von 1995 bis 1998 wurden davon jedoch Altklimaanlagen in Pkw und Nfz zu etwa zehn Prozent, in Bussen zu 40 Prozent und in Eisenbahnwaggons zu 100 Prozent auf R134a umgestellt (Schwarz/Leisewitz 1998). Diese Altanlagen werden zwischen 2002 und 2005 aus dem Bestand wieder ausscheiden.

Klimaanlagen für Straßenfahrzeuge sind nicht hermetisch geschlossen: Ihre Verdichter werden vom Fahrzeugmotor angetrieben, dessen Vibrationen sie ausgesetzt sind, und das Kältemittel strömt durch flexible Leitungen (Schläuche). Im Zuge der Ablösung FCKW-haltiger Systeme wurden die Anlagen jedoch weniger emissiv (Nonnenmann 1995). Diffusionsdichtere Schläuche und bessere Abdichtungen verringerten die Verluste aus dem laufenden Betrieb gegenüber FCKW-Systemen um die Hälfte. Bei Reparatur und Wartung wird das Kältemittel außerdem nicht mehr ganz in die Atmosphäre entlassen, sondern mit ca. 10% Verlust zwischenabgesaugt und wieder eingefüllt.

Die jährlichen Kältemittellemissionen während der Lebensdauer verringerten sich dadurch von über 30% (vor 1992) auf ca. 10% (neue Systeme). 10% pro Jahr entsprechen bei 12-jähriger Nutzung 120% Kältemittelverlust bezogen auf eine Anlagefüllung: zwei halbe Nachfüllungen als Emissionsausgleich und zwei Mal 10% Wartungsverlust⁸. Auch

⁸ Wie in der gesamten Kälte-Klimatechnik gibt es auch für Pkw-Klimaanlagen nur Expertenschätzungen der Emissionen und keine unabhängigen Langzeit-Messungen. Zu den besten Schätzungen zählen u.E. AFCE 1998; IPCC 1999; UNEP-RTOC 1998; Baker bzw. Preisegger in: Joint IPCC/TEAP 1999.

die Kältemittelabsaugung bei der Verschrottung, die von den Autowerkstätten bisher für FCKW praktiziert wird, ist bereits auf R134a eingestellt. Sie ist in Deutschland dadurch erschwert, daß zahlreiche Gebrauchtfahrzeuge ins östliche Ausland exportiert werden, wo bei der Verschrottung dem Kältemittel erst wenig Aufmerksamkeit gilt. Sie ist aber auch in hochindustrialisierten Ländern noch steigerbar. Der Blick auf den Inselstaat Japan ist aufschlußreich: Die Autoindustrie strebt dort für Anlagen mit R134a bis 2010 eine Rückgewinnung aus Altfahrzeugen von 70% an (Tujibayashi 1999).

Hinweis zu den Emissionen:

Für mobile Klimaanlage (Pkw, Nfz, Busse, Schienfahrzeuge, Schiffe) wird in dieser Studie generell eine jährliche Rate von 10% für laufende Emissionen und ein Rückgewinnungsverlust bei der Verschrottung (Entsorgungsemissionen) von einmalig 30% der Füllmenge unterstellt. Die laufenden Emissionen eines Jahres n werden nach der Gleichung $10\% \times (0,5 \times \text{Bestand}_{n-1} + 0,5 \times \text{Bestand}_n)$ ermittelt.

1.1 Pkw-Klimaanlagen

- Der jährliche Neuverbrauch von R134a zur Erstbefüllung von Pkw-Klimaanlagen, die für den deutschen Markt bestimmt sind (ohne inländische Befüllungen von Export-Pkw), ist von 1995 bis 1997 kräftig gestiegen: von 781 auf 1862 t (vgl. Tabelle 11).
- Die Ursache für den Anstieg ist der Aufschwung der Ausrüstungsrate (AC-Quote) der jährlichen Neuzulassungen. Sie hatte 1992, im letzten vollen Jahr mit FCKW-Kältemitteln, erst 9,4% betragen (Schwarz/Leisewitz, a.a.O, 38). Seitdem stieg sie steil an, zunächst bei den inländischen, dann auch bei den ausländischen Marken. Für beide Kategorien zusammen lag die AC-Quote bis 1995 bei 24% und übertraf 1997 erstmals mit 52% die Hälfte der Neuzulassungen⁹. Der Anstieg geht weiter: Der vorläufige Wert für 1998 beträgt 68%. (Befragung Pkw-Klimaanlagen 1999)

Tab. 11: Inl. Verbrauch und lfd. Emissionen von HFKW-Kältemitteln (134a) bei Pkw-Klimaanlagen 1995-1997 in t und Mio. t CO₂-Äquivalente

	1995		1996		1997	
	Verbrauch*	Emission	Verbrauch	Emission	Verbrauch	Emission
Kältemittel						
R134a	781	113	1349	211	1862	356
Mio. t CO ₂ -Äqui.		0,15		0,27		0,46
Ausrüstungsrate**	24%		39%		52%	

Quelle: Befragung Pkw-Klimaanlagen 1999.

* Inl. Verbrauch = Erstbefüllung neuer Klimaanlagen von Pkw für das Inland incl. Importe, ohne Exporte und ohne lfd. Emissionsausgleich, plus Ersatz von inl. R12-Altanlagen.

** Anteil klimatisierter Fahrzeuge an allen inländischen Neuzulassungen eines Jahrgangs.

- Der Verbrauchsanstieg verringert sich durch kleinere Füllmengen kaum. Diese lagen 1995 für inländische Marken im Durchschnitt bei 0,88 kg und für ausländische Marken bei 0,77 kg. Die Werte sind bis 1997 auf 0,86 bzw. 0,75 kg gesunken. Eine Erklärung dafür ist, daß immer mehr kleinere Pkw klimatisiert werden.

⁹ Bisher vorhergesagte Anstiegssraten werden stets überschritten: Fischer 1997, Sieverding 1998. Selbst Holdack-Janssens 1998 prognostizierte AC-Quote 75% für 2002 ist wohl zwei Jahre vorher erreicht.

- Die laufenden Emissionen stiegen von 1995 bis 1997 von 113 auf 356 t an (vgl. Tabelle 11 und Diagramm 7, das auch den vorläufigen Wert 541 t für 1998 enthält). Entsorgungsverluste kommen noch nicht vor. Sie fallen erst nach 2002 an, bei der Verschrottung der ab 1995 umgerüsteten R12-Altanlagen. Ab 2005 werden die ersten Jahrgänge verschrottet, die R134a als Erstbefüllung erhielten.
- Der Beitrag zum Treibhauseffekt durch die Emissionen stieg von 1995 bis 1997 von 0,15 auf 0,46 Mio. t CO₂-Äquivalente an (Tabelle 11 und Diagramm 7).

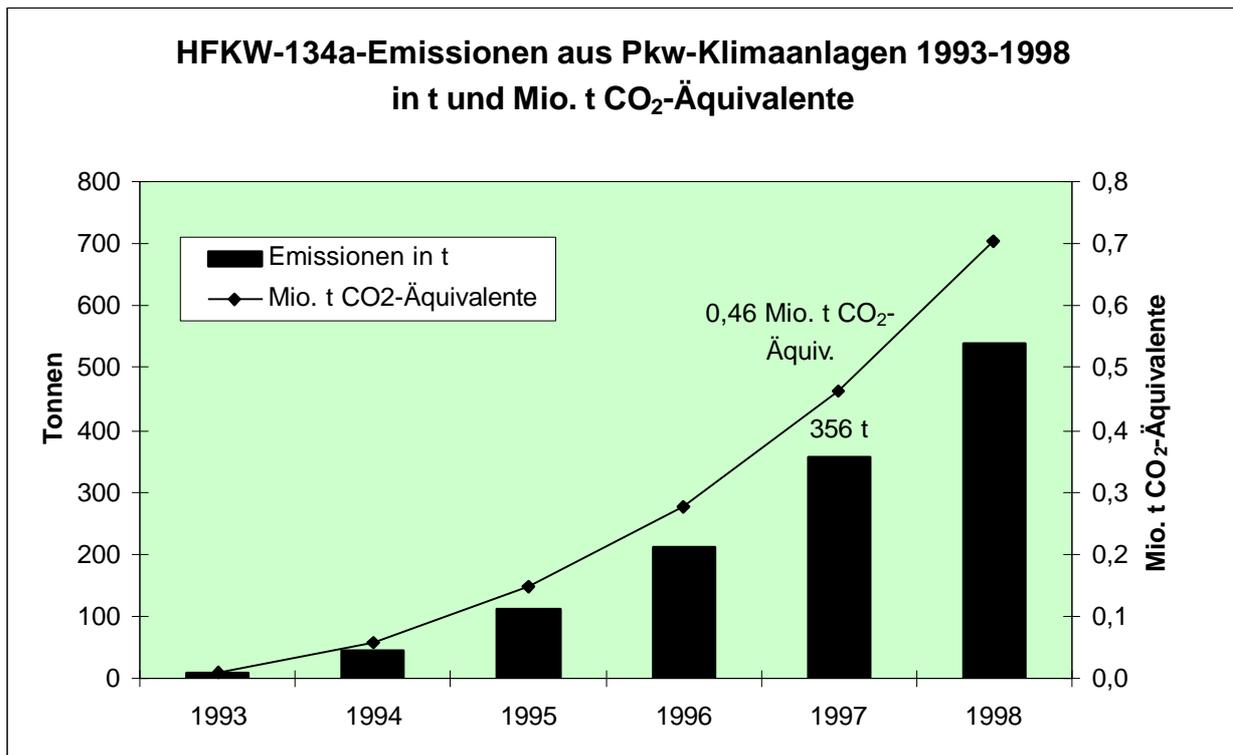


Diagramm 7: HFKW-134a-Emissionen aus Pkw-Klimaanlagen 1993-1998 in t und in Mio. t CO₂-Äquivalente. Der Anstieg der Emissionen seit 1993 ist ungebrochen steil, sowohl in Tonnen (linke Achse, schwarze Säulen) als auch in CO₂-Äquivalenten (rechte Achse, Linie). Der vorläufige Wert für den Beitrag zum Treibhauseffekt 1998: 0,7 Mio. t.

1.2 Sonstige Mobilklimaanlagen

- Die mittlere Füllmenge von Nfz-Klimaanlagen beträgt bei Fahrzeugen unter 16 t Gesamtgewicht 1,0 kg, bei Fahrzeugen über 16 t Gesamtgewicht 1,2 kg. Neue Bus-Klimaanlagen enthalten im Durchschnitt 10 kg Kältemittel und Klimaanlagen der Schienenfahrzeuge der Bahn 18 kg. Mit 100 kg Füllmenge sind Schiffsklimaanlagen am größten. Da die AC-Quote der genannten Fahrzeuge kontinuierlich ansteigt, hat sich der jährliche Neuverbrauch von R134a zur Erstbefüllung inländischer Anlagen von 1995 bis 1997 von 59 auf 78 t erhöht. Dazu kamen jährlich rd. 20 t für die Umrüstung von R12-Altanlagen (vgl. Tabelle 12, Zeile 2).
- Die laufenden Emissionen stiegen von 1995 bis 1997 von 13 auf 31 t an (vgl. Tabelle 12, Zeile 2). HFKW-Entsorgungsverluste kommen vor 2002 - von Unfällen u. dgl. abgesehen - noch nicht vor.

Tab. 12: Inl. Verbrauch und lfd. Emissionen von HFKW-Kältemitteln bei Pkw- und sonstigen Mobilklimaanlagen 1995-1997 in t und Mio. t CO₂-Äquivalente

	1995		1996		1997	
	Verbrauch*	Emission	Verbrauch	Emission	Verbrauch	Emission
1.Pkw-AC	781	113	1349	211	1862	356
2.Sonst. Mobil-AC	72	13	86	21	98	31
Summe	853	126	1435	233	1960	386
Mio. t CO ₂ -Äqui.		0,16		0,30		0,50

Quelle: Befragung Pkw-Klimaanlagen und Befragung Sonstige Mobilklimaanlagen 1999.

* Inl. Verbrauch = Erstbefüllung neuer Klimaanlagen für das Inland incl. Importe, ohne Exporte und ohne lfd. Emissionsausgleich, plus Ersatz von inl. R12-Altanlagen.

- Der Beitrag zum Treibhauseffekt durch Emissionen stieg von 1995 bis 1997 von 0,02 auf 0,04 Mio. t CO₂ -Äquivalente an (in Tabelle 12 nicht separat, sondern zusammen mit den Pkw-Werten enthalten).

2 BaU-Emissionsprognose 2010 - Szenario I

Im Unterschied zu allen anderen früheren FCKW-Anwendungen kann bei mobilen Klimaanlagen für die Prognose des HFKW-Bestands 2010 der FCKW-Altbestand nicht als Orientierungsgröße herangezogen werden. Dafür ist er zu klein. Bereits Anfang 1996 übertraf in Pkw-Klimaanlagen die R134a-Menge den historischen Höchststand von R12 aus dem Jahr 1993 (2000 t). Sogar beim Treibhauseffekt wird der Beitrag der damaligen R12-Emissionen (Schwarz/Leisewitz 1995, 23) in Höhe von 4,25 Mio. t CO₂-Äquivalenten bis 2010 von den R134a-Emissionen übertroffen werden, obwohl R134a mit 1300 ein weit geringeres GWP als R12 (8500) aufweist.

2.1 Pkw-Klimaanlagen

Die prognostische Abschätzung der R134a-Emissionen aus Pkw-Klimaanlagen bis zum Jahr 2010 (BaU-Szenario I) erfordert ein Modell mit dynamischen Annahmen:

1. Die jährlichen Pkw-Neuzulassungen betragen im Mittel 3,55 Mio. Stück und erhöhen den Pkw-Bestand von 40,7 Mio. (1995) bis auf 48,6 Mio. (2010) - nach Shell 1995.
2. Zwei Drittel der Neufahrzeuge stammen aus inländischer und ein Drittel stammt aus ausländischer Produktion.
3. Die AC-Quote der Neuzulassungen erreicht bei inländischen Marken 90% im Jahr 2001 und bleibt danach konstant. Bei ausländischen Marken beträgt der entsprechende Plateau-Wert 80% und gilt ab 2005.
4. Die Klimaanlagen-Sättigung liegt bei 75%-iger Ausstattung des gesamten inländischen Fahrzeugbestands.
5. Die durchschnittliche Füllmenge neuer Klimaanlagen sinkt wie bisher (Befragung Pkw-Klimaanlagen) jährlich um 1%: von 0,88 kg (1995) auf 0,76 kg (2010) bei inländischen und von 0,75 auf 0,66 kg bei ausländischen Marken. Die mittlere Füllmenge aller Neuklimaanlagen sinkt im fraglichen Zeitraum von 0,86 auf 0,73 kg.
6. Die Lebensdauer einer neuen Klimaanlage beträgt 12 Jahre.
7. Die laufende Emissionsrate beträgt konstant 10% auf den Bestand, nach der Gleichung "10% x (0,5 x Bestand_{n-1} + 0,5 x Bestand_n)".

8. Die Kältemittelverluste der Rückgewinnung bei der Altautoverschrottung betragen konstant 30%. (Dieser niedrige Wert scheint möglich, da R134a-Neuanlagen erst ab 2005 jahrgangsweise zur Entsorgung anstehen.)

Tabelle 13 zeigt für vier Stichjahre und Diagramm 8 für den gesamten Zeitraum 1995-2010 die HFKW-Emissionen, die sich unter jenen acht Modellannahmen ergeben. Nach diesem "Szenario I" erreicht der Kältemittelbestand 2010 seinen Höchstwert mit (rechnerisch) 28 078 t. Die laufenden Emissionen, die wegen der Berechnungsweise ihren Höchstwert erst im Folgejahr erreichen, liegen bei 2792 t. Die Entsorgungsemissionen betragen 626 t. Beide zusammen bilden die 3418 t Gesamtemissionen des Jahres 2010. Bezogen auf den Kältemittelbestand in den Autoklimaanlagen (28 078 t) beträgt deren Rate 12,2%.

Tab. 13: Emissionen von HFKW-134a aus Pkw-Klimaanlagen 1995-2010 in t und Mio. t CO₂-Äquivalente nach Szenario I				
	1995	2000	2005	2010
Laufende Emissionen in t	113	955	2150	2792
Entsorgungsemissionen in t	0	0	74	626
Gesamtemissionen in t	113	955	2223	3418
<i>Emiss. in Mio. t CO₂-Äquivalente</i>	<i>0,15</i>	<i>1,24</i>	<i>2,89</i>	<i>4,44</i>
<i>Bestand in t</i>	<i>1496</i>	<i>10668</i>	<i>22626</i>	<i>28078</i>

Basis: Befragung Pkw-Klimaanlagen 1999. Extrapolation bis 2010: Modellannahmen (s. Text).

Ausblick nach 2010: Da ab 2010 sowohl der Pkw-Bestand - gemäß Shell-Prognose - nicht mehr nennenswert ansteigt als auch die AC-Quote des Bestands mit 75% - gemäß Modellannahme - gleichbleibt, gehen die laufenden Emissionen nach 2011 leicht zurück.

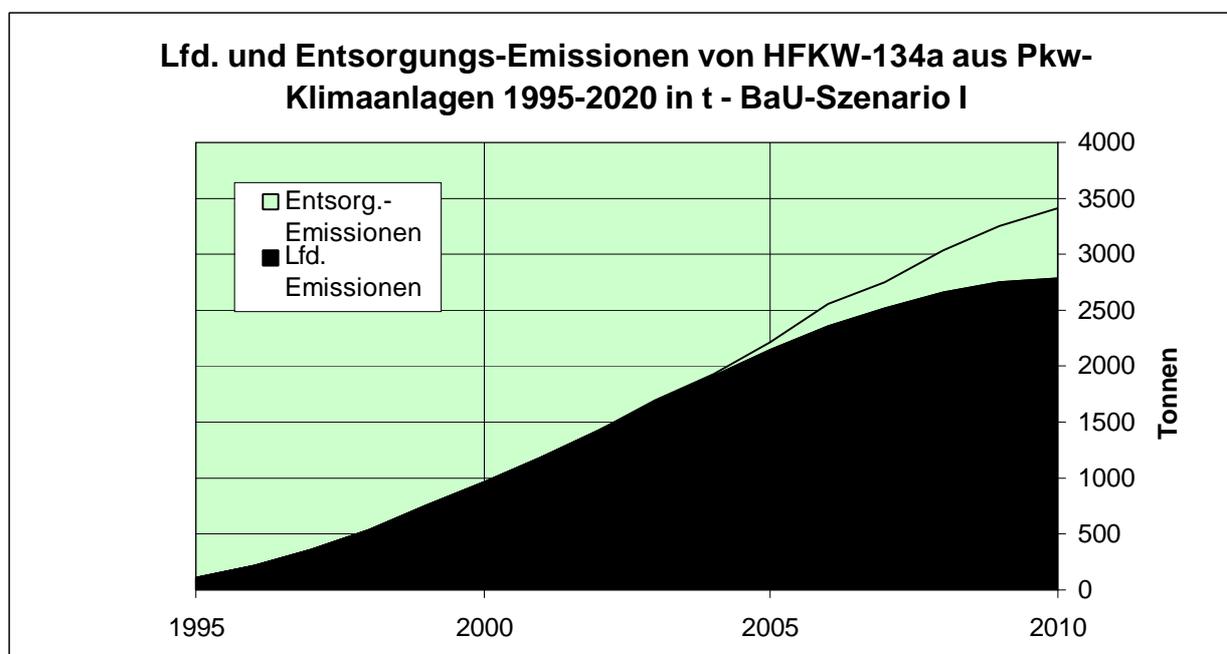


Diagramm 8: Lfd. und Entsorgungs-Emissionen von R134a aus Pkw-Klimaanlagen 1995-2020 in t (Szenario I - BaU). Die laufenden Emissionen (untere Fläche) erreichen im Jahr 2010 einen Wert von 2792 t (Gipfel in 2011). Die Entsorgungsemissionen (obere Fläche) setzen ab 2003 ein (Ausscheiden umgerüsteter R12-Altanlagen) und bilden ab 2006 eine nennenswerte Größe. 2010 liegt ihr Umfang bei 626 t. Die Gesamtemissionen betragen dann rechnerisch 3418 t.

Ursache für den Rückgang der laufenden Emissionen nach 2011 ist die anhaltende Verringerung der Füllmengen der Klimaanlage um jährlich 1%. Die Entsorgungsemissionen steigen dagegen noch leicht an - bis zu dem Maximum von 760 t in 2016. Die Gesamtemissionen haben ihren Gipfel im Jahr 2013 bei 3532 t.

Der in CO₂-Äquivalenten ausgedrückte Beitrag zum Treibhauseffekt steigt von 1995 bis 2010 von 0,15 auf 4,44 Mio. t an (vgl. Tabelle 13). Das ist im Jahr 2010 dank des niedrigeren GWP des HFKW-134a deutlich weniger als im Bereich der Kälte- und stationären Klimatechnik.

2.2 Sonstige Mobilklimaanlagen

Die Prognose der Emissionen aus sonstigen mobilen Klimaanlage (Nutzfahrzeuge, Busse, Schienenfahrzeuge und Schiffe) basiert auf den in Tabelle 14 wiedergegebenen Parametern, die hier nicht im einzelnen kommentiert werden.

Tab. 14: Parameter zur Entwicklung sonstiger mobiler Klimaanlage (ohne Pkw) 1995 bis 2010					
	Inl. Neuzugänge/Jahr	Inl. AC-Quote		Füllmenge pro AC	Zielbestand 2010
		1995	2010		
Nutzfahrzeuge (LD 10a)					
Nfz < 2 t	150000	8%	38%	1,0 kg	435 t
Nfz 2 t - 16 t	50000	5%	35%	1,0 kg	130 t
Nfz > 16 t	18000	36%	90%	1,2 kg	370 t
Busse (LD 15a)					
Stadtbusse	2400	14%	63%	10 kg	141 t
Überlandbusse	1200	26%	85%	10 kg	119 t
Reisebusse	2400	95%	100%	10 kg	355 t
Schienenfahrzeuge (LD 20a)					
Eisenbahnwagen	200	100%	100%	18 kg	100 t
Schiffe (LD 20a)					
Handelsschiffe	30	100%	100%	100 kg	36 t

Quelle: Befragung Sonstige Mobilklimaanlagen 1999.

- Nachfolgende Tabelle 15 zeigt für vier Stichjahre 1995-2010 die HFKW-Emissionen, die sich unter Anwendung der Parameter aus Tabelle 15 ergeben. Zur Erinnerung: Generell wird bei mobilen Klimaanlage eine Rate der laufenden Emissionen von 10% pro Jahr angelegt und eine Verlustrate bei der Verschrottung von 30%.
- Nach dem BaU-Szenario I erreicht der Kältemittelbestand 2010 einen Wert von 1637 t (zum Vergleich Pkw: 28 078 t). Über 90% davon entfallen auf die Straßenfahrzeuge Lastkraftwagen (Nfz) und Busse. Die laufenden Emissionen liegen in 2010 bei 161 t (zum Vergleich Pkw: 2792 t) und die Entsorgungsverluste bei 32 t (zum Vergleich Pkw: 626 t). Beide zusammen bilden die 193 t Gesamtemissionen des Jahres 2010 (zum Vergleich Pkw: 3418 t). Bezogen auf den Kältemittelbestand in den sonstigen Mobilklimaanlagen beträgt die Gesamt-Emissions-Rate 11,8%.

Tab. 15: Emissionen von HFKW aus sonstigen Mobilklimaanlagen 1995-2010 in t und Mio. t CO₂-Äquivalente nach Szenario I				
	1995	2000	2005	2010
Laufende Emissionen in t	13	62	120	161
Entsorgungsemissionen in t	0	0	10	32
Gesamtemissionen in t	13	62	129	193
<i>Emiss. in Mio. t CO₂-Äquivalente</i>	<i>0,02</i>	<i>0,08</i>	<i>0,17</i>	<i>0,25</i>
<i>Bestand in t</i>	<i>171</i>	<i>675</i>	<i>1247</i>	<i>1637</i>

Basis: Befragung Sonstige Mobilklimaanlagen 1999. Extrapolation bis 2010: Parameter Tab. 14.

- Der Beitrag zum Treibhauseffekt in CO₂-Äquivalenten steigt von 1995 bis 2010 von 0,02 auf 0,25 Mio. t an (vgl. Tabelle 15). Das sind fünf Prozent des Beitrags der Emissionen von Pkw-Klimaanlagen zum Treibhauseffekt.

3 Relative Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II

Die Betriebsweise mobiler Klimaanlagen (Vibrationen etc.) setzt der Emissionsminderung ihrer Kältemittel Grenzen. Verzicht auf die Klimaanlage mag ökologisch die einfachste Lösung sein, ist aber unrealistisch, seit Klimaanlagen auch in Europa Massengüter wurden. Als Ersatzkältemittel mit nur geringem Treibhauspotential sind vor allem Kohlenwasserstoffe und CO₂ in der Diskussion (vgl. Reichelt 1996).

3.1 Pkw-Klimaanlagen mit CO₂ als Kältemittel ab 2007

- Kohlenwasserstoffen werden in der Pkw-Klimatisierung wenig Chancen eingeräumt. Das Explosionsrisiko durch brennbares Gas, das in den Fahrgastraum eindringt, gilt als zu hoch. Dagegen sehen viele Experten im transkritischen CO₂-System die Pkw-Klimaanlagen der nächsten Generation (Preisegger 1999).
- Die Bewertung des Beitrags zum Treibhauseffekt darf die direkten Emissionen der Kältemittel nicht isolieren, sondern muß in eine Gesamtbetrachtung (TEWI) auch die Kohlendioxid-Emissionen vom Antriebsmotor einbeziehen. Bei Pkw-Klimaanlagen ist die Treibhauswirksamkeit der direkten Kältemittellemissionen etwa so groß wie die der Verbrennungsabgase vom Antrieb der Anlage (vgl. Baker 1999). Die Energieeffizienz von R134a-Anlagen wird gegenwärtig noch von keinem anderen System der Pkw-Klimatisierung erreicht. Darum richtet sich die Optimierung von CO₂-Klimaanlagen, deren direkte Kältemittellemissionen bei der Bewertung des Treibhauseffektes vernachlässigt werden können, auf ihren energetischen Wirkungsgrad. Die hohen Drücke von CO₂ (im transkritischen Bereich 130-150 bar) minderten zunächst die Energieeffizienz, da sie robustere, mithin schwerere Bauteile erfordern. Durch Volumenreduzierung konnte der Nachteil ausgeglichen werden.
- Das 1994 bis 1997 laufende gemeinsame Forschungsprogramm europäischer Autohersteller (BMW, Daimler, VW, Volvo, Rover) und Klimaanlagenbauer (Behr, Valeo) mit dem Titel RACE (Refrigeration and Automotive Climate under Environmental Aspects) trieb die Entwicklung der CO₂-Klimaanlage voran. "The RACE group assumes, that within 10 years the first series car models with a carbon dioxide system can be introduced to the market" (RACE 1998, 14). Die Energieeffizienz gilt perspektivisch so groß wie bei 134a-Anlagen. (Vgl. Köhler/Sonnekalb 1996; Sonnekalb/Köhler 1997; Wertenbach u.a. 1997)

- Außer europäischen arbeiten auch große japanische und nordamerikanische Auto- und Autozulieferunternehmen an CO₂-Anlagen. Als Schlüsselfrage gilt außer den Kosten die weltweite Akzeptanz des neuen Systems. Zwei verschiedene Klimatechnologien sollen auf Dauer nicht nebeneinander betrieben werden.
- Der Zeitpunkt der ersten Serienfahrzeuge mit CO₂-Klimatechnik liegt bei planmäßigem Verlauf zwischen 2005 und 2008. Nach VW 1999 und DaimlerChrysler 1999 könnte 2007 das Startjahr sein. Das bedeutet, daß in 2010 die lfd. Emissionen von R134a erst wenig geringer sind als im BaU-Szenario I, da mit einem Umstellungszeitraum für alle Modelle von mindestens zwei Jahren zu rechnen ist.
- Werden in Deutschland ab 2007 schrittweise CO₂-Klimatechniken eingeführt und ist 2009 der erste vollständige Jahrgang ohne R134a-Anlagen, kommen von 2007 bis 2010 statt 12,5 Mio. R134a-Klimatechniken nur etwa 3,3 Mio. in die Neuzulassung. Bis Ende 2010 sind 9 Mio. CO₂-Anlagen in Betrieb. Statt 36,4 Mio. Klimatechniken à 0,73 kg R134a gibt es 2010 nur noch 27,2 Mio. R134a-Klimatechniken mit 21 184 t Kältemittel im Bestand (zum Vergleich: 28 022 t in Szenario I).

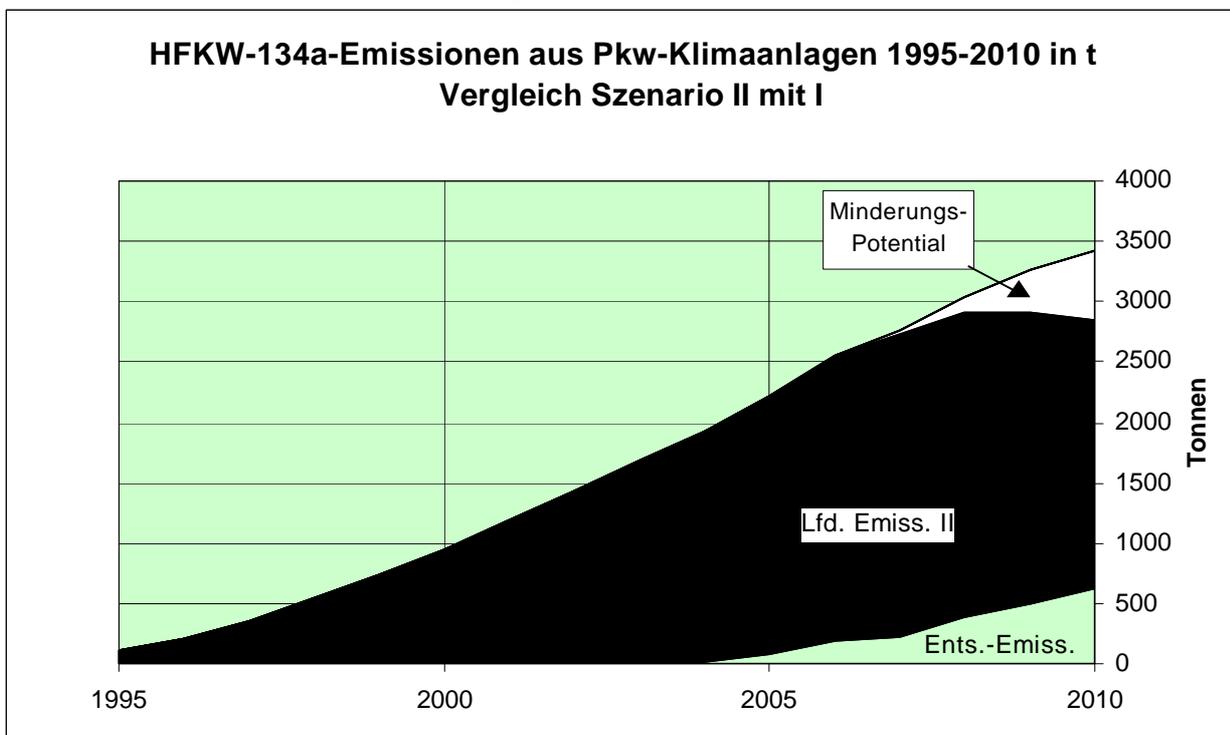


Diagramm 9: Lfd. und Entsorgungs-Emissionen von R134a aus Pkw-Klimatechniken 1995-2010 in t - Vergleich Szenario II mit I. Mit der Einführung von CO₂-Systemen ab 2007 sinken die lfd. Emissionen nach Szenario II (schwarze Fläche) bis 2010 auf 2221 t. Die Entsorgungsemissionen sind dieselben wie in Szenario I. Der Emissionsabstand zu Szenario I (weiße Fläche oben rechts) in Höhe von 571 t resultiert aus dem Rückgang der lfd. Emissionen nach Szenario II, während die lfd. Emissionen in Szenario I auf 3418 t Gesamtemissionen wachsen.

- Die lfd. Emissionen in 2010 betragen statt 2792 t nur noch 2221 t. Das sind 571 t oder 20% weniger als im R134a-Szenario I. Der Beitrag der Gesamtemissionen (laufende plus - unveränderte - Entsorgungsemissionen) zum Treibhauseffekt vermindert sich um 0,74 Mio. t CO₂-Äquivalente.
- Im Jahr 2010 ist die Wirkung der Kältemittelsubstitution noch gering. Ab 2021 gibt es jedoch praktisch keine HFKW-Emissionen aus Pkw-Klimatechniken mehr.

3.2 Sonstige mobile Klimaanlage

Kaltwassersatz in Omnibussen ab 2000

- Auch von den deutschen Busherstellern wird CO₂ als mittelfristige Klimatisierungslösung angestrebt (Mayer 1998). In kürzerer Frist verfügbar ist aber eine andere Alternative: die Kompaktklimaanlage mit Sekundärkreislauf (Kaltwassersatz). Die ersten Busse, die statt einer vom Heckmotor angetriebenen Dachanlage mit über 10 kg umlaufendem Kältemittel nur eine kleine Klimaeinheit enthalten, die umlaufendes Wasser kühlt, sind ab 1999 auf Kundenwunsch lieferbar (Kirsamer 1999). Ab 2000 können sie in Serie gehen und ab 2002 bei allen Bussen Standard werden. Statt 10 kg Kältemittel sind nur noch 3 kg R134a erforderlich (Schreiber 1999), und die laufende jährliche Emissionsrate sinkt mindestens auf die Hälfte (5% statt 10%). Für den primären Kältekreislauf kommt auch Propan oder CO₂ infrage, wenn die Anlage außerhalb des Fahrgastraumes angebracht wird (Kirsamer 1999).
- Werden von 2000 bis 2002 neue Busklimaanlagen auf Kaltwassersätze umgestellt, die übrigens weniger kosten als R134a-Direktsysteme, gehen die R134a-Bestände bis 2010 auf 303 t (statt 615 in Szenario I) zurück. Die laufenden Emissionen betragen nur noch 16 t (statt 61 t in Szenario I). Die Entsorgungsemissionen bleiben unverändert 10 t. Der Beitrag zum Treibhauseffekt der 26 t Gesamtemissionen ist um 0,06 Mio. t CO₂-Äquivalente niedriger als nach in Szenario I.

Kaltluftanlage in Schienenfahrzeugen ab 2000

- Im Jahr 2000 nimmt die Deutsche Bahn AG neue Fahrzeuge des Hochgeschwindigkeitszuges ICE-3 in Betrieb, die mit Luft klimatisiert werden (Reum 1999). Die auf Erfahrungen aus der Flugzeugklimatisierung beruhende Kaltluftkältemaschine (technische Details bei Adolph 1998) wurde seit 1995 in einem ICE-1-Wagen erprobt. Der Energiebedarf für die Maschine ist 20-30% höher als für vergleichbare R134a-Anlagen (Adolph 1999). Die Entscheidung für Luft fiel schon 1990, als die Undichtheiten bei Eisenbahnklimasystemen zu so hohen R12-Emissionen führten, daß sie in der TEWI-Betrachtung um 30% schlechter abschnitten als die geplante Luftanlage. Seit den Verbesserungen der R134a-Anlagen ist der TEWI-Vorteil der Luftanlage nicht mehr gegeben. Es wird daher damit gerechnet, daß die Kaltluftanlage nur eine vorübergehende Episode bleibt und nicht den ganzen Wagenbestand der Deutschen Bahn AG durchdringen wird. Langfristig wird auch bei Schienenfahrzeugen CO₂ als künftiges Kältemittel favorisiert (Adolph 1999).
- Von dem für 2010 nach Szenario I in sonstigen Mobilklimaanlagen zu erwartenden R134a-Bestand von 1637 t entfallen auf die Eisenbahn lediglich 100 t. Durch Anwendung und Beschränkung der Kaltlufttechnik auf den ICE-3 wird der R134a-Bestand in 2010 nicht 100 t, sondern nur 90 t betragen. Die laufenden Emissionen liegen bei 9 statt 10 t. Die Ersparnis ist gering. Die eine Tonne Minderemission reduziert den Beitrag zum Treibhauseffekt um 1300 t CO₂-Äquivalente.¹⁰

¹⁰ Ein wichtiger Vorteil der Kaltluftsysteme soll genannt werden: Es sind keine Lager-, Entsorgungs- und Recyclingeinrichtungen für das Kältemittel erforderlich.

Lastkraftwagen (Nfz) ab 2007 mit CO₂

- Aufgrund der technischen Nähe zu Pkw-Klimaanlagen wird in Szenario II angenommen, daß die neuen Klimaanlagen für Lastkraftwagen aller Gewichtsklassen ab 2007 ebenfalls auf das Kältemittel CO₂ umgestellt werden. Der nach Szenario I errechnete R134a-Bestand von 886 t verringert sich dadurch bis 2010 auf 583 t. Die laufenden Emissionen vermindern sich im Minderungsszenario von 86 auf 61 t bzw. um 30%. Die Entsorgungsemissionen von 19 t bleiben vorerst unverändert. Der Beitrag zum Treibhauseffekt wird um 0,03 Mio. t CO₂-Äquivalente entlastet.
- Wenn alle drei genannten Reduktionsmaßnahmen durchgesetzt werden, nämlich Kaltwassersatz bei Bussen, Kaltluftanlage beim Hochgeschwindigkeitszug ICE-3¹¹ und CO₂-Anlagen bei Lastkraftwagen, dann ergibt sich für Sonstige Mobilklimaanlagen das Vergleichsbild von Szenario I mit Szenario II lt. Tabelle 16. Es emittieren insgesamt 71 t HFKW-134a weniger, und die Entlastung beim Beitrag zum Treibhauseffekt beträgt 0,09 Mio. t CO₂-Äquivalente.

Tab. 16: HFKW-134a-Emissionen aus sonstigen Mobilklimaanlagen 2000 - 2010 im Vergleich der Szenarien I und II*			
	2000	2005	2010
Emissionen Szenario I in t	62	129	193
Emissionen Szenario II in t	60	99	122
Ersparnis II zu I in t	2	30	71
<i>Ersparnis II zu I CO₂-Äquiv.**</i>	<i>0</i>	<i>0,04</i>	<i>0,09</i>

* Szenario II umfaßt die in diesem Abschnitt (3.2) dargestellten Reduktionsmaßnahmen.

** Mio. t CO₂-Äquivalente.

¹¹ Die Kaltluftanlage wird nur für diesen Zug angenommen, nicht für andere Züge. Diese bleiben vorerst bei 134a.

4 Vergleich der Emissionen aus Mobilklimaanlagen in Szenario I mit II

Das zusammengefaßte Bild von Pkw- und sonstigen mobilen Klimaaanlagen weicht wegen der dominierenden Rolle der Pkw-Klimaanlagen nur geringfügig von den bereits dargestellten Verhältnissen bei der Pkw-Klimatisierung ab. Die durch das Hinzufügen der sonstigen mobilen Klimaanlagen zu den Pkw-Klimaanlagen eingetretenen Änderungen gegenüber der Pkw-Klimatisierung allein liegen im Rahmen von 4 bis 6%:

- Der Kältemittelbestand aller Mobilklimaanlagen erhöht sich durch sonstige Mobilklimaanlagen gegenüber Pkw-Anlagen im Szenario I von 28 022 t um 1637 t auf 29 659 t und im Szenario II von 21 184 t um 1012 t auf 22196. Die Differenzen betragen zwischen 4 und 5,8%.
- Die laufenden Jahresemissionen aus allen Mobilklimaanlagen steigen im Jahr 2010 im Szenario I nicht auf 2792 t, sondern auf 2953 t. Im Szenario II betragen sie im Jahr 2010 nicht nur 2221, sondern 2311 t. Die Differenzen liegen ebenfalls zwischen 4 und 5,8%.
- Die - in beiden Szenarien jeweils gleichgroßen - Entsorgungs-Emissionen verändern sich von 626 t bei den Pkw-Klimaanlagen zu 658 t bei allen mobilen Klimaanlagen. Die Differenz beträgt 4,8%.

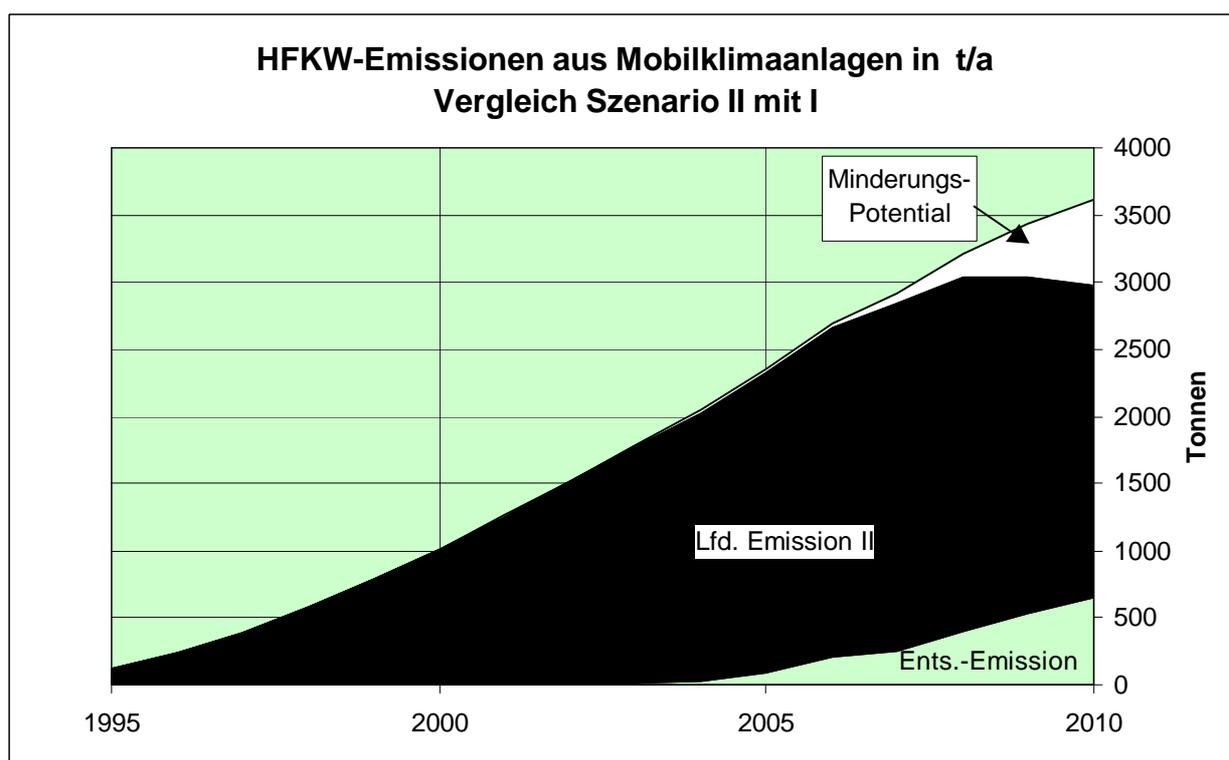


Diagramm 10: HFKW-Emissionen aus Mobilklimaanlagen in t. Vergleich Szenario II mit I. Bis 2005 unterscheiden sich die Emissionen nach BaU-Szenario I und Minderungsszenario II nicht. Die ab 2003 einsetzenden Entsorgungs-Emissionen (graue Fläche unten) sind in beiden Fällen identisch. Zwischen 2005 und 2010 nehmen die lfd. Emissionen nach Szenario II (schwarze Fläche) per Saldo nicht mehr zu und begründen gegenüber den lfd. Emissionen nach Szenario I das Minderungspotential (weiße Fläche), das bis 2010 auf 642 t wächst. Die Gesamtemissionen (lfd. + Entsorgungs-Emissionen) betragen in Szenario I dann 3611 t, in Szenario II nur 2969 t.

- Wie sich im Zeitverlauf zwischen 1995 und 2010 die Emissionen aus allen Mobilklimaanlagen entwickeln, zeigt Diagramm 10 für beide Szenarien.
- Die treibhauswirksamen Emissionen aus Pkw-Klimaanlagen betragen 2010 im Szenario I rd. 4,44 Mio. t CO₂-Äquivalente. Der entsprechende Wert beträgt für sämtliche Mobilklimaanlagen 4,69 Mio. t CO₂-Äquivalente.
- Im Szenario II betragen die Emissionen aus Pkw-Klimaanlagen im Jahre 2010 insgesamt 3,70 Mio. t CO₂-Äquivalente. Der Wert für alle mobilen Klimaanlagen zusammen beträgt 3,86 Mio. t (vgl. Diagramm 11 und Tabelle 17, letzte Zeile).

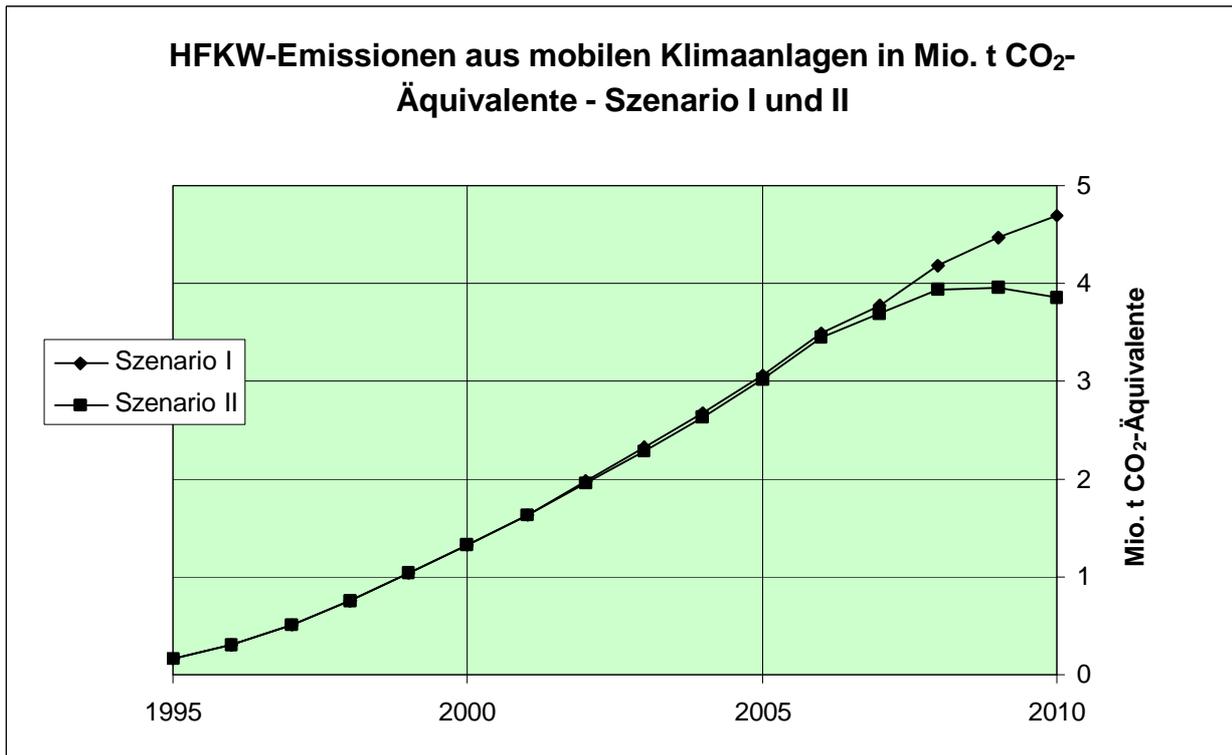


Diagramm 11: HFKW-Emissionen aus mobilen Klimaanlagen in Mio. t CO₂-Äquivalente - Szenario I und II. Der Unterschied zwischen dem Beitrag zum Treibhauseffekt durch die HFKW-Emissionen nach Szenario I und Szenario II beginnt erst ab 2007, wenn die Pkw-Klimaanlagen auf CO₂-Kältemittel umgestellt werden. Bis 2010 beträgt die Differenz 0,83 Mio. t CO₂-Äquivalente.

- Wie sich im Zeitverlauf zwischen 1995 und 2010 der Beitrag zum Treibhauseffekt durch die Emissionen aus allen mobilen Klimaanlagen entwickelt, zeigt Diagramm 11 getrennt für Szenario I und II. Die Zahlenwerte für die vier Stichjahre 1995, 2000, 2005 und 2010 bringt Tabelle 17.

Tab. 17: Emissionen von HFKW aus allen Mobilklimaanlagen 1995-2010 in t und Mio. t CO₂-Äquivalente nach Szenario I und II				
	1995	2000	2005	2010
Gesamt-Emissionen Szen. I	126 t	1017 t	2352 t	3611 t
Gesamt-Emissionen Szen. II	126 t	1016 t	2322 t	2969 t
<i>Mio. t CO₂-Äquivalente Szen. I</i>	<i>0,15</i>	<i>1,32</i>	<i>3,06</i>	<i>4,69</i>
<i>Mio. t CO₂-Äquivalente Szen. II</i>	<i>0,15</i>	<i>1,32</i>	<i>3,02</i>	<i>3,86</i>

3 PU-Montageschaum

Bei Polyurethan-Montageschaum aus der Dose ist Deutschland der weltgrößte Einzelmarkt. Vom Weltabsatz von rd. 100 Mio. Stück (1997) wird ca. ein Viertel hier verkauft, und zwar in Dosengrößen zwischen 300 und 750 ml (Henkel 1999). Rechnerisch hat eine durchschnittliche Dose ein Schaumgewicht von 660 Gramm, wovon ca. 18% Treibmittel sind. Diese waren 1997 Mischungen aus etwa 40% der leicht brennbaren Gase Propan, Butan, Dimethylether (DME) und etwa 60% HFKW, die schwerer (152a) oder nicht entflammbar (134a) sind (Coens 1999). Der HFKW-Anteil im Treibgas ist seit 1995 rückläufig: 1995 betrug er in der 660-g-Dose 84 Gramm, 1997 nur noch 75 g. Er wird in den nächsten Jahren auf 66 g oder 10% des Schaumgewichts sinken (Pauls 1999).

Das Treibmittel dient nur zum Austreiben des Schaumes aus der Dose (propellant), nicht der Schäumung (blowing agent) oder Isolierung. Es verflüchtigt sich bei der Anwendung bis auf geringe Restgehalte, die maximal ein Jahr im ausgehärteten Schaum bleiben (Kluth 1999). Die Hauptanwendung des PU-Montageschaums, der überwiegend einkomponentig formuliert ist, ist die Verfüllung von Hohlräumen und Fugen beim Innenausbau von Wohnungen (AKPU o.J.). Die in Deutschland übliche Art des Fensterbaus begünstigt den hohen Verbrauch (Rathor 1999).

Die in Deutschland 1997 ca. 24 Mio. verkauften Dosen waren zu über 80% importiert. Sie hatten als HFKW-Treibmittel zu einem Drittel 152a und zu zwei Drittel 134a. Bei den in Deutschland ca. 16 Mio. abgefüllten PU-Schaum-Dosen, die zu ca. 75% exportiert werden, ist der Anteil von 134a höher und beträgt 80 bis 90%.

1 Inlands-Verbrauch und -Emissionen 1995 - 1997

Die Dosen werden spätestens ein halbes Jahr nach Verkauf vom professionellen Handwerker oder vom Do-It-Yourself-Heimwerker angewendet. Die HFKW-Emission des Jahres n wird daher als Summe der halben Absätze des Jahres n-1 und des Jahres n bestimmt. Dazu kommen Befüllungsverluste aus der inländischen Produktion des laufenden Jahres n, die ca. 0,5 g pro Dose betragen (Henkel 1999). Verbrauchte Dosen sind bei der Entsorgung nicht vollständig leer, sondern enthalten noch etwa 10% Schaum einschließlich Treibgas (Jungbluth 1999). Dieses Treibgas gelangt mit Zeitverzögerung zum größten Teil ebenfalls in die Atmosphäre. Das gilt auch für die 30% Dosen, die in die zentrale Rückgewinnungsanlage für PU-Schaum-Dosen nach Thurnau gebracht werden (Schwarz/Leisewitz 1996, 113).

Die Jahresemissionen 1995 bis 1997 aus der Anwendung und - zu einem kleinen Teil - der Befüllung sind in Tabelle 18 dargestellt.

Tab. 18: Emissionen von HFKW-Treibmitteln für PU-Montageschaum 1995-1997 in t und Mio. t CO₂-Äquivalente			
	1995	1996	1997
HFKW-152a + 134a in t	1680	1749	1805
Mio. t CO ₂ -Äquivalente	1,36	1,39	1,48
Dosenabsatz in Mio. Stück	20	22	24

Quellen: Befragung maßgeblicher Abfüller und Händler von PU-Dosenschaum.

2 BaU-Emissionsprognose 2010 - Szenario I

Der Absatz von PU-Schaum-Dosen ist in Deutschland von 1994 bis 1998 jährlich absolut um 2 Mio. Stück gegenüber dem Vorjahr gestiegen - von 18 Mio. in 1994 auf 26 Mio. in 1998 (Rathor 1999). Die Tendenz des Absatzes bleibt absolut ansteigend.

Annahmen für Szenario I:

1. Bis 2010 gilt ein jährliches Wachstum des inländischen Dosenabsatzes gegenüber dem Vorjahr in Höhe von 5%.
2. Der Inlandsmarkt wächst ausschließlich durch Importe, während die Eigenproduktion bei jährlich 16 Mio. Stück bleibt.
3. Die Treibmittel-Relation zwischen 152a und 134a bleibt bei importierten Dosen 1 zu 2, bei inländisch abgefüllten bei 1 zu 7.
4. Der HFKW-Anteil am Schaumgewicht von 75 g pro 660-g-Normaldose sinkt kontinuierlich bis auf auf 66 g.

Das bedeutet, daß im Jahre 2009 ca. 44 Mio. und 2010 ca. 46 Mio. Dosen im Inland verkauft werden, von denen jede 66 g HFKW-Treibmittel enthält. Daraus resultieren in 2010 Anwendungsemissionen von knapp 3000 t. Dazu kommen Verluste bei der inländischen Abfüllung in Höhe von 8 t. Die Gesamtemissionen für 2010 betragen 1000 t HFKW-152a und 2000 t HFKW-134a bzw. zusammen 2,74 Mio. t CO₂-Äquivalente.

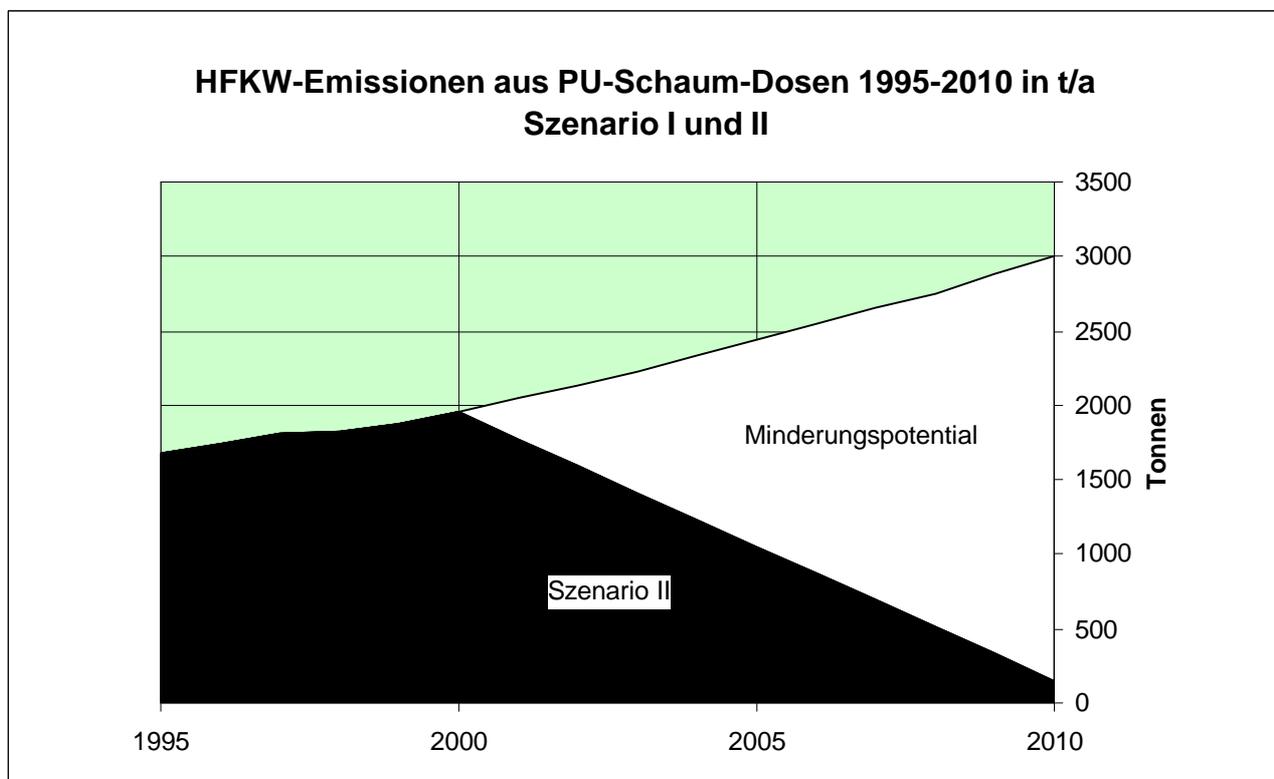


Diagramm 12: HFKW-Emissionen aus PU-Schaum-Dosen 1995-2010 in Tonnen. Bis 2000 steigen die Emissionen von 134a (2/3) und 152a (1/3) auf knapp 2000 t/a an. Im Szenario I (BaU) nehmen sie bis 2010 weiter zu auf 3000 t. Nach Szenario II werden als Treibmittel nach 2000 immer mehr und bis 2010 95% halogenfreie Kohlenwasserstoffe eingesetzt. In 2010 emittieren nur noch 150 t HFKW-134a, das Minderungspotential beträgt 2850 t. (Siehe folgenden Text.)

3 Relative Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II

- In Mitteleuropa ist die relative HFKW-Menge pro Schaumdose geregelt. Leitlinie ist seit 1993 eine freiwillige Vereinbarung des Arbeitskreises führender mittel- und westeuropäischer Abfüller (AKPU o.J.). Dessen "50 Gramm-Regel" sieht pro 750 ml-Dose maximal 50 g leichtentzündliche Gase (Propan, Butan, DME) vor, um bei Entleerung einer ganzen Dose in engstem geschlossenem Raum (1,56 m³) eine explosionsfähige Atmosphäre zu vermeiden (Cocon 1996). Im Gemisch mit 134a oder mit 152a wird diese Konzentration vermieden. 152a ist zwar brennbar, aber erst ab einer rd. 3-mal so hohen Konzentration wie die Kohlenwasserstoffe, so daß damit die untere Explosionsgrenze (UEG) unterschritten wird.
- In Nordeuropa werden als Treibmittel die leicht entzündlichen Gase Propan/Butan/DME ohne Halogene eingesetzt. Wegen der damit gegebenen geringeren Kosten verzichten auch Abfüller aus West- und Mitteleuropa für Lieferungen nach Osteuropa auf HFKW im Treibgasgemisch. In den USA (rd. 15% des Weltmarkts) wird nur etwa ein Drittel des Montageschaums mit HFKW getrieben - vor allem bei Abfüllern mit Stammsitz in Europa. Für ein Drittel wird Propan/Butan und für ein anderes Drittel der HFCKW-22 eingesetzt. Es werden nicht (wie in Europa) nur Dosen < 750 ml verarbeitet, sondern auch Behälter über 50 Liter.
- In Ländern ohne HFKW-Treibmittel wie Skandinavien hat es seit dem Verzicht darauf keinen Unfall gegeben, der auf die leichte Entzündlichkeit der Treibgase zurückzuführen ist. Auch aus Osteuropa sind keine Verpuffungen bekannt.
- Als Alternative zum Treibmittel 134a gibt es zwei Optionen:
 - Unter Aufrechterhaltung der 50-Gramm-Regel Umstellung auf 152a, dessen GWP statt 1300 (134a) nur 140 beträgt. HFKW 134a nur für sicherheitsrelevante Anwendungen in kleinen geschlossenen Räumen und untertage (Marktanteil 5%).
 - Abkehr von der 50-Gramm-Regel und Verzicht auf HFKW zugunsten Propan, Butan und DME. HFKW-134a nur für sicherheitsrelevante Anwendungen in kleinen geschlossenen Räumen und untertage (Marktanteil 5%).
- Die erste Option wird heute von zwei der zehn größten europäischen Abfüller wahrgenommen. Sie ist nicht nur realisierbar, sondern wird bereits realisiert.
- Die zweite Option wird bereits für die Märkte außerhalb Mitteleuropas praktiziert. Zu den Unternehmen, die für diese Märkte statt HFKW nur leicht entflammbare Kohlenwasserstoffe als Treibmittel einsetzen, gehören auch einige der zehn größten europäischen Abfüller. (Auf die zehn größten europäischen Abfüller entfallen 80% des weltweiten Absatzes).
- Innerhalb der zehn größten europäischen Abfüller von PU-Montageschaum wird über den Fortbestand der für Mitteleuropa eingeführten Beschränkung auf 50 g leichtentzündliche Treibgase pro 750 ml-Dose debattiert. Die befürchteten Explosionen bei Anwendern HFKW-freier PU-Dosen sind bisher ausgeblieben (Henkel 1999). Die Argumente pro HFKW verlieren an Gewicht. Hauptthemnis für die Einführung von mehr bzw. ausschließlich halogenfreien Treibgasen ist mangelnder Explosionsschutz bei bestehenden Abfüllanlagen.

- Vom Standpunkt des Klimaschutzes ist die Umstellung der Treibmittel für PU-Montageschaum von 134a auf 152a eine gute, die Umstellung von HFKW auf halogenfreie Kohlenwasserstoffe eine noch bessere Lösung. Für das Szenario II wird angenommen, daß bis 2010 HFKW-Treibmittel grundsätzlich durch Kohlenwasserstoffe ersetzt sind. HFKW-Treibmittel werden in diesem Szenario nur noch für Anwendungen in geschlossenen engen Räumen und untertage benutzt, und zwar in einem Umfang von ca. 5% des Gesamtmarktes.
- Daraus ergibt sich im Szenario II für 2010 eine Emissionsmenge von nur 150 t (nur 134a) statt 3000 t HFKW. Das ist eine Reduktion gegenüber Szenario I um 95%.
- In CO₂-Äquivalenten ausgedrückt sind es im Jahr 2010 statt 2,74 Mio. t (Szenario I) im Minderungsszenario nur noch 0,19 Mio. t. Das ist eine Reduktion um 93% (vgl. Diagramm 13).

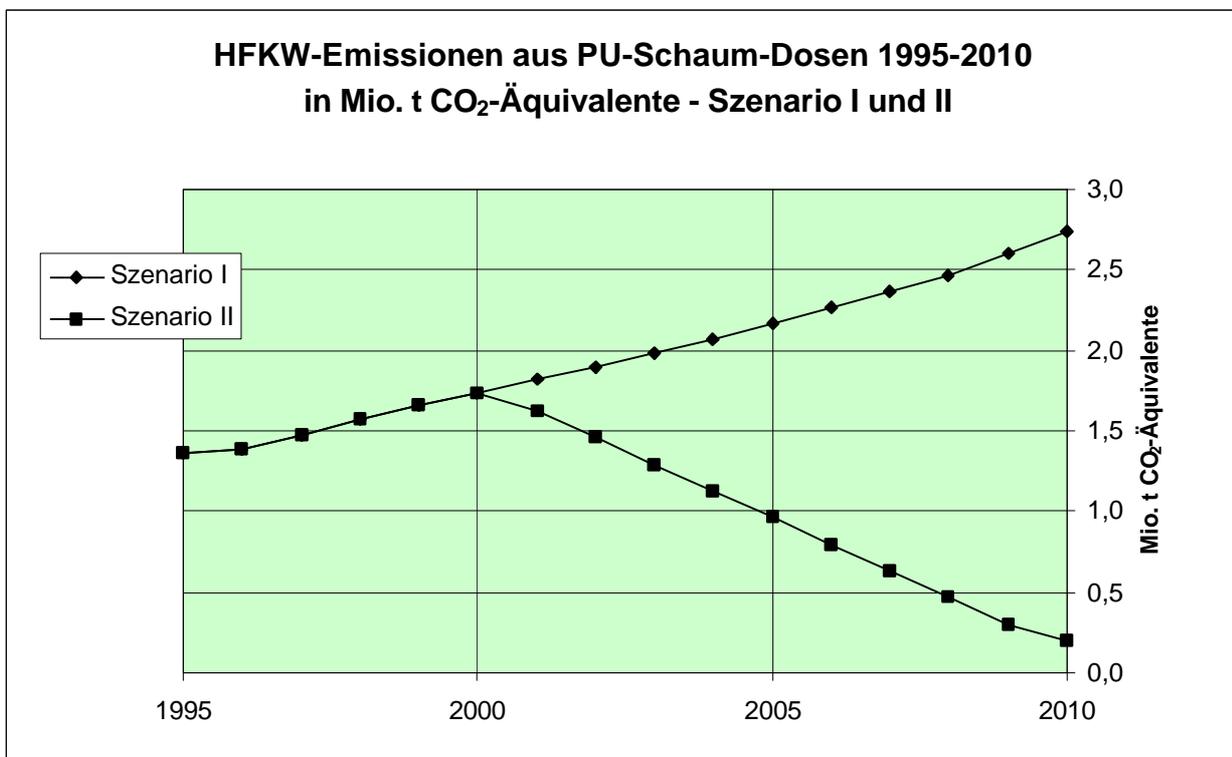


Diagramm 13: HFKW-Emissionen aus PU-Schaum-Dosen 1995-2010 in Mio. t CO₂-Äquivalente - Szenario I und II. Von 1995 bis 2000 geht die Entwicklung nach Szenario I, das im Jahr 2010 den Beitrag zum Treibhauseffekt durch PU-Dosenschaum-Treibmittel auf 2,74 Mio. t CO₂-Äquivalente ansteigen läßt. Werden aber ab 2000 sukzessive HFKW im Treibgasgemisch weggelassen, sinkt der Beitrag zum Treibhauseffekt auf 0,19 Mio. t CO₂-Äquivalente ab.

Tab. 19: Beitrag zum Treibhauseffekt durch Treibmittel für PU-Montageschaum 1995-2010 in Mio. t CO₂-Äquivalente

	1995	2000	2005	2010
Szenario I	1,36	1,74	2,17	2,74
Szenario II	1,36	1,74	0,96	0,19

Anm.: 1995 reale Emissionen, danach Prognosen.

4 PU-Schaumprodukte

PU-Schaumprodukte sind aus Weichschaum, Integralschaum und Hartschaum. Für Weichschaum werden keine HFCKW und auch keine HFKW als Treibmittel benötigt. In Hartschäumen kommen als Treibmittel jetzt HFCKW vor und HFKW erst seit 1998. Zwischen 1995 und 1997 wurden HFKW nur bei Integralschaum eingesetzt.

1 Inlands-Verbrauch und -Emissionen 1995-1997

Die Hauptanwendung von Integralschaum, wo seit 1996 zur Verbesserung der Produktqualität der HFKW-134a in kleinen Mengen von 1% als Hilfstreibmittel dem Schäumen zugesetzt wird, sind Sohlen für Sport- und Freizeitschuhe. Chemisch hängt dies damit zusammen, daß die Polyole (Reaktionskomponente der Isocyanate) in dieser Anwendung keine Polyesterpolyole, sondern Polyetherpolyole sind.

Der inländische HFKW-Einsatz für Integralschaumprodukte betrug 1996 etwa 60 t und 1997 70 t. Die HFKW dienen nicht der Wärmedämmung. Sie bleiben nicht im Produkt, sondern emittieren im Jahr der Produktion. Daher sind Verbrauch und Emission gleich.

Tab. 20: HFKW-Verbrauch bzw. -Emissionen bei Integralschaum 1995-1997			
in t und Mio. t CO₂-Äquivalente			
	1995	1996	1997
HFKW-134a in t	0	60	70
<i>Emiss. in Mio. t CO₂-Äquivalenten</i>	0	0,08	0,09

Quellen: Wiedermann 1999; Kroesen 1999; Schubert 1999.

Der Verbrauch steigt zur Zeit (1999) noch an. Nach Schätzung der befragten Experten wird er sich ab 2000 auf einem konstanten Niveau von 120 t/a bewegen. Ein Ersatz für 134a - etwa durch flüssige HFKW - wird mittelfristig nicht erwogen.

2 Zu aktuellen und künftigen Treibmitteln bei PU-Hartschaum

Das Treiben von PU-Hartschaum kann ausschließlich durch CO₂ erfolgen, das durch chemische Reaktion von Wasser, das in kleinen Mengen in der Polyolformulierung enthalten ist, mit dem Isocyanat entsteht. Das Treibmittel CO₂ diffundiert im allgemeinen sehr schnell aus den von ihm geformten Schaumzellen wieder heraus - zugunsten von eindringender Luft, so daß das Dämmvermögen sinkt. Dieses muß durch größere Schaumdicke ausgeglichen werden. Für Einsatzzwecke, bei denen der Dämmeffekt gegenüber anderen Zielen (etwa Hohlraumauschäumung) zweitrangig ist, reicht dieses Verfahren aus.

Wo es auf gute Wärmedämmung (niedrige Lambda-Werte) ankommt, wird dem bei der Schäumung spontan gebildeten "chemischen Treibmittel" CO₂ ein physikalisches Treibmittel zugegeben, das in den Schaumzellen bleibt. Statt des früher universell verwendeten physikalischen Treibmittels FCKW-11 wird weltweit der - gleichfalls bei Raumtemperatur flüssige und schwer brennbare - HFCKW 141b eingesetzt - manchmal auch das HFCKW-Gemisch 22/142b. Die Einsatzmenge beträgt ca. 9% des Schaumgewichts. HFCKW sind in wenigen Jahren in den Industrieländern verboten.

2.1 HFKW-134a als Zusatz-Treibmittel für Sandwichelemente

Die drei größten Einsatzgebiete von PU-Hartschaum mit je 50 000 t jährlicher Schaumproduktion sind in Deutschland erstens Haushaltskühlgeräte, zweitens flexibel (z.B. mit Aluminiumfolie) beschichtete Dämmplatten für die Dachisolierung und drittens Sandwichelemente, d.h. starr (mit Stahlblech) beschichtete Dämmplatten als tragende Bauteile für Industriehallen, Kühlhäuser usw. Im Unterschied zu vielen anderen Ländern ist das meistverwendete Treibmittel für PU-Hartschaum kein HFCKW, sondern der halogenfreie Kohlenwasserstoff Pentan. Bei Hausgeräten wird ausschließlich Pentan als Treibmittel verwendet, bei flexibel beschichteten Dämmplatten aus kontinuierlicher Fertigung wird es zu über 90% eingesetzt (IVPU 1999). Pentan bleibt wie HFCKW in den Schaumzellen und trägt dadurch zur Wärmedämmung bei. Seine Verwendung erfordert jedoch explosionsgeschützte Verarbeitungsanlagen, neue Tanks und Leitungen usw. Das bedeutet hohe Investitionen, die sich erst bei größeren Durchsätzen dank des niedrigen Treibmittelpreises amortisieren.

Sandwichelemente wurden 1997 dagegen noch überwiegend mit HFCKW getrieben. Hier ist seit 1998 eine Umstellung im Gang, die bis 2000 dazu führt, daß die Hälfte des Schaumes ebenfalls mit Pentan getrieben wird und die andere Hälfte vorwiegend mit CO₂, das durch Zugabe von 134a als sog. Stützgas ergänzt wird (Befragung Sandwichelemente). Mit dem in den Schaumzellen bleibenden 134a ist für einen gegebenen Dämmwert eine niedrigere Dichte des Schaumes (Gewichtersparnis!) möglich: sein spezifisches Dämmvermögen steigt. Außerdem wird ein ev. Schrumpfen des Schaumkernes infolge schneller CO₂-Ausgasung verhindert. Der Einsatz von HFKW-134a ist gegenüber HFCKW-141b auf ca. ein Drittel (3% des Schaumgewichts) begrenzt, weil es sich in der Polyolkomponente nur schlecht löst. (Schubert 1999)

Da der HFKW-134a als physikalisches Zusatz-Treibmittel für Wasser-CO₂-getriebene Sandwich-Schäume erst seit 1998 eine Rolle spielt, kommt er in der Statistik 1995-97 für PU-Hartschaum noch nicht vor, wohl aber in der Emissionsprognose bis 2010.

2.2 Neue flüssige HFKW für Kleinanwendungen

Ebenfalls erst in Zukunft für HFKW-Treibmittel relevant werden Anwendungen von PU-Hartschaum, die gewöhnlich als "sonstige" zusammengefaßt werden und gegenwärtig den HFCKW-141b benutzen (Jeffs/de Vos 1999). Dazu gehört Dach-Spritzschaum, dessen offene Applikation vor Ort aus Sicherheitsgründen schwer brennbare flüssige Treibmittel verlangt. Pentan ist hier nicht einsetzbar. Quantitativ noch größere Bedeutung haben Dämmschäume aus diskontinuierlicher Herstellung: Blockschäume, aus denen etwa Isolierschalen geschnitten werden, oder Kleinserien-Dämmplatten für Kühlfahrzeuge, Kühlzellen, gewerbliche Kühlmöbel u. dgl. Auch ein Teil kontinuierlich gefertigter Dämmplatten mit flexibler Abdeckung wird nicht mit Pentan, sondern mit 141b getrieben. Typisch für diese Anwendungen sind erstens hohe Ansprüche an das Dämmvermögen, das nur durch Treibmittel zu erreichen ist, die in den Schaumzellen verweilen, und zweitens klein- bis mittelbetriebliche Verarbeiter, für die die Umrüstung von 141b auf Pentan zu teuer ist (Wiedermann 1999; Szily 1999; Esser 1999).

In der EU, in Japan und in den USA wird 141b als Schaumtreibmittel ab 2003/2004 verboten sein. Bis zu diesem Zeitpunkt will die Chemische Industrie neue flüssige Treibmittel auf HFKW-Basis kommerziell verfügbar machen. Es handelt sich um die HFKW 245fa und 365mfc, die bei 15,3°C bzw. 40,2°C sieden (UNEP-FTOC 1998). 245fa und

365mfc werden hier als einheitliche Substanz behandelt, da ihre jeweiligen Verbrauchsmengen heute noch nicht absehbar sind und sich die GWP-Werte kaum unterscheiden: 820 für 245fa, 810 für 365mfc. Als GWP für "245fa/365mfc" gilt 815.

2.3 Emissionsprofile von 134a und 245fa/365mfc aus PU-Hartschaum

Schäumen ist prozeßbedingt mit hohen Treibmittelemissionen verbunden, während die laufenden Jahresemissionen aus dem fertigen Produkt gering sind. Für das Emissionsprofil sind hohe Verluste (10 bis 25% der Einsatzmenge) im ersten Nutzungsjahr typisch, während in der Gebrauchsphase bis zur Entsorgung nur 0,5 bis 1,5% jährlich entweichen. In Tabelle 21 sind die Standard-Werte für 134a und 245fa/365mfc nach IPCC-Empfehlungen für verschiedene Anwendungen zusammengestellt.

Tab. 21: Emissionsprofil von PU-Hartschaum			
HFKW-134a-Anwendungen	Lebensdauer in Jahren	Verluste im ersten Jahr %	Jährlicher Verlust %
PU - Kontinuierliche Dämmplatten	50	10	0,5
HFKW-245fa/365mfc- Anwendungen			
PU - Diskontinuierl. Dämmplatten	50	10	0,5
PU - Blockschaum	50	10	1
PU - Spritzschaum	50	25	1,5
PU - Gießschaum	15	10	0,5
PU - Kontinuierliche Dämmplatten	50	7,5	0,5

Quelle: IPCC 1999, Anhang 2 (S. 64).

Verluste im ersten Jahr sind die Emissionen während des Schäumprozesses (Anlagenemissionen). Sie werden für den HFKW-134a bei Sandwichelementen (kontinuierlich gefertigte Dämmplatten) auf 10% der Einsatzmenge geschätzt. Die Verluste in der Gebrauchsphase (Bestandsemissionen) werden mit 0,5% jährlich angenommen. Bei der Entsorgung nach 50-jähriger Nutzungsdauer sind rechnerisch noch 65% des Treibmittels im Schaum enthalten. Was mit dem restlichen Treibmittel geschieht, ist bis 2010 nicht relevant. Dies gilt auch für die Anwendungen von 245fa/365mfc. Bei ihnen beträgt der Herstellungsverlust (Anlagenemissionen) im Mittel 12,5% und der jährliche Nutzungsverlust aus dem Bestand im Mittel 0,8%.

3 BaU-Emissionsprognose bis 2010 -Szenario I

Die Prognose für 134a als Zusatz-Treibmittel geht davon aus, daß erstens die Verwendung für Integralschaum konstant bei 120 t/a bleibt, und daß zweitens ab 2000 die eine Hälfte des Sandwichelemente-Hartschaums mit Pentan und die andere Hälfte mit Wasser/CO₂ plus 134a getrieben wird. Statt rd. 9% HFCKW (141b oder 142b/22) kommen hier vom HFKW-134a nur 3% in Bezug auf das Schaumgewicht zum Einsatz. Werden 25 000 t Hartschaum pro Jahr (hier: Jahr 2000) auf diese Weise erzeugt, beträgt die Einsatzmenge von 134a etwa 750 t. Bei einer jährlichen Wachstumsrate für den Sandwich-Hartschaum von 5% steigt die Einsatzmenge bis 2010 auf 1220 t an. (Dazu kommen konstante 120 t HFKW-134a für Integralschaumprodukte.)

Als Obergrenze des deutschen Jahresbedarfs für die neuen flüssigen HFKW 245fa oder 365mfc wird in Industriekreisen für 2010 eine Menge von ca. 2500 t/a erwartet (VCI 1999; Wiedermann 1999). Diese Schätzung gründet auf zwei Voraussetzungen: Erstens steigt die "sonstige" Schaumproduktion bis 2010 jährlich um 5% bis auf 30 000 t/a. Zweitens bleibt der heutige Marktanteil halogenierter Treibmittel konstant: Der HFCKW-141b wird generell von den neuen flüssigen HFKW abgelöst. Werden diese Maßstäbe angelegt, kann der Verbrauch im ersten vollen Einsatzjahr (2004) 1850 bis 1900 t betragen, um dann jährlich um 5% bis auf 2500 t/a zuzunehmen. Die Einsatzmenge der flüssigen HFKW in Bezug auf das Schaumgewicht liegt bei 8 bis 9%.

3.1 Emissionen von 134a bis 2010

Die 134a-Emissionen aus der inländischen Produktion (Anlagenemissionen) steigen von 2000 bis 2010 von 75 auf 122 t ohne und von 195 auf 242 t mit Integralschaum. Die laufenden Emissionen vom inländischen Hartschaumbestand (der Inlandsmarkt ist ein Drittel kleiner als die Inlandsproduktion) sind in den ersten Nutzungsjahren noch gering. Sie bewegen sich von 2000 bis 2010 von knapp 2 t bis auf 29 t. Die Gesamtemissionen (einschließlich Integralschaum) steigen von 197 auf 272 t: eine Zunahme des Beitrags zum Treibhauseffekt von 0,26 auf 0,35 Mio. t CO₂-Äquivalente.

3.2 Emissionen von 245fa/365mfc

Die Anlagenemissionen der erst 2004 vollständig eingeführten flüssigen HFKW-Treibmittel liegen höher als diejenigen von 134a, weil die Einsatzmenge in Bezug auf das Schaumgewicht größer ist (8-9% statt 3%). Im Jahre 2004 betragen sie 233 t, im Jahr 2010 sind es 313 t. Bei den Bestandsemissionen (der Inlandsmarkt ist bei diesen Anwendungen etwa identisch mit der Inlandsproduktion) sind die entsprechenden Werte 7 bzw. 94 t. Die Gesamtemissionen steigen von 240 auf 407 t: eine Zunahme des Beitrags zum Treibhauseffekt von 0,2 auf 0,33 Mio. t CO₂-Äquivalente.

4 Relative Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II

Das Minderungsszenario nimmt an, daß beim Hartschaum nach dem HFCKW-Ausstieg die Hinwendung zu Stoffen ohne Treibhauspotential weitergeht. Auch ohne gesetzliche Regulierung wird sich präventiv das langfristig anwendungssicherer erscheinende Treibmittel dort durchsetzen, wo es ohne Nachteile für die Dämmwirkung möglich ist.

Bei Sandwichelementen planen große Hersteller, die seit 1998 den HFCKW-134a als Zusatztreibmittel zu CO₂ einsetzen, schon in Kürze beim größten Teil ihrer Produktpalette wieder darauf zu verzichten. Dies soll u.a. durch Verbesserungen der Zellenstruktur CO₂-getriebener Hartschäume möglich sein (Befragung Sandwichelemente).

Viele Betriebe der "sonstigen" PU-Hartschaum-Anwendungen, die den bis mindestens 2003 erlaubten HFCKW-141b nutzen, haben bei der Umstellung technisch die Wahl zwischen Pentan, Wasser-CO₂ und den neuen HFKW. Die oben genannten Befürchtungen über die langfristige Versorgungssicherheit mit treibhauswirksamen Substanzen dürften auch hier Pentan und Wasser-CO₂ begünstigen, zumal über Preise und kommerzielle Verfügbarkeit der flüssigen HFKWs noch immer Unsicherheiten bestehen.

4.1 HFKW-Einsatz bis 2010 um 50% gegenüber Szenario I verringert

In Szenario II wird für Sandwichelemente angenommen, daß bereits ab 2001 eine Abkehr von 134a als Zusatz-Treibmittel einsetzt, die bis 2010 die nach Szenario I verwendete Einsatzmenge um die Hälfte verringert - von 50% der Fälle auf 25%

Für die "sonstigen" Anwendungen gilt in Szenario II, daß 2004 nicht alle, sondern nur 90% der bisherigen 141b-Anwender auf flüssige HFKW umsteigen und daß sich ihr Anteil bis 2010 auf 50% gegenüber Szenario I vermindert.

Für Integralschaum werden keine Änderungen gegenüber Szenario I unterstellt.

4.2 Verminderte HFKW-Emissionen

Die Anlagenemissionen von 134a bei Hartschaum nehmen von 75 t im Jahr 2000 bis 2010 nicht auf 122 t zu, sondern sinken auf 61 t. Die laufenden Emissionen steigen bis 2010 nicht auf 29 t (Szenario I), sondern nur auf 22 t. Die Gesamtemissionen betragen in 2010 knapp 83 statt 152 t (vgl. Diagramm 14), was gegenüber Szenario I einen verminderten Treibhauseffekt um 90 Tsd. t CO₂-Äquivalente bedeutet.

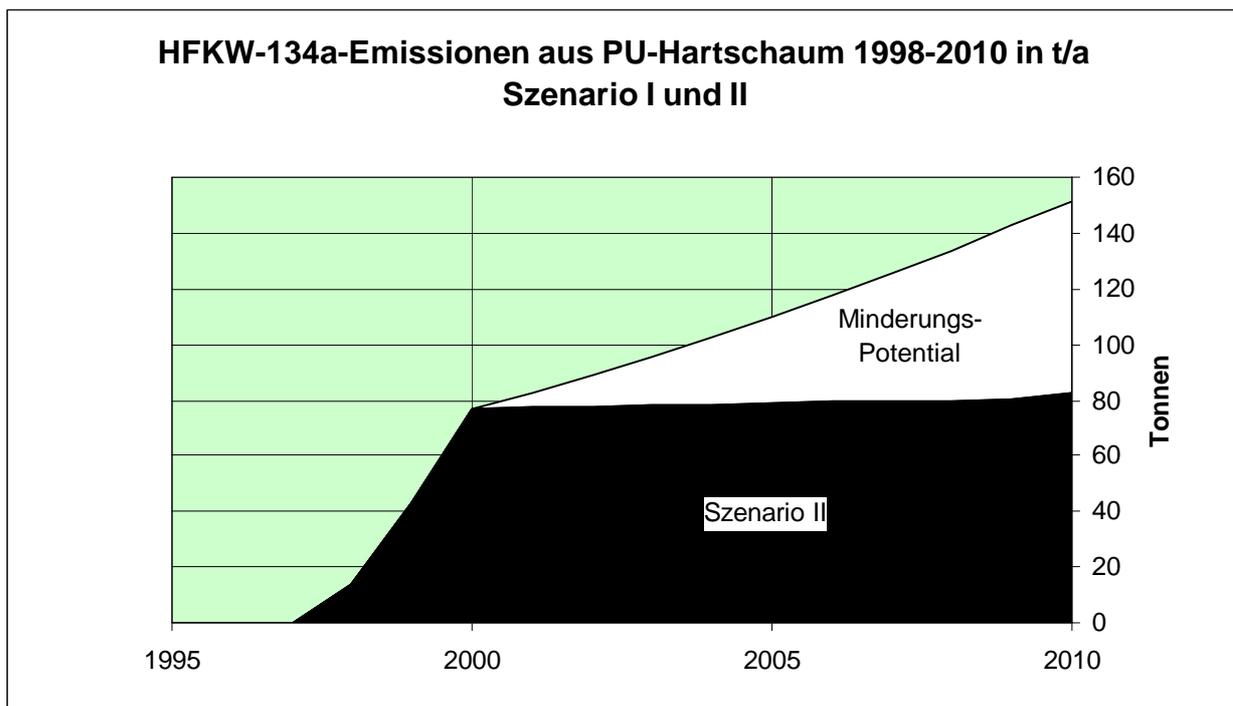


Diagramm 14: HFKW-134a-Emissionen aus PU-Hartschaum 1998-2010 in t - Szenario I und II. Nach Szenario I wird bei 50% der PU-Sandwichelemente 134a als Zusatz-Treibmittel eingesetzt, nach Szenario II bis 2010 nur noch bei 25%. Die Gesamtemissionen betragen 2010 nach Szenario II (untere Fläche) 83 t statt 152 t wie in Szenario I (Summe beider Flächen).

Die Anlagenemissionen der flüssigen HFKW betragen im Jahr 2010 nicht 313, sondern nur noch 156 t. Bei den laufenden Bestandsemissionen geht der Anstieg von 7 t (2004) statt auf 94 t auf nur 67 t in 2010. Die Gesamtemissionen betragen in 2010 noch 223 t statt 407 t (vgl. Diagramm 15). Damit senkt Szenario II bei flüssigen HFKW den Beitrag zum Treibhauseffekt um 150 Tsd. t CO₂-Äquivalente gegenüber Szenario I.

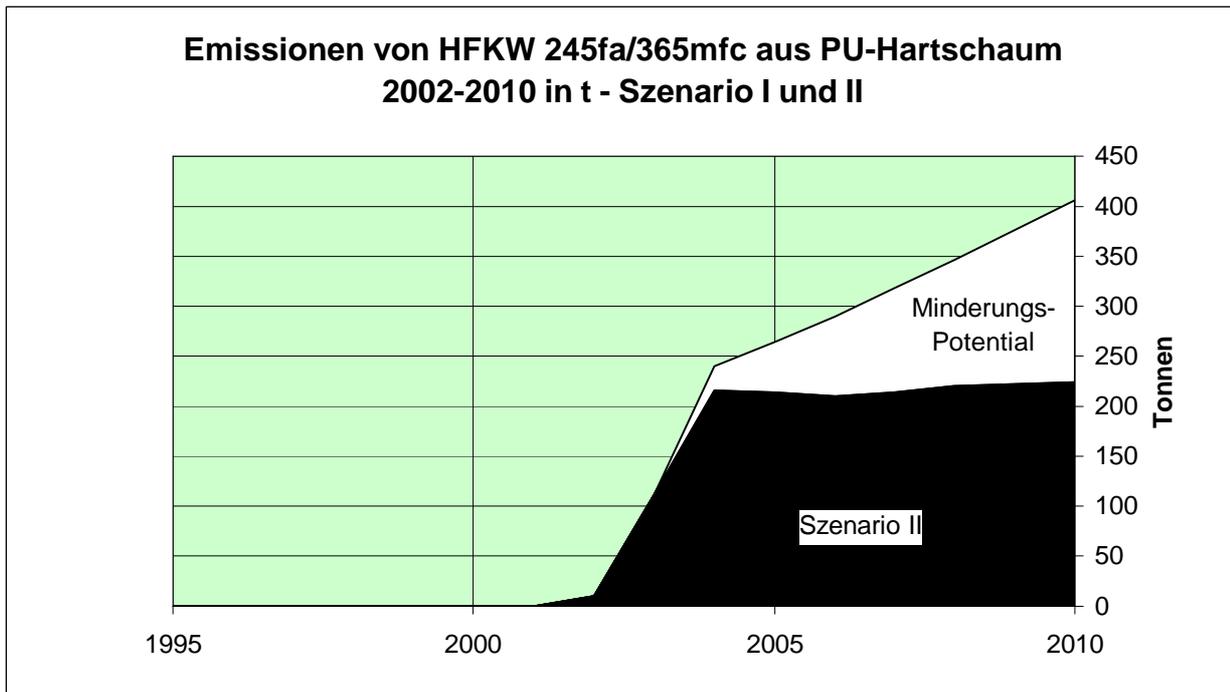


Diagramm 15: Emissionen von HFKW 245fa/365mfc aus PU-Hartschaum 2002-2010 in t - Szenario I und II. Nach Szenario I wird der HFCKW-141b ab 2004 ganz durch flüssige HFKW ersetzt. Nach Szenario II geschieht dies nicht vollständig: bis 2010 nur in 50% der Fälle. Die Gesamtemissionen betragen in 2010 nach Szenario II (untere Fläche) nur 223 t statt 407 t wie in Szenario I (Summe aus beiden Flächen).

Werden die in beiden Szenarien gleichgroßen Emissionen von HFKW-134a aus der Integralschäumung mitberücksichtigt, ergeben sich für PU-Schaumprodukte folgende HFKW-Emissionswerte für 2000-2010 im Vergleich der Szenarien (Tabelle 22).

Tab. 22: HFKW-Emissionen aus PU-Schaumprodukten 2000 bis 2010 im Vergleich der Szenarien I und II			
	2000	2005	2010
Emissionen Szenario I in t	197	495	679
Emissionen Szenario II in t	197	413	426
Ersparnis II zu I in t	0	82	271
Ersparnis II zu I CO ₂ -Äquiv.*	0	0,08	0,23

* Mio. t CO₂-Äquivalente.

5 Beitrag zum Treibhauseffekt aller PU-Hartschaum-HFKW (Szenario I und II)

Die Emissionen von 134a und 245fa/365mfc betragen lt. Diagramm 16 im Jahr 2010 in Szenario I über 0,68 und in Szenario II 0,45 Mio. t CO₂-Äquivalente. Es handelt sich um die Emissionen aus Integralschaum und aus PU-Hartschaum in Kleinanwendungen und in Sandwichelementen.

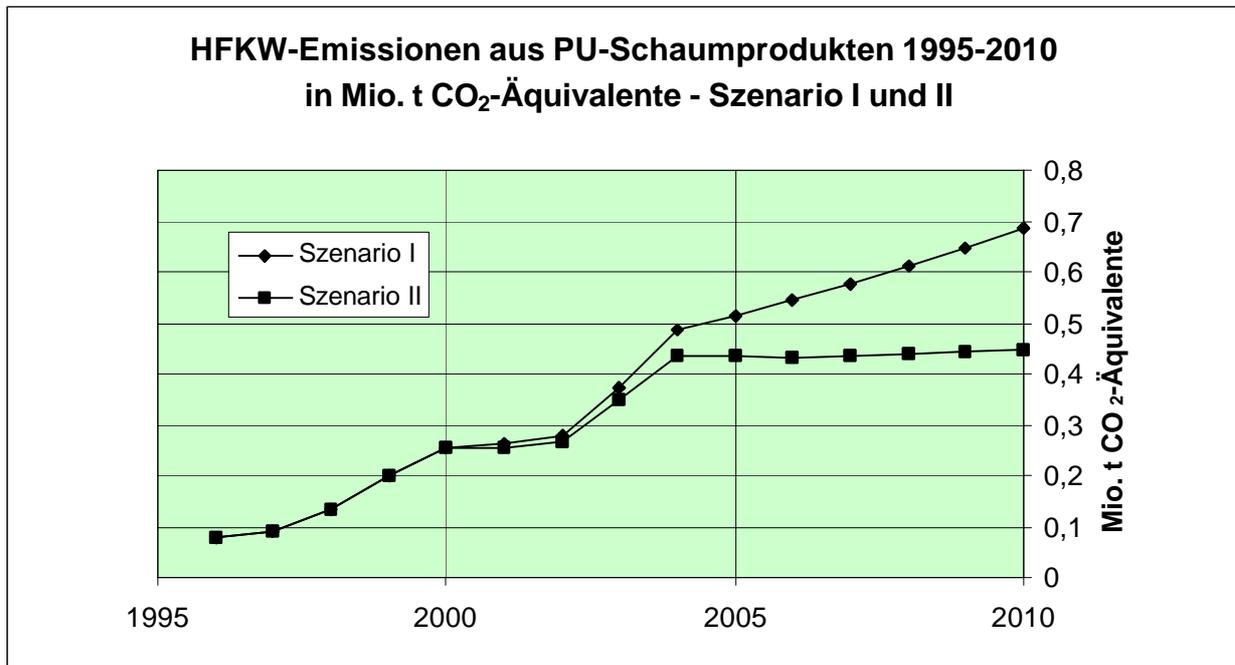


Diagramm 16: HFKW-Emissionen aus PU-Schaumprodukten 1995-2010 in Mio. t. CO₂-Äquivalente. In Szenario I steigen die Werte bis 2010 auf 0,68, in Szenario II auf 0,45 Mio. t.

5 XPS-Hartschaum

Schaumplatten aus extrudiertem Polystyrol (XPS) haben gegenüber PU-Platten den Vorzug, stärker wasserabweisend und äußerst druckfest zu sein. Sie werden vornehmlich in der Außendämmung eingesetzt und sind für den Naßbereich (erdberührte Außenwände) geeignet. Auch für XPS-Platten gibt es vor 1999 keine Verbräuche und Emissionen von HFCKW. Danach werden allerdings sehr große Mengen erwartet.

Bereits 1990 haben die deutschen Hersteller den FCKW-12 als Treib- und Zellgas durch HFCKW ersetzt, und zwar entweder durch 142b oder eine Mischung aus 142b und 22. 1996 verpflichteten sich die beiden bedeutendsten Hersteller in Deutschland, BASF und Dow Chemical, ab dem Jahr 2000 freiwillig auf HFCKW zu verzichten. Ein Wechsel von dem ab 2000 verbotenen Gemisch 142b/22 auf den noch vier Jahre länger erlaubten unvermischten 142b wird darum nicht erwartet. Vielmehr arbeiten alle vier deutschen Hersteller an Lösungen ohne Ozonschicht-schädigende Substanzen, die ab 2000 vollständig zum Einsatz kommen dürften (Befragung XPS-Schäumer).

1 Treibmittel ab 2000

Die meisten Inlandshersteller orientieren sich an HFCKW-Lösungen. Als Treibmittel kommen 152a und 134a infrage, und zwar entweder allein oder untereinander vermischt.

152a: Der Vorteil von 152a liegt darin, daß seine gute Löslichkeit in der Polystyrolschmelze eine sehr feine und homogene Zellstruktur erzeugt. Sein Nachteil ist die schnelle, nur wenige Wochen dauernde totale Diffusion aus den Schaumzellen¹². Das schränkt den Dämmeffekt ein; bzw. 152a alleine ist nicht für den ganzen Produktmix brauchbar. Außerdem ist es entflammbar und fordert Kosten für die Produktionssicherheit.

134a: Der unbrennbare HFCKW-134a hat den Vorteil, im fertigen Schaum zu bleiben und somit gute Dämmwerte zu garantieren. Anders als 152a ist er jedoch im Polystyrol nur schlecht löslich, so daß er nicht die für den ganzen Produktmix geeignete Zellstruktur erzeugen kann. 134a wird daher zur Steigerung der Wärmedämmung in Kombination mit einem anderen Treibmittel eingesetzt werden, das entweder 152a oder CO₂ ist.

CO₂: Wie beim PU-Hartschaum ist CO₂ ein mögliches Treibmittel, das jedoch im Falle XPS nicht aus einer chemischen Reaktion entsteht, sondern von außen zugeführt werden muß. Mit CO₂ allein läßt sich allerdings ohne Nachteile für das Dämmvermögen bisher nur ein kleiner Teil der Produktpalette herstellen. Von den bis 200 mm reichenden Plattenstärken sind nur solche unter 60 bis 70 mm Dicke den HFCKW-geschäumten qualitativ ebenbürtig. In Kombination mit 2 bis 3% organischem Treibmittel, nämlich Ethanol, ist allerdings die ganze Produktpalette ohne Qualitätseinbuße produzierbar, wie der Entwickler des Verfahrens, die BASF, erklärt (Boy 1999). Allerdings müssen die Produktionsanlagen dem leicht entzündlichen Treibmittel baulich angepaßt werden, was hohe Investitionen erfordert.

¹² In der Literatur des IPCC wird für 152a aus XPS-Schaum nur ein "First Year Loss" von 40% angegeben. Dieser Wert wird von Experten (Abbott 1999; Schubert 1999) als zu gering eingestuft.

Die inländischen Hersteller sind sich zwar darin einig, daß mit 152a und 134a hochwertige XPS-Platten erzeugt werden können. Die BASF allerdings betrachtet die HFKW nur als Übergangslösung und plant bisher, ihre Inlandsproduktion ab 2000 ganz mit CO₂ bzw. CO₂ mit Ethanol laufen zu lassen. Bei fehlender Marktakzeptanz sähe sich allerdings auch die BASF - nach eigener Aussage - zu HFKW gezwungen (Boy 1999).

Verbrauchs- und Emissionsfaktoren

Der Einsatz halogenierter Treibmittel pro Kubikmeter Schaumstoff liegt bei 4 bis 5 kg. Davon emittieren bereits auf der Produktionsanlage 15 bis 25% (UNEP-FTOC 1998, xvii), nach anderen Quellen 25% (Ashford 1999) bzw. 30% (Boy 1999). Dieser hohe Verlust ergibt sich aus dem weitgehend offen betriebenen Schäumen: Das Treibmittel wird unter hohem Druck in einen Extruder mit aufgeschmolzenem Polystyrolgranulat eingespritzt und gelöst. Beim Austritt der Schmelze auf das gekühlte Schaumband verdampft das Treibmittel infolge des Druckabfalls und bringt das Polystyrol zum Schäumen (Boy 1997). Auffangen und Rückgewinnung wurden erprobt - bislang aber aus technischen und ökonomischen Gründen nicht umgesetzt (UNEP-FTOC 98, xvii).

Soweit mit 152a geschäumt wird, diffundiert das restliche Treibmittel noch weitgehend im Fabriklager aus den Platten (Schubert 1999). 134a dagegen bleibt im Produkt und gast fast so langsam wie 142b aus. Die Halbwertszeit liegt für eine 100 mm dicke Platte für 134a bei 76, für 142b bei 84 Jahren (Weilbacher 1987). Die hier verwendete jährliche Emissionsrate 0,66% für den gesamten Produktmix orientiert sich an der 100 mm Plattenstärke. Tabelle 23 enthält die hier verwendeten Emissionsfaktoren.

Tab. 23: Emissionsprofil für XPS-Hartschaum			
Treibmittel	Lebensdauer in Jahren	Verlust im ersten Jahr %	Jährlicher Verlust %
HFKW-134a	50	25	0,66
HFKW-152a	50	100	-

Quellen: Boy 1997; Weilbacher 1987. Die IPCC-Werte (IPCC 1999) für 152a (40% Verlust im ersten Jahr) wurden nicht übernommen.

2 BaU-Emissionsprognose 2010 - Szenario I

Im Szenario I wird der - denkbare - Fall angenommen, daß sämtliche deutschen Hersteller als Treibmittel die HFKW 152a und 134a einsetzen. Angenommen wird eine Relation von 1 zu 1 zwischen beiden HFKW-Treibmitteln, die nicht für einzelne Produkte oder Produzenten, sondern für den gesamten inländischen Produktmix gilt.

1998 wurden im Inland 1,1 Mio. Kubikmeter XPS-Dämmstoff abgesetzt (GDI 1999). Bei einem Netto-Export-Überschuß von 30 bis 40% betrug die Inlandsproduktion etwa 1,5 Mio. m³. Bis 2010 wird mit einem jährlichen Produktionszuwachs von 5% gerechnet (Abbott 1999), so daß die inländische Produktion dann 2,7 Mio. m³ und der Inlandsmarkt 2 Mio. m³ betragen dürften.

Die Emissionen von 134a und 152a aus der inländischen Produktion steigen unter diesen Bedingungen von 2000 bis 2010 von 4650 t auf über 7575 t. Diese große Menge resultiert daraus, daß das Treibmittel 152a im ersten Jahr vollständig emittiert und 134a

im Herstellungsjahr zu 25% entweicht (Tabelle 23). Die 7575 t Emissionen im Jahr 2010 setzen sich zu 80% bzw. 6060 t aus 152a und nur zu 1515 t aus 134a zusammen. Der Beitrag zum Treibhauseffekt durch 134a ist allerdings mehr als doppelt so groß (2,3 fach) wie durch 152a, weil letzteres ein relativ niedriges GWP (140) hat.

Die laufenden Emissionen vom inländischen Bestand (der Inlandsmarkt ist um ein Viertel kleiner als die Inlandsproduktion), bestehen nur aus 134a. Sie bewegen sich von 2000 bis 2010 von knapp 3 t auf 169 t. Die Gesamtemissionen sind auch im Jahr 2010 quantitativ vor allem (zu fast 98%) durch die Anlagenemissionen bestimmt und betragen dann 7745 t. Der Beitrag zum Treibhauseffekt durch die Gesamtemissionen steigt von 2000 bis 2010 von 1,73 auf 3,04 Mio. t CO₂-Äquivalente.

3 Relative Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II

Szenario II nimmt an, daß ab dem Jahr 2000 zwar der größere Teil des inländischen XPS-Isolierschaums mit den HFKW 152a/134a hergestellt wird. Der kleinere Teil (43%) wird dagegen mit CO₂ und Ethanol fabriziert. Der Anteil von 43% ohne HFKW an einer jährlich um 5% wachsenden Produktion wird bis 2010 konstant gehalten, obwohl zu erwarten ist, daß bei ausreichender Marktakzeptanz von halogenfrei geschäumtem XPS-Dämmschaum in den folgenden Jahren dieses Verfahren in breiterem Maße angewendet werden wird. Das Szenario II beruht insofern auf konservativen Annahmen.

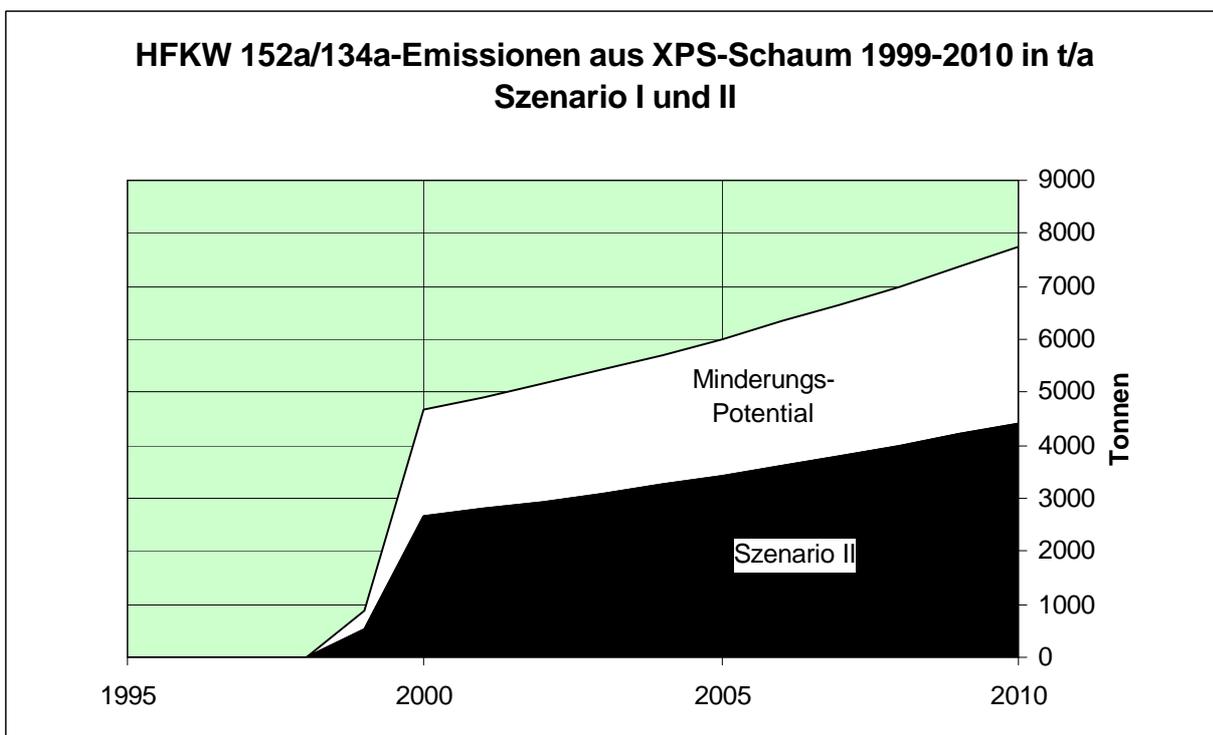


Diagramm 17: HFKW 152a/134a-Emissionen aus XPS-Schaum 1999-2010 in t - Szenario I und II. In Szenario I wird ausschließlich mit HFKW geschäumt, deren Gesamtemissionen (überwiegend 152a) von 2000 bis 2010 auf 7745 t steigen (Summe beider Flächen). Im Szenario II wird zu 43% auf HFKW verzichtet, so daß deren Emissionen bis 2010 nur auf 4415 t (dunkle Fläche) wachsen und ein Minderungspotential sichtbar machen. Vor 2000 wird mit HFCKW geschäumt.

Die inländischen Anlagenemissionen von 134a und 152a beginnen unter diesen Bedingungen in 2000 nicht bei 4651 t, sondern bei 2651 t. Sie betragen in 2010 nicht 7575 t (Szenario I), sondern 4318 t. (Vgl. Tabelle 24)

Die laufenden Bestands-Emissionen von 134a steigen bis 2010 nicht auf 169 t, sondern nur auf 96 t.

Die Gesamtemissionen betragen im Jahr 2010 statt 7745 t (Szenario I) nur 4415 t (3455 t 152a + 960 t 134a). Vgl. auch Diagramm 17.

Tab. 24: Die HFKW-Emissionen vom XPS-Schaum 2000-2010 nach Szenario I und II in Tonnen						
	2000		2005		2010	
	Szen. I	Szen. II	Szen. I	Szen. II	Szen. I	Szen. II
Anlagenemissionen	4651	2651	5936	3384	7576	4318
Bestandsemissionen	3	2	77	44	169	96
Gesamtemissionen	4654	2653	6013	3427	7745	4415

4 Beitrag zum Treibhauseffekt im Vergleich Szenario I mit II

Der Beitrag der Gesamtemissionen zum Treibhauseffekt beträgt im Jahr 2010 im Szenario II 1,73 Mio t CO₂-Äquivalente. Die 43%-ige Entlastung gegenüber den 3,04 Mio. t des Szenario I (vgl. Diagramm 16) bedeutet immerhin eine Differenz von 1,3 Mio. t CO₂-Äquivalente.

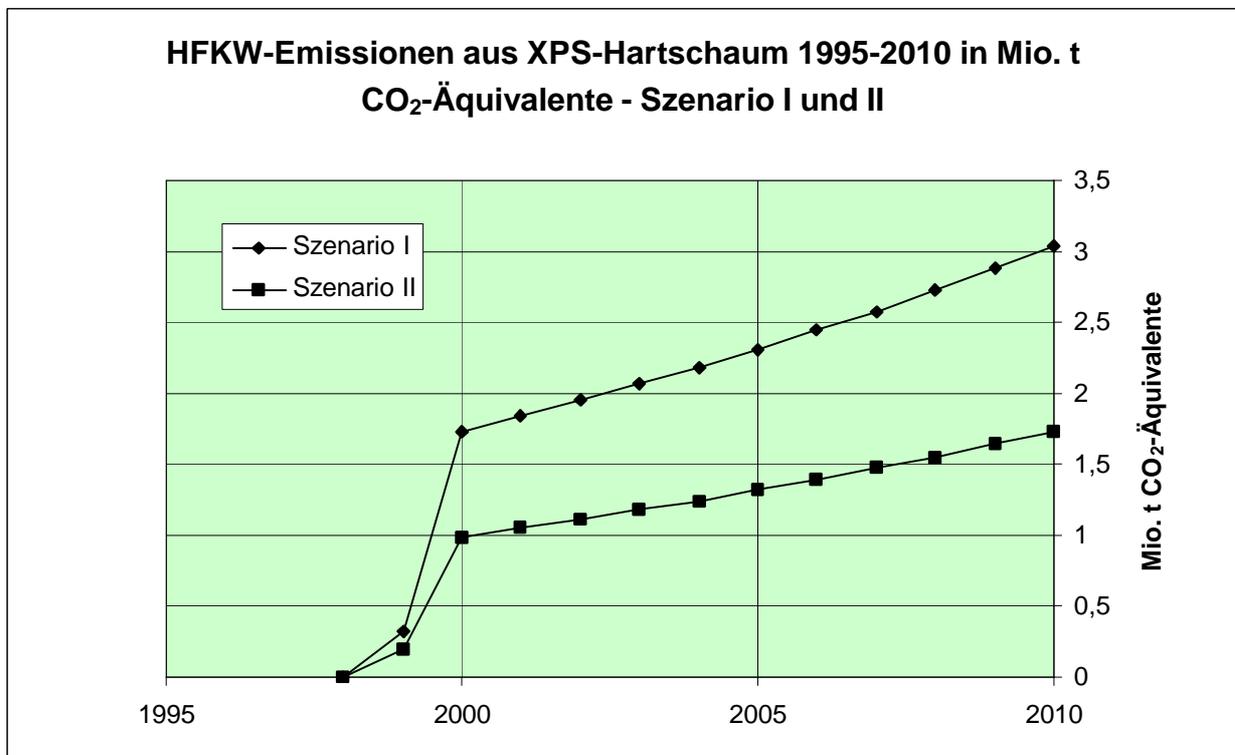


Diagramm 18: HFKW-Emissionen aus XPS-Hartschaum 1995-2010 in Mio. t CO₂-Äquivalente (Szenario I und II). Der Beitrag zum Treibhauseffekt durch die Gesamtemissionen liegt im Szenario II generell um 43% unter dem Wert des Szenario I, der im Jahr 2010 ca. 3,04 Mio. t CO₂-Äquivalente beträgt.

6 Asthma-Dosieraerosole

Im Rahmen der Ausnahmeregelung für wichtige Verwendungszwecke stehen FCKW in Europa gegenwärtig immer noch für Dosieraerosole zur Verfügung. Diese sind zur Behandlung von Asthma und chronisch-obstruktiven Atemwegserkrankungen erlaubt, solange gleichwertige Alternativen nicht ausreichend zur Verfügung stehen. Die Reformulierung der zahlreichen Arzneistoffe mit HFKW statt FCKW ist ein forschungs- und kostenaufwendiger Prozeß. In Deutschland kam das erste Dosieraerosol mit dem Treibmittel 134a im April 1996 auf den Markt, 1997 und 1998 folgten je zwei, 1999 eines (alle mit 134a). Diese sechs Präparate zweier britischer Hersteller waren bis Mitte 1999 die einzigen FCKW-freien Dosieraerosole auf dem deutschen Markt.

1 Inlands-Verbrauch und -Emission 1995-1997

Tab. 25: HFKW-Emissionen aus Asthma-Dosieraerosolen 1995 bis 1998*				
in t und Mio. t CO₂-Äquivalente				
	1995	1996	1997	1998*
Emission 134a in t	0	0,25	9	26,7
Mio. t CO ₂ -Äquivalente	0	0,000	0,012	0,035

Quelle: Befragung Asthmasprays. Die Mengen betreffen Verkäufe von Apotheken, nicht die Fabrikproduktion. Eine Zeitverzögerung wie bei den PU-Schaumdosen muß bei der Emissionsabschätzung hier nicht in Rechnung gestellt werden. * Für 1998 vorläufiger Wert.

Tabelle 25 und Diagramm 19 zeigen für 1995 bis 1997 noch sehr geringe HFKW-Emissionen aus der Anwendung von Dosieraerosolen: 250 kg in 1996 und 9 t in 1997. Ihr Beitrag zum Treibhauseffekt (bisher nur 134a) war bis 1997 noch entsprechend niedrig. Im gleichen Zeitraum entwichen aus den jährlich in Deutschland über 24 Mio. benutzten Dosieraerosolen jährlich rd. 400 t FCKW. Erst 1998 waren es - nach vorläufigen Daten - ca. 7% weniger, weil 27 t Treibgase aus HFKW bestanden.

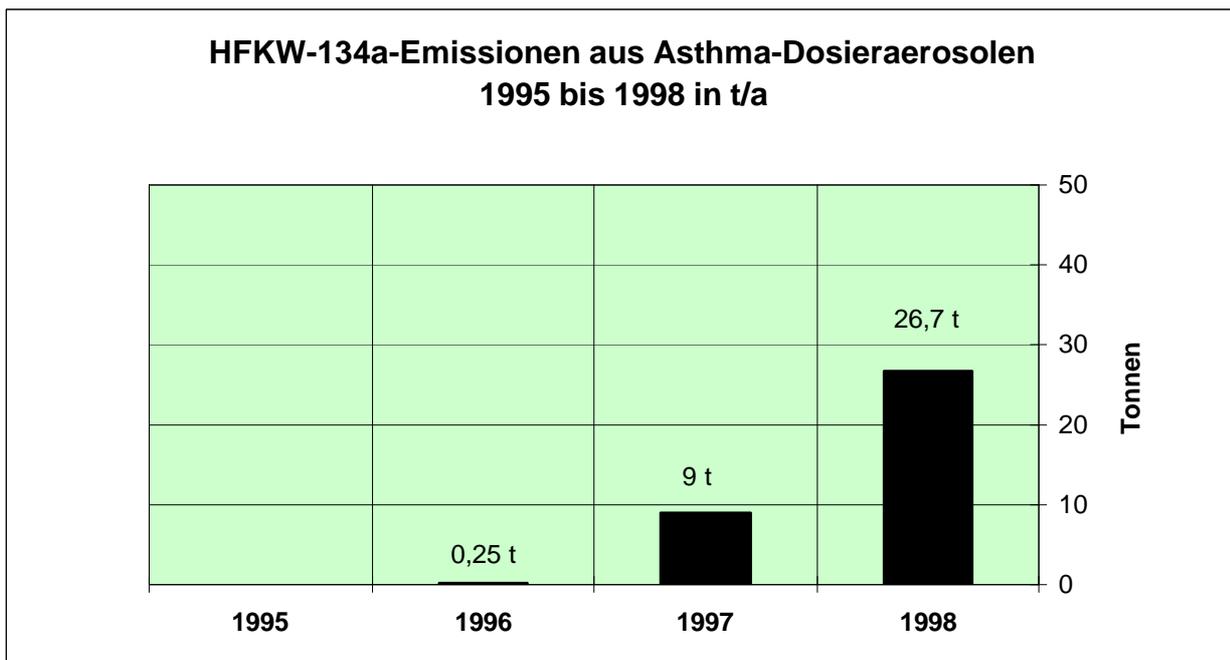


Diagramm 19: HFKW-Emissionen aus Asthma-Dosieraerosolen 1995 bis 1998 in t/a. Aufgrund des hohen Marktanteils FCKW-haltiger Präparate sind die Emissionen bisher gering, zeigen aber steile Anstiegstendenz.

Eine Beschleunigung des Umstiegs auf HFKW wird von dem Ende 1998 vorgelegten Vorschlag der EU-Kommission (EU-COM 98) erwartet, der im Juli 1999 vom Umweltausschuß des Deutschen Bundestags gebilligt wurde. Demnach soll FCKW-haltigen Dosieraerosolen die jährliche Verlängerung versagt werden, wenn für den gleichen Arzneistoff HFKW-haltige Alternativen ausreichend zur Verfügung stehen. Die Verwendung von FCKW könnte bis zum Jahr 2003 für alle Präparateklassen auslaufen.

2 BaU-Emissionsprognose bis 2010 - Szenario I

- Standard in der Therapie von Asthma und COPD (chronic obstructive pulmonary disease) ist heute, daß der Patient Arzneistoffe inhaliert. Oft muß er regelmäßig zwei Substanzen anwenden: einen Wirkstoff zur Weitstellung der Bronchien und einen zur Entzündungskontrolle. Treibgas-haltige Dosieraerosole ("Sprays") sind nicht die einzige Inhalationsform, in Deutschland aber die wichtigste. Szenario I unterstellt, daß dies weiterhin so bleibt. Das bedeutet: Die 400 t FCKW-Inlandsverbrauch (1995) sind der Maßstab, um die HFKW abzuschätzen, die nach vollständigem FCKW-Ausstieg jährlich emittieren.
- Angesichts der allenthalben prognostizierten weiteren Zunahme von Asthma und chronisch-obstruktiver Bronchitis (COPD) mag eine gleichgroße Tonnage der Treibmittel, die im Dosoeraerosol ca. 99% des Inhalts bilden, bis 2010 als zu gering erscheinen. Zweierlei ist jedoch zu beachten: Erstens ist bei gleichem Füllvolumen ein HFKW-Treibmittel leichter als ein FCKW-Treibmittel (1,20 gegen 1,38 Dichte)¹³. Zweitens sind - bei gleicher Zahl von Sprühstößen - die bisher vorhanden HFKW-haltigen Spraydosen etwas kleiner als ihre FCKW-haltigen Vorgänger. Beide Faktoren erlauben es, für das Szenario I eine nach Gewicht konstante Treibmittel-Menge von 400 t/a trotz Zunahme der inhalativen Therapie zu unterstellen.
- Außer 134a hat die Pharmazeutische Industrie auch den HFKW-227 getestet und für geeignet befunden. Die Entscheidung für 134a oder 227 hängt überwiegend von der chemisch-physikalischen Verträglichkeit mit dem zu formulierenden Wirkstoff ab. In dieser Studie wird angenommen, daß sich die Anteile von 134a zu 227 für den gesamte Präparatemix im Verhältnis 75 zu 25 verhalten. (GWP von 227: 2900.)
- Danach ergeben sich nach Szenario I für die Jahre 2005 und 2010 als Emissionen jeweils 300 Tonnen 134a und 100 Tonnen 227. Ihr Beitrag zum Treibhauseffekt beträgt in den beiden Stichjahren 0,68 Mio. t CO₂-Äquivalente.

3 Relative Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II

- Bei Inhalationsgeräten haben in Deutschland Treibgas-Dosieraerosole einen Marktanteil von 75 bis 80%. Ihr Erfolg kommt daher, daß jahrzehntelang nur sie in der Lage waren, 100 oder 200 exakt bemessene Dosen in Form von Sprühstößen abzugeben, und zwar in einfacher und diskreter Handhabung. Zwar gab es immer auch - treibgasfreie - Pulverinhalatoren. Diese waren jedoch umständlich zu bedienen und spendeten nur wenige bzw. häufig nur eine einzige Dosis des Wirkstoffs. Sie waren für die Restgruppe von Patienten bestimmt, die Sprays nicht vertrugen.

¹³ FCKW-haltige Dosieraerosole hatten 1997 zwischen 5 und 30 ml Inhalt – im gewichteten Durchschnitt 12 ml bzw. 16,5 Gramm.

- Die Ende der 80er Jahre forcierte Suche nach FCKW-freien, aber gleichwertigen Verfahren führte international zu einem "Innovationschub" (Matthys 1995), der auf Optimierung der Pulverinhalation hinauslief. Bis 1996 kamen von drei Pharmaunternehmen neue Pulvergeräte auf den Inlandsmarkt, die wie Dosieraerosole 60 oder 200 exakte Einzeldosen abgeben und ebenso einfach und diskret bedienbar sind.
- Die Diskussion zwischen Ärzten, Apothekern, Pharmaunternehmen, Umweltverbänden, ergab bis 1998: Moderne Pulverinhalatoren gelten Dosieraerosolen als medizinisch ebenbürtig. "Die Pulverinhalation ist eine sichere, bequeme Anwendungsform und ist FCKW-haltigen Dosieraerosolen vorzuziehen", erklärt die Vereinigung der führenden Pneumologen, die Deutsche Atemwegsliga, für Wirkstoffe, die nicht für akute Anfälle bestimmt sind (Wettengel 1998). Zwar kann auf Dosieraerosole nicht verzichtet werden: Kleinkinder, Patienten im akuten Asthmaanfall oder mit schwersten Atemwegserkrankungen bringen die Kraft nicht auf, um ausreichend Pulver in die Atemwege zu ziehen. Die auf Dosieraerosole angewiesene Gruppe wird von Experten nur auf "wenige Prozent" geschätzt (Schultze-Werninghaus 1996, 20).
- Daß Asthma und COPD mit modernen Pulverinhalatoren gut zu behandeln sind, zeigt Skandinavien. Dort haben Pulversysteme einen Marktanteil von 75%. "Skandinavische Verhältnisse", d.h. einen Anteil von 75 statt 25 Prozent, strebt der Arbeitskreis Pulverinhalation (API) für Deutschland an (API 1999). In diesem Arbeitskreis arbeiten seit 1997 außer Ärzten, Apothekern, Patienten und Umweltverbänden auch die in der Atemwegstherapie weltweit führenden Pharmaunternehmen GlaxoWellcome und AstraZeneca sowie Orion Pharma mit, die alle in Deutschland ihren Verkaufsschwerpunkt auf Pulversysteme setzen.
- Das Szenario II greift die Zielvorstellungen dieses Arbeitskreises auf, der mittelfristig für Deutschland die Inhalationssysteme mit halogenierten Treibgasen auf eine medizinisch begründete Obergrenze von 25% Marktanteil begrenzen will. Statt dessen soll der Anteil treibgasfreier Pulversysteme von jetzt 20% auf 75% steigen.¹⁴

Unter diesen Bedingungen betragen die HFKW-Emissionen 2010 nicht 400, sondern nur 100 t (Verhältnis 134a zu 227: 75 zu 25). Nach Tabelle 26 und Diagramm 18 sind im Jahr 2005 die HFKW-Emissionen noch höher. Der temporäre Anstieg auf 200 t ist möglich, weil für zahlreiche auf dem deutschen Markt befindliche Wirkstoffe FCKW-Alternativen vorerst nur als HFKW-Dosieraerosole geplant sind.

Tab. 26: HFKW-Emissionen aus Dosieraerosolen 2000, 2005 und 2010 im Vergleich der Szenarien I und II			
	<i>2000</i>	<i>2005</i>	<i>2010</i>
Emissionen Szenario I in t	120	400	400
Emissionen Szenario II in t	120	200	100
Ersparnis II zu I in t	0	200	300
<i>Ersparnis II zu I CO₂-Äquiv.*</i>	<i>0</i>	<i>0,340</i>	<i>0,510</i>

* Mio. t CO₂-Äquivalente.

¹⁴ Das in Deutschland bei Asthmamedikamenten führende Unternehmen Boehringer Ingelheim entwickelte keinen Multi-Dosis-Pulverinhalator, arbeitet aber an einem treibgasfreien "Taschenzerstäuber": einer Art Mikro-Strahlendruckpumpe (Befragung Asthmasprays). Der Aerosolabfüller IG Sprühtechnik testet Isobutan als Treibgas für Dosieraerosole (Guck 1998). Beide Verfahren würden ebenfalls im Sinne des Szenario II HFKW-Systeme zurückdrängen. Kein Verfahren gilt aber mittelfristig so aussichtsreich wie die Pulverinhalation. Einen Überblick über mögliche künftige Inhalationstechnologien gibt Wright 1999.

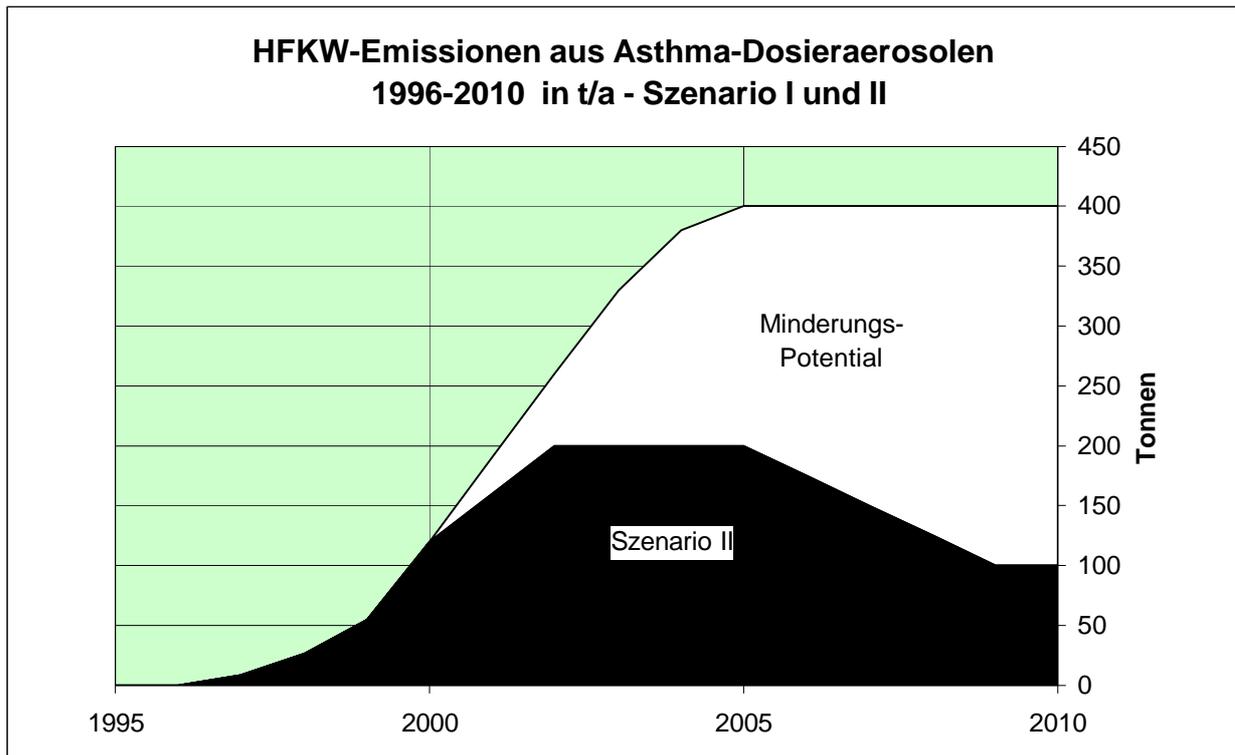


Diagramm 20: HFKW-Emissionen aus Dosieraerosolen 1996-2010 in t - Szenario I und II. In Szenario II betragen die HFKW-Emissionen 2010 nicht 400 (Szenario I), sondern nur 100 t, weil bis 2010 die Pulverinhalation drei Viertel des Dosieraerosolmarktes übernimmt.

Der Beitrag zum Treibhauseffekt (vgl. Diagramm 21) beträgt 2010 im Szenario II nur 0,170 Mio. t CO₂-Äquivalente - statt 0,680 Mio. t im Szenario I.

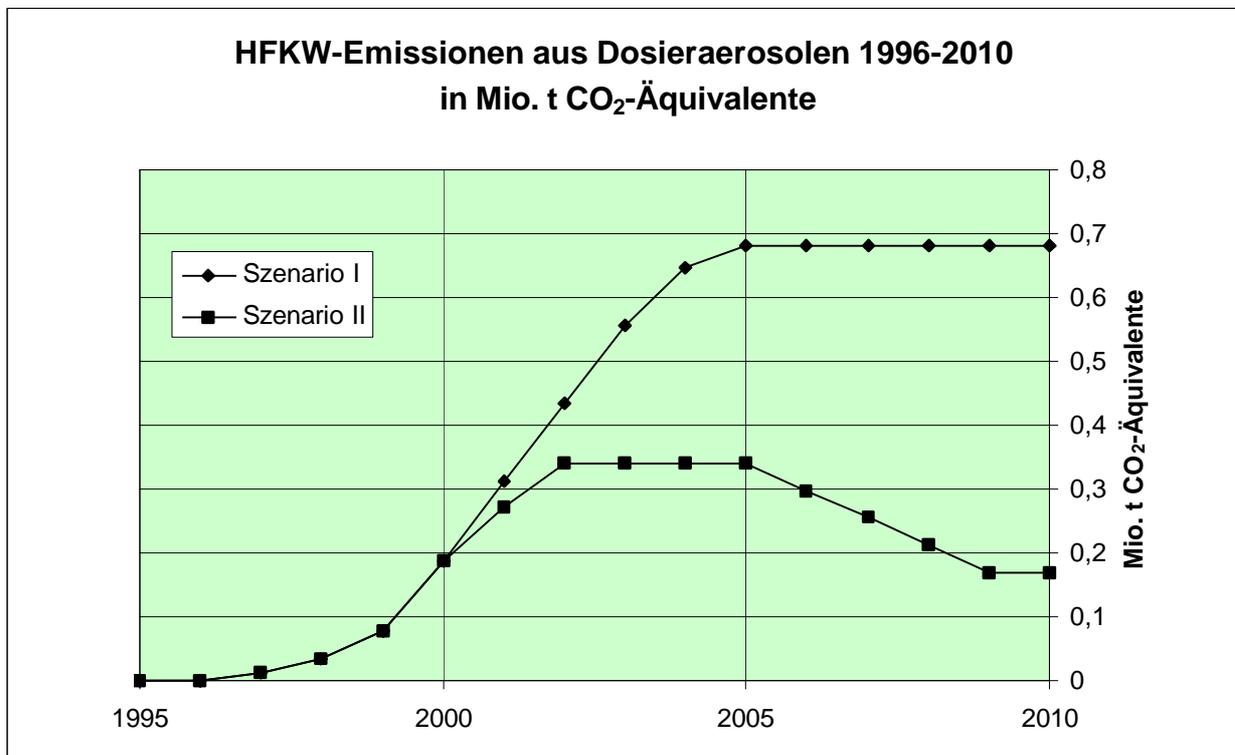


Diagramm 21: HFKW-Emissionen aus Dosieraerosolen in Mio. t CO₂-Äquivalente. Statt 0,680 Mio. t CO₂-Äquivalente (Szenario I) beträgt der Beitrag zum Treibhauseffekt in Szenario II im Jahr 2010 lediglich 0,170 Mio. t CO₂-Äquivalente.

7 Halbleiterfertigung

HFKW-23 bzw. CHF₃ ist in der Halbleiterindustrie ein wichtiges Gas zum Trockenätzen im Niederdruckplasma. Zusammen mit anderen in der Halbleiterfertigung verwendeten fluorierten Gasen wird CHF₃ im Schlußteil IV dieser Studie behandelt. Daraus stammen die nachfolgenden Daten zu Verbrauch und Emissionen.

1 Inlands-Verbrauch und -Emissionen 1995-1997

Tab. 27: Verbrauch und Emissionen von HFKW-23 in der Halbleiterindustrie 1995-1997 in t/a			
	1995	1996	1997
Verbrauch in t	5	6	7
Emissionen in t	3	4	4
<i>Emiss. in Mio. t CO₂-Äquiv.</i>	<i>0,038</i>	<i>0,045</i>	<i>0,046</i>

Die Differenz zwischen Verbrauch und Emission liegt erstens an der nur partiellen chemischen Umsetzung im Plasmareaktor und zweitens an der Wirkung nachgeschalteter Abgasreinigungssysteme.

2 BaU-Emissionsprognose 2010 - Szenario I

Die Annahmen für die Szenarien I und II sind in Teil IV dargestellt. Hier werden nur die Resultate in Bezug auf die Emissionsmengen präsentiert.

Nach BaU-Szenario I ergeben sich bis 2010 die Emissionen der Tabelle 28:

Tab. 28: Jahresemissionen von HFKW-23 aus der Halbleiterfertigung 1995-2010 nach BaU-Szenario I				
	1995	2000	2005	2010
Emissionen in t	3	5	6	8
<i>Emissionen in CO₂-Äquiv.*</i>	<i>0,04</i>	<i>0,05</i>	<i>0,07</i>	<i>0,10</i>

* Mio. t CO₂-Äquivalente.

3 Relative Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II

Nach Szenario II ergeben sich die relativ niedrigeren Emissionen der Tabelle 29:

Tab. 29: Jahresemissionen von HFKW-23 aus der Halbleiterfertigung 1995-2010 nach Minderungsszenario II				
	1995	2000	2005	2010
Emissionen	3	4	4	1
<i>Emissionen in CO₂-Äquiv.*</i>	<i>0,04</i>	<i>0,05</i>	<i>0,05</i>	<i>0,01</i>

* Mio. t CO₂-Äquivalente.

Das Szenario II bringt bei den Emissionen im Jahr 2010 eine Entlastung von 7 t. Der Beitrag zum Treibhauseffekt beträgt dann statt 0,10 Mio. t CO₂-Äquivalente (Szenario I) nur ca. 0,01 Mio. t bzw. 14% davon.

8 Sonstige HFKW

Zu sonstigen HFKW zählt als bedeutendste Gruppe gewöhnlich der HFKW-23, der als Nebenprodukt der Herstellung des HFCKW-22 anfällt. In Deutschland wird er auf beiden inländischen Produktionsanlagen aufgefangen und entweder weiterverarbeitet oder - zu überwiegendem Teil - thermisch gespalten. Mengenmäßig am wichtigsten sind seit 1996 die HFKW-Treibmittel aus technischen Aerosolen. Seit 1998 werden HFKW auch als Feuerlöschmittel eingesetzt, und ab 1999 ist mit begrenzter Nutzung von HFKW als Lösemittel zur Feinreinigung zu rechnen.

1 Inlands-Verbrauch und -Emissionen 1995-1997

Tab. 30: Inl. Verbrauch und Emissionen von sonstigen HFKW 1995-1997 in t/a und Mio. t CO₂-Äquivalente						
	1995		1996		1997	
	Verbrauch	Emission	Verbrauch	Emission	Verbrauch	Emission
HFKW-23 (v. 22)	-	100*	-	0	-	0
Techn. Aerosole**	100	100	100	100	100	100
<i>Summe</i>	<i>100</i>	<i>200</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>	<i>100</i>
<i>Mio. t CO₂-Äqui.</i>		<i>1,288</i>		<i>0,118</i>		<i>0,118</i>

* Wegen Emissionseinstellung ab Mitte 1995 nur die Hälfte des früheren Umfangs.

** Technische Aerosole enthalten im Durchschnitt ihrer Formulierungen zu 90% 134a und zu 10% 152a.

1.1 HFKW-23 als Nebenprodukt

Der HFKW-23 fiel als Nebenprodukt des als Kältemittel und als Zwischenprodukt für den Kunststoff PTFE hergestellten HFCKW-22 an. Nach Angaben der Hoechst AG von 1996 handelte es sich um ca. 1-2% der HFCKW-22-Produktion, die von der Produktionsanlage in die Atmosphäre entwichen. Seit Inbetriebnahme der FCKW-Spaltanlage wird hier (jetzt von Solvay betrieben) überschüssiger HFKW-23 aus beiden deutschen Produktionsanlagen für den HFCKW-22 der Verbrennung zu Flußsäure zugeführt (Solvay 1998). Ein kleiner Teil wird aufgefangen und entweder als Kältemittel R23 oder - nach weitergehender destillativer Reinigung - als Ätzgas für die Halbleiterindustrie vermarktet.

Die HFKW-23-Nebenemissionen betragen 1995 ca. eine halbe Jahresmenge: 100 statt 200 t. Ihr Beitrag zum Treibhauseffekt war wegen des hohen GWP von HFKW-23 (11 700) bedeutend: 1,17 Mio. t CO₂-Äquivalente (1995). Vgl. Tabelle 30.

1.2 Technische Aerosole

Nichtmedizinische Aerosole werden zu 75% zur Kosmetik oder im Haushalt eingesetzt (IGA 1999). Die Aerosolbranche, die noch in den 80er Jahren Hauptverbraucher der FCKW war, benutzt als Treibmittel fast ausschließlich Propan, Butan, Dimethylether u. dgl.. Ozonschichtschädigende Stoffe werden nicht mehr eingesetzt. Auch HFKW kommen, abgesehen von PU-Schaumdosen (s. Kapitel 3), nur in einem kleinen Bereich vor, der unter die sog. technischen Sprays fällt. Im wesentlichen handelt es sich um Kälte- und Druckluftsprays, die jährlich insgesamt ca. 100 t HFKW verbrauchen (Meeh 1999). Vgl. Tabelle 30.

- Kältesprays werden vor allem zur Fehlersuche in elektronischen Geräten eingesetzt. Durch kurzfristiges lokales Abkühlen von Bauteilen unter Spannung lassen sich fehlerhafte Stellen (etwa in einem Fernsehgerät) einfacher identifizieren als im ausgeschalteten Zustand (Electrolube 1997; Meeh 1998). Kältesprays müssen, da sie unter Spannung eingesetzt werden, unbrennbar sein. Es sei noch erwähnt, daß Kältesprays zu ca. 5-10% auch in anderen Bereichen genutzt werden: etwa in der Zahnmedizin zur Vitalitätsprüfung von Zähnen oder bei öffentlichen Verkehrsbetrieben und Kinos zum Entfernen von Kaugummi von den Sitzen.
- Druckluftsprays enthalten im hier relevanten Fall keine komprimierte Luft, sondern einen komprimierten HFKW, der zum Wegblasen von Staub dient. Einsatzgebiet sind die Elektronik und Optik, wo Staub Funktionsstörungen verursachen kann. Typische Anwendungen sind Schaltschränke: Wegen möglicher Zündquellen werden statt Druckluft HFKW aufgrund ihrer schweren Brennbarkeit eingesetzt.

Für technische Sprays beträgt der HFKW-Verbrauch seit Jahren relativ konstante 100 Tonnen, die im Durchschnitt zu 90% aus 134a und zu 10% aus 152a bestehen (Schätzung: Meeh 1999)¹⁵. Dabei sind die HFKW nicht nur Treibmittel, sondern zugleich Prozeßstoffe. Der Beitrag zum Treibhauseffekt liegt bei 0,120 Mio. t CO₂-Äquivalente.

2 Emissionsprognose bis 2010

Bei den sonstigen HFKW werden keine zwei Emissionsszenarien aufgestellt. Die Hauptanwendungen "Technische Aerosole", "Lösemittel" und "Feuerlöschmittel" sind u.a. durch gesetzliche Vorgaben in ihrer Expansion behindert, daß eine Unterscheidung in Business as Usual und Relative Emissionsminderung wenig Sinn macht. Der in Bezug auf den Treibhauseffekt wichtige HFKW-23 als Nebenprodukt der Chemieindustrie ist seit 1996 nicht mehr emissionswirksam, daher auch nicht reduzierbar, sieht man - wie überall in dieser Studie - von den geringen Teilen ab, die auf beliebigen Herstellungsanlagen nicht ganz in die Auffang- oder Abfülleinrichtungen gelangen. Statt zwei Emissionsszenarien folgt nur eine einzige Emissionsprognose, welche die bis 2010 wahrscheinlichste Entwicklung zum Gegenstand hat.

Zu den bereits 1997 bestehenden HFKW-Nutzungen kam in Deutschland 1998 HFKW-227 als Feuerlöschmittel dazu, und ab 1999 ist bei technischen Aerosolen außer Kälte- und Druckluftsprays auch mit Reinigungssprays auf HFKW-Basis zu rechnen. Der durch die Nebenreaktion der HFKW-Herstellung bestimmte Beitrag sonstiger HFKW zum Treibhauseffekt von 1995 wird auf absehbare Zeit weit unterboten bleiben.

2.1 Neu: HFKW als Feuerlöschmittel

Die bis 1991 als Feuerlöschmittel erlaubten Halone sind seitdem weitgehend durch ökologisch unbedenkliche Stoffe ersetzt worden. In Anlagen zur Beflutung von zu löschenden Innenräumen kommen statt Halon 1301 vor allem Inertgase (Stickstoff, Argon) zum Einsatz (Minimax 1996; Total Walther 1996). Handlöscher für den gezielten Löschrstrahl enthalten statt Halon 1211 jetzt Pulver, CO₂ oder Schaum.

¹⁵ Der Zusatz von 152a ist notwendig, weil 134a alleine den unerlaubt hohen Behälterinnendruck von 12 bar bei 50°C erzeugt.

Von den aus den USA stammenden Vorschlägen zum Halonersatz (HFKW-23 und 236fa, HFKW-227, FKW-218 und FKW-3110) wurde in Deutschland 1997 der HFKW-227 zugelassen. Er wird von Great Lakes Chemicals in den USA hergestellt und unter dem Handelsnamen FM-200 von lizenzierten Unternehmen angeboten, in Deutschland von Kidde-Deugra (Stamp 1999). FM-200 löscht wie Halon 1301 durch Gas-Beflutung des Raumes. Kidde-Deugra verzichtet aus ökologischen Gründen bei Einbau und Wartung auf Probebeflutungen, minimiert durch Einbau von zwei statt einem Detektor Fehlalarme und verfügt über eine Recyclinganlage für das Löschmittel. Als Obergrenze für den deutschen Gesamtbestand an bevorratetem FM-200 werden mittelfristig 200 t angenommen, die 2010 erreicht sein könnten (Kidde-Deugra 1999).

Die jährliche Freisetzung durch Feuerlöschen, Fehlalarme und Leckagen wird auf "unter 1%" geschätzt (Kidde-Deugra 1999)¹⁶. Demzufolge emittieren von dem seit 1998 verkauften HFKW-227 im Jahr 2010 aus Feuerlöschanlagen etwa 2 t (vgl. Tabelle 31), davon die Hälfte im Brandfall. Ihr Beitrag zum Treibhauseffekt beträgt 5800 t CO₂-Äquivalente.

Tab. 31: Sonstige HFKW-Emissionen 1995-2010 in t und Mio. t CO₂-Äquivalente					
Bereich	HFKW	1995	2000	2005	2010
1. HFCKW-22-Nebenprod.	23	100*	0	0	0
2. Techn. Aerosole/Löseem.*	134a	100	130	200	200
3. Feuerlöschmittel	227	0	> 0	1	2
Summe		200	130	201	202
<i>Emiss. in Mio. t CO₂-Äquiv.</i>		<i>1,288</i>	<i>0,158</i>	<i>0,251</i>	<i>0,254</i>

* Bis 2000: 90t 134a und 10 t 152a. Danach: 120 t 134a, 70 t 43-10, 10 t 152a.

2.2 Neu: HFKW als Reinigungs-Lösemittel

Ebenfalls aus den USA stammen neue, unbrennbare fluorierte Verbindungen für die Präzisions- und Elektronik-Reinigung. Der Grund dafür liegt darin, daß in den USA die Lösemittel FCKW-113, HFCKW-141b und 1,1,1-Trichlorethan erst seit 1996 verboten sind (Verbot in Deutschland bereits seit 1.1.1993). Bevorzugt vermarktet werden der HFKW-43-10mee = C₅H₂F₁₀ (Vertrel XF) und Hydrofluorether (HFE-7100, HFE-7200).

Mit HFE als Drop-In-Stoffen können FCKW-Altanlagen weiterbetrieben werden. In Deutschland kommen die HFE aber im Grunde zu spät, da sich als Nachfolger für FCKW-113 und 1,1,1-Trichlorethan wäßrige Reiniger und organische Lösemittel auf Basis von Alkohol und Glykolethern durchgesetzt haben. Das Marktpotential für HFE (GWP von HFE 7100: 500) wird als auf Spezialanwendungen begrenzt eingeschätzt und hier nicht quantifiziert.

Der HFKW-43-10 darf in Deutschland in Anlagen per Gesetz nicht verwendet werden. Gemäß der 2. BImSchV sind "keine anderen leichtflüchtigen Halogenkohlenwasserstoffe" als Tetrachlorethen, Trichlorethen und Dichlormethan zugelassen.¹⁷ Was für

¹⁶ Bei ca. 1% liegen auch die Schätzungen von Cisneros/Robin 1999.

¹⁷ Es war erwartet worden, daß die 2. BImSchV auch HFE in Anlagen ausschließt. Doch "Hydrofluorether" werden begrifflich nicht den "leichtflüchtigen Halogenkohlenwasserstoffen" zugeordnet (Quelle: BMU, Geschäftszeichen IG, I2-50121/29, 27.1.1998 - nach Mitteilung von 3M Deutschland GmbH). HFE fallen

Anlagen (> 10 l Füllvolumen) nicht erlaubt ist, muß aber in Druckgaspackungen, d.h. in Aerosoldosen nicht verboten sein.

2.3 Technische Aerosole auch mit flüssigen HFKW

Abfüller technischer Sprays rechnen nicht nur damit, daß der HFKW-Markt für Kälte- und Druckluftsprays (s. Abschnitt 1.2) konstant bei 100 t jährlich bleibt. Sie sind außerdem der Ansicht, daß künftig flüssige HFKW in Reinigungssprays in einer Größenordnung von ca. 70 t pro Jahr eingesetzt werden (Meeh 1999).

Ein Verzicht auf HFKW für die Vor-Ort-Reinigung spannungsführender Teile in der Elektrotechnik bedeutet, daß zur Reinigung die Anlagen weiterhin grundsätzlich abgeschaltet werden müssen, wenn durch Verschmutzungen eine Betriebsstörung auftritt. Das stellt in Anlagen mit hohem Schmutzanfall ein technisches und wirtschaftliches Problem dar. Beispiele sind die Bau- oder Bergbauindustrie oder Betriebe der Metallbearbeitung mit hohem Anfall von Flüssigkeitsnebeln oder Schleifstaub. Mitunter benutzte organische Lösemittel ohne elektrische Leitfähigkeit sind brennbar und damit prinzipiell riskant. Selbst wenn mit HFKW wegen geringer Reinigungswirkung keine optimalen Ergebnisse erzielt werden, können doch Anlagen über eine Schicht "gerettet" und dann in den normalen Betriebspausen gründlich überholt werden (Meeh 1999).

Auf ca. 70 t Jahresverbrauch wird der Markt für fluoridierte Lösemittel zur sicheren Schnellreinigung ohne Abschalten geschätzt. Wegen des hohen Preises kommen kaum HFE, wohl aber der HFKW-43-10 infrage. Um das unbrennbare Lösemittel aus der Aerosoldose zu befördern, ist ein gleichfalls unbrennbares Treibmittel erforderlich. Damit erweitert sich zugleich der Markt für den HFKW-134a um jährlich ca. 30 t. Das GWP von 43-10mee ist mit 1300 genauso groß wie das von HFKW-134a. Der zusätzliche Beitrag zum Treibhauseffekt durch 70 t HFKW-43-10 und 30 t HFKW-134a beträgt 0,130 Mio. t CO₂-Äquivalente.

Es ist allerdings anzumerken, daß in Zukunft weitere Anwendungsfelder für Lösemittel auf HFKW-Basis erschlossen werden könnten. Sollte etwa die Routinereinigung an Mittelspannungs-Schaltanlagen von Energieversorgern künftig unter Spannung durchgeführt werden - diese Anlagen werden bisher abgeschaltet -, würde der Verbrauch schnell ansteigen. Dieses Beispiel dient zur Warnung, die Emissionsprognosen dieser Studie als Obergrenzen mißzuverstehen.

3 Beitrag zum Treibhauseffekt

Der Beitrag zum Treibhauseffekt durch sonstige HFKW im Jahr 2010 (voraussichtlich 0,254 Mio. t CO₂-Äquivalente) stammt nahezu ausschließlich aus technischen Aerosolen. Die Emissionen von Feuerlöschanlagen sind demgegenüber zu vernachlässigen.

Nachweise H-FKW

- Abbott, Godfrey (Exiba – European Extruded Polystyrene Insulation Board Association) Horgen, Schreiben vom 8.7.1999;
- Adolph, Ulrich (HFG Hagenuk Faively GmbH & Co KG) Schkeudiz, pers. Mitt. 26.5.1999;
- Adolph, Ulrich: Entwicklungsstand und Tendenzen der Klimatisierung von Schienenfahrzeugen, in: Ki Luft- und Kältetechnik 3/1998, 134 ff.;
- AFCE (Alliance Froid Climatisation Environment), Projection à 15 ans des émissions de HFC, Rapport d'étude par L. Palandre, D. Clodic, A.M. Pougin, mai 1998;
- Aktualisierung Eckdaten: Befragung ausgewählter Hersteller von Kälte- und Klimaanlageanlagen in Deutschland zu Marktvolumen, Stückzahlen, Anlagenlebensdauer, Leckageverlusten und Rückgewinnungsraten:
Gewerbekälte Linde AG, Köln; Elektrolux Kältesysteme, Herne; BKT Bonnet Kältetechnik, Mannheim. Mittlere Industriekälte: Combitherm, Fellbach; Climatic GfKK mbH, Berlin. Kleinkühlgeräte in Industrie und Gewerbe: Westfalia Landtechnik, Oelde; Nordcap KBS Kältetechnik, Mainz-Hechtsheim. Große Industriekälte- u. Klimaanlageanlagen: Trane Deutschland, Duisburg; Carrier LTG Service, Unterschleißheim; York International, Mannheim; Sulzer Escher Wyss, Lindau. Raumklimageräte: Polenz Klimageräte, Norderstedt. Mittelgroße Klimaanlageanlagen: LTB Schiewer, Oberursel; WRK Schenk, Barsinghausen. Transportkälte (Lkw): Euram-Thermoking, Haan; Frigoblock Großkopf, Essen; Carrier Transicold, Georgsmarienhütte. Transportkälte (Container u. Schiffe): TU Hamburg-Harburg, Arbeitsbereich Hilfsmaschinen und Automation, Hamburg. Haus-Wärmepumpen: Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen, Hannover; Initiativkreis Wärmepumpe e.V., München.
- Arbeitskreis PU-Dämm- und Montageschäume (Hg.), Wichtige Informationen über PU-Schäume, Tilburg/Stuttgart o.J.;
- Arbeitskreis Pulverinhalation: Aktiv für eine umweltfreundliche Atemwegstherapie, Broschüre, Hamburg 1999;
- Ashford, Paul: Emissions from Foams – Predicting, Monitoring, Reporting and Reducing, in: Joint IPCC/TEAP Expert Meeting on Options for the Limitation of Emissions of HFCs and PFCs, Petten, 26-28 May 1999;
- Bailly, André: Accelerated R22 Phase out Schedules. Issues for the EU Air conditioning Industry, in: ASERCOM-Symposium 1998 "Refrigeration/Air Conditioning and Regulations for Environmental Protection - a Ten Years Outlook for Europe", Nürnberg, 7 October 1998;
- Baker, James A. (Delphi Automotive Systems, Inc): Mobile Air Conditioning: HFC-134a Emissions and Emission Reduction Strategies, in: Joint IPCC/TEAP Expert Meeting on Options for the Limitation of Emissions of HFCs and PFCs, Petten, 26-28 May 1999;
- Befragung Asthmasprays = Befragung der Sprecher von AIDA (Arbeits- und Informationsgruppe Dosieraerosole) und API (Arbeitskreis Pulver-Inhalation), Mai 1999. AIDA vertritt die Pharmaunternehmen Asta Medica, Boehringer Ingelheim, GlaxoWellcome, 3M Medica, Rhône-Poulenc Rorer. Im API arbeiten mit: GlaxoWellcome, AstraZeneca und Orion Pharma;
- Befragung Kältemittel. Direkte Befragung zu Verkaufsmengen und langfristigen Perspektive chlorfreier Kältemittel für stationäre Anwendung. Rhodia Limited, Bristol, UK, 18.2.1999; Deutsche ICI GmbH, Frankfurt, 16.3.1999; Du Pont Deutschland GmbH, Bad Homburg, 17.2.1999; Elf Atochem

- Deutschland GmbH, Düsseldorf, 12.4.1999; Westfalen Industriegase und Kälte, Münster, 24.2.1999; Solvay Fluor und Derivate GmbH, Hannover, 16.3.1999;
- Befragung Pkw-Klimaanlagen = Schriftliche Befragung zu Inlandsabsatz und Klimatisierungsgrad 1995-1997 und Füllmengen nach Fahrzeugmodellen bei den inländischen Autoherstellern Audi, BMW, DaimlerChrysler, Ford, Opel, Porsche, Volkswagen und den Importeuren Alfa Romeo, Citroen, Daihatsu, Fiat, Honda, Hyundai, Lancia, Mazda, Mitsubishi, Nissan, Peugeot, Renault, Rover, Saab, Seat, Skoda, Subaru, Suzuki, Toyota, Volvo. Befragungszeitraum 22.2. bis 30.3. 1999;
- Befragung Sandwichelemente = Befragung der führenden inländischen Hersteller von PU-Sandwichelementen im Juli 1999: Hoesch-Siegerlandwerke GmbH, Kreuztal, pers. Mitt. 9.7.1999; Thyssen Bausysteme GmbH, Oberhausen, pers. Mitt. 8.7.1999; Romakowski GmbH & Co, Buttenwiesen, pers. Mitt. 8.7.1999; Güteschutzgemeinschaft Hartschaum, Frankfurt, pers. Mitt. 8.7.1999;
- Befragung Sonstige Mobilklimaanlagen = Schriftliche Befragung zur Klimatisierung bei Bussen: EvoBus GmbH Setra Omnibusse, Konvekta AG, Mercedes-Benz AG Mannheim, Neoplan Gottlob Auwärter GmbH & Co. KG, Webasto AG Fahrzeugtechnik; bei Nfz: DaimlerChrysler AG Wörth, MAN Nutzfahrzeuge AG; bei Schienenfahrzeugen: Deutsche Bahn AG; bei Schiffen: Noske-Kaeser GmbH;
- Befragung XPS-Schäumer = Befragung der vier inländischen Hersteller von XPS-Hartschaum im Juli 1999: BASF AG, Ludwigshafen, pers. Mitt. 9.7.1999; Dow Europe SA, Horgen, pers. Mitt. 2.7.1999; Gefinex-Jackon GmbH, Salzwedel, pers. Mitt. 9.7.1999; Poliglas Dämmsysteme GmbH, Queis/Dreieich, pers. Mitt. 13.7.1999;
- Boy, Elmar (BASF AG) Ludwigshafen, pers. Mitt. 9.7.1999;
- Boy, Elmar: Umweltfreundlich Schäumen. Polystyrol-Hartschaumstoff mit CO₂ als Treibmittel, in: Kunststoffe (87) 6/97;
- Cisneros, M.D./Robin, M.L.: An Integrated Approach to Achieve Low Environmental Impact in the Spezial Hazards Fire Suppression Industry, in: Joint IPCC/TEAP Expert Meeting on Options for the Limitation of Emissions of HFCs and PFCs, Petten, 26-28 May 1999;
- COCON-Rapport-Nr. CL 1662: 1K PU und der Treibhauseffekt, Verf.: A.K. van der Rhee, COCON ARKEL B.V., 29.05.1996; zugesandt mit einem Begleitschreiben von M.F.A. van Diessen, Arbeitskreis PU-Dämm- und Montageschäume, Tilburg;
- Coens, Andries (Du Pont de Nemours) Dordrecht, pers. Mitt. 18.2.1999;
- DaimlerChrysler AG, Stuttgart, pers. Mitt. 12.5.1999;
- DTI (Danish Technological Institute): Ways of reducing consumption and emission of potent greenhouse gases (HFCs, PFCs and SF₆), Project for the Nordic Council of Ministers, by Per Henrik Pedersen, Taastrup, December 1998;
- EC 98 = Adopted Commission Proposal for a New Regulation on Substances that Deplete the Ozone Layer: Modification of the Council Regulation (EC) No 3093/94 of 15 December 1994, COM (1998) 398 final;
- ECOFYS: Reduction of the emissions of HFCs, PFCs and SF₆ in the European Union, Final report, commissioned by the European Union, DG XI, Utrecht, April 1999;
- Electrolube: Sichere Fehlersuche mit Kältesprays, in: SMT (10) 8/1997;
- Esser (Elastogran GmbH) Lemförde, pers. Mitt. 17.5.1999;
- EU-COM 98 = Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament: Strategie für das Auslaufen der Verwendung von FCKW in Dosieraerosolen, in: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften C 355/2, 20.11.98;
- Fischer, Marcus: Klimawirksame Emissionen durch Pkw-Klimaanlagen, Diplomarbeit Technische Universität Berlin, Fachgebiet Kraftfahrzeuge, 1997;

- GDI (Gesamtverband Dämmstoffindustrie) Baumarktstatistik 1993-1998, Hamburg, 8.7.1999;
- Graal, Steven, STEK (Stichting Erkenningsregeling voor de uitoefening van het Koeltechnisch Installatiebedrijf = Foundation for the approval of refrigerationcontractors), Utrecht, persönliche Mitt. 11.5.1999;
- Guck, Franz (IG Sprühtechnik GmbH) Wehr/Baden, Schreiben an Öko-Recherche vom 10.7.1998;
- HAGO Dr. Schirm Chemotechnik, München, pers. Mitt. 28.6.1999;
- Haug (Noske-Kaeser GmbH) Hamburg, pers. Mitt. 1.7.1999;
- Henkel KGaA, UBA-Fachgespräch mit Wolfgang Klauck, Hermann Kluth, Cornelia Elsner und Winfried Schwarz, Düsseldorf 5.3.1999;
- Hoechst AG, Frankfurt a.M. (Hug, S. und Debrodt, H.), Gespräch mit Öko-Recherche 25.3.1996;
- Holdack-Janssen, Hinrich: Entwicklung der Pkw-Klimatisierung, in: Ki Luft- und Kältetechnik 1/1998, 8 ff.
- IGA = Industrie-Gemeinschaft Aerosole e.V., Jahresbericht 1998, Frankfurt am Main 1999;
- IPCC = Intergovernmental Panel on Climate Change, Second Assessment Report: Climate Change 1995, Cambridge University Press, Cambridge 1995;
- IPCC 1999 = IPCC/OECD/IEA Programme for National Greenhouse Gas Inventories, Good Practice in Inventory Preparation for Industrial Processes and the New Gases, Draft Meeting Report Washington DC, United States, 26-28 January 1999;
- IVPU = Industrieverband Polyurethan-Hartschaum, Stuttgart, pers. Mitt. 27.5.1999;
- Jeffs, Mike/de Vos, Rik: Zero ODP Blowing Agent Options for Rigid Polyurethane Insulating Foams, in: Joint IPCC/TEAP Expert Meeting on Options for the Limitation of Emissions of HFCs and PFCs, Petten, 26-28 May 1999;
- Johnson, Eric: Getting HFC/PFC emissions right: towards more robust estimates, in: Joint IPCC/TEAP Expert Meeting on Options for the Limitation of Emissions of HFCs and PFCs, Petten, 26-28 May 1999;
- Joint IPCC/TEAP Expert Meeting on Options for the Limitation of Emissions of HFCs and PFCs, Petten, 26-28 May 1999;
- Jungbluth (P.D.R. GmbH+Co. Betriebs KG) Thurnau, pers. Mitt. 18.6.1999;
- Kalter, Werner/Boergen, Konrad, Tengelmann-Gruppe, Mülheim/Ruhr: Environment Protection by Law or by the Own Interest of the Users, in: ASERCOM-Symposium 1998 "Refrigeration/Air Conditioning and Regulations for Environmental Protection - a Ten Years Outlook for Europe", Nürnberg, 7 October 1998;
- KIDDE-DEUGRA Brandschutzsysteme, Ratingen, pers. Mitt. 19.7.1999;
- Kirsamer, Jörg (Neoplan Gottlob Auwärter) Stuttgart, pers. Mitt. 5.3./5.7.1999;
- Kluth, Hermann (Henkel KGaA) Düsseldorf, pers. Mitt. 15.3. u. 7.5.1999;
- Köhler, J./Sonnekalb, M.: CO₂ als Kältemittel für Omnibus-Klimaanlagen, in: Reichelt, Johannes (Hrsg.): Fahrzeugklimatisierung mit natürlichen Kältemitteln: auf Straße und Schiene, Heidelberg 1996, 43-63;
- Kroesen, Karl-Wilhelm (Elastogran GmbH) Lemförde, pers. Mitt. 20.7.1999;
- March Consulting Group, UK Emissions of HFCs, PFCs and SF₆ and Potential Emission Reduction Options, carried out for the UK DETR, January 1999;
- March Consulting Group, UK, Opportunities to Minimise Emissions of Hydrofluorocarbons (HFCs) from the European Union, 30th september 1998;
- Matthys, H.: Asthmatherapie mit topisch wirksamen Steroiden, in: Internist (1995) 36, 1005-1009;

- Mayer, Helmut: Technischer Stand der Busklimatisierung, in: Ki Luft- und Kältetechnik 4/1998, 190 ff.;
- Meeh, Peter: Sichere Kältesprays, in: rfe 5/1998;
- Meeh, Peter (CRC-Kontakt Chemie - Technische Aerosole GmbH), Iffezheim, pers. Mitt. 28.6.1999, Schreiben an Öko-Recherche 11.8.1999;
- Minimax GmbH, Bad Oldesloe, pers. Mitt. 25.11.1996;
- Nonnenmann, Manfred (Behr Automobiltechnik): Klimarelevanz von Fahrzeugklimaanlagen (Climate Impacts of Automotive Air-Conditioners), in: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, 97. Jg., 4/95;
- Pauls, M. (Rathor AG) Appenzell, pers. Mitt. 15.3., 7.5. u. 23.5.1999;
- Preisegger, Ewald (Solvay Fluor und Derivate GmbH): Automotive Air Conditioning Impact of Refrigerant on Global Warming, in: Joint IPCC/TEAP Expert Meeting on Options for the Limitation of Emissions of HFCs and PFCs, Petten, 26-28 May 1999;
- RACE-Refrigeration and Automotive Climate under Environmental Aspects: Synthesis Report for Publication, 10/07/98;
- Rathor AG, Appenzell, Schreiben vom 26.2.1999;
- Reichelt, Johannes (Hrsg.): Fahrzeugklimatisierung mit natürlichen Kältemitteln: auf Straße und Schiene, Heidelberg 1996;
- Reum, Klaus (Deutsche Bahn AG) Frankfurt a.M., pers. Mitt. 10.3.1999;
- Schreiber, Rüdiger: Revolution im Reisebus, in: Bus Aktuell 12/99;
- Schubert, Peter (Du Pont Deutschland GmbH) Bad Homburg, pers. Mitt. 17.2./31.3.1999;
- Schultze-Werninghaus, Gerhard, FCKW-freie Inhalationssysteme werden favorisiert. Welche Patienten profitieren von Dosieraerosolen, welche von Pulverinhalatoren?, in: Ärzte Zeitung 15./16.3.1996, Forschung und Praxis 212/96, S. 18-20;
- Schwarz, W./Leisewitz, A. (Öko-Recherche): Aktuelle und künftige Emissionen treibhauswirksamer fluorierter Verbindungen in Deutschland, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin, Dezember 1996;
- Schwarz, W./Leisewitz, A. (Öko-Recherche): Keine Entwarnung für Ozonschicht und Erdklima. Verbrauchsprognose 1995 für FCKW, H-FCKW und FKW (Greenpeace-Studie), Hamburg 1995;
- Schwarz, W./Leisewitz, A. (Öko-Recherche): R12-Ersatz bei Altanlagen von 1996 bis Mitte 1998, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin, August 1998;
- Shell Pkw-Szenarien: Gipfel der Motorisierung in Sicht. Szenarien des Pkw-Bestands und der Neuzulassungen in Deutschland bis zum Jahr 2020, Aktuelle Wirtschaftsanalysen 9/1995, Heft 26;
- Sieverding, Udo: Autoklimaanlagen. Auswertung einer Herstellerumfrage, Verbraucher-Zentrale NRW e.V., September 1998;
- Solvay Fluor und Derivate GmbH, Hannover, Fachgespräch mit B. Wilkes, M. Ruhland, H. Bräutigam, H. Bruhns am 23.4.1996;
- Solvay Fluor und Derivate, Thermische Spaltung und Verwertung von Kältemitteln, Broschüre, Hannover, Februar 1998;
- Sonnekalb, M./Köhler, J., Air-Conditioning Unit Using CO₂ as Refrigerant Installed in a Bus, in: International Conference on Ozone Protection Technologies, October 21-23, 1996, Washington, D.C., Conference Proceedings, p. 825-834;
- Stamp, Malcolm (Great Lakes Chemical, UK), pers. Mitt. 18.6.1999;
- Süß, Jürgen: CO₂ als Kältemittel - Chance oder Risiko?, in: DIE KÄLTE & Klimatechnik 6/1999, 32 ff.
- Szily (Lackfa Isolierstoff GmbH) Rellingen, pers. Mitt 12.7.1999:

- Technical requirements for refrigeration equipment. English translation of the Netherlands 1994 Administrative order on leak-free refrigeration equipment as published in the Netherlands Government Gazette on december 16, 1994 (Staatcourant 1994, 243), Version 30 March 1995;
- TOTAL WALTHER Feuerschutz GmbH, Köln, pers. Mitt. 9.2.1996;
- Tujibayashi, Yoshiyuki (Nissan Motor Co., Ltd.), Action plan related to emission control of HFC134a refrigerant for automobile air-conditioning systems, in: Joint IPCC/TEAP Expert Meeting on Options for the Limitation of Emissions of HFCs and PFCs, Petten, 26-28 May 1999;
- UNEP-FTOC = UNEP 1998 Flexible and Rigid Foams Technical Options Report, December 1998;
- UNEP-RTOC 1998 = UNEP 1998 Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee, 1998 Assessment, Nairobi 1998;
- van Gerwen, René u.a., TNO Insitute, Apeldoorn: Dutch Regulations for Reduction of Refrigerant Emissions: Experiences with a Unique Approach over the Period 1993-1998, in: ASERCOM-Symposium 1998 "Refrigeration/Air Conditioning and Regulations for Environmental Protection - a Ten Years Outlook for Europe", Nürnberg, 7 October 1998;
- van Gerwen, René, TNO Insitute, Apeldoorn, persönliche Mitteilung 7.5.1999;
- VCI = VCI-Ad-hoc-Gruppe "Fluorkohlen-Wasserstoffe", Sitzung am 16.3.1999 in Frankfurt am Main mit: Verband der Chemischen Industrie (Rothermel); Bayer AG, Leverkusen (Wiedermann); Deutsche ICI GmbH, Frankfurt (Schwennesen); Du Pont Deutschland GmbH, Bad Homburg (Schubert), Elastogran GmbH, Lemförde (Heinatz); Solvay Fluor und Derivate GmbH, Hannover (Preisegger);
- VDA (Verband der Automomilindustrie), Pressedienst, Zur Situation der Automobilindustrie 1998, Frankfurt 28.01.1996;
- VDKF (Verband der Deutschen Kälte-Klima Fachbetriebe e.V.): Maßnahmen zur regelmäßigen Wartung von Kälte-Klimaanlagen (Positionspapier des VDKF), in: DIE KÄLTE & Klimatechnik 4/1996, 218 ff.
- Volkswagen AG, Wolfsburg, pers. Mitt. 7.5.1999;
- Weilbacher: Ausgasung von Zellgasen, Laborbericht vom 17.08.87 (überreicht von der BASF AG, Ludwigshafen);
- Wertenbach, J., Maue, J., Volz, W., CO₂ Refrigeration Systems in Automobile Air-Conditioning, in: International Conference on Ozone Protection Technologies, October 21-23, 1996, Washington, D.C., Conference Proceedings, p. 855-864;
- Wettengel R. et al., Asthmatherapie bei Kindern und Erwachsenen. Empfehlungen der Deutschen Atemwegsliga in der Deutschen Gesellschaft für Pneumologie, in: Medizinische Klinik 1998;93:637-50 (Nr. 11);
- Wiedermann, Rolf (Bayer AG) Leverkusen, pers. Mitt. 16.3./16.6./12.7.1999;
- Wright, Paul: Patient Care Issues in HFC Emissions Policy, in: Joint IPCC/TEAP Expert Meeting on Options for the Limitation of Emissions of HFCs and PFCs, Petten, 26-28 May 1999;

II. Schwefelhexafluorid - SF₆

Überblick

SF₆ ist das Gas mit dem höchsten Treibhauspotential. Dieses wurde vom IPCC 1995 auf 23 900 CO₂-Massenäquivalente kalkuliert (für einen Zeithorizont von 100 Jahren). Seit Anfang der 90er Jahre widmet die internationale Klimaforschung diesem Gas und seinen Emissionsquellen erhöhte Aufmerksamkeit.

Der größte Teil der weltweiten SF₆-Produktion wird in elektrischen Betriebsmitteln, insbesondere Schaltanlagen, genutzt. Vorliegende Studie zu SF₆ in Deutschland bestätigt elektrische Betriebsmittel zur Stromversorgung als größten Einzelverbraucher, kommt aber zu dem Resultat, daß die Strukturen bei den jährlichen Emissionen ganz andere sind als beim jährlichen Verbrauch. Die meisten Emissionen stammen gegenwärtig aus Autoreifen und auf längere Sicht aus Schallschutzscheiben.

Für die Entwicklung der von Deutschland ausgehenden künftigen SF₆-Emissionen werden nachfolgend bis zum Jahr 2010 jeweils zwei Szenarien pro Anwendungssektor aufgestellt, von denen jedes möglich und realistisch ist.

Szenario I ist ein Business-as-Usual-Szenario (BaU) und schreibt die gegenwärtigen Trends fort. Szenario II ist ein Szenario der relativen Emissionsminderung: In ihm werden vorhandene technische Potentiale zur Emissionsdämpfung bzw. zur SF₆-Substitution in jedem einzelnen Sektor ausgeschöpft. Es kommen nur Emissionsminderungen infrage, die nicht durch ökologische Nachteile an anderer Stelle kompensiert werden.

Im - aus sechs sektoralen BaU-Szenarien zusammengefaßten - Gesamtszenario I sinken die Emissionen von 1995 bis 2010 von 260 t auf 210 t (80%), im Gesamtszenario II im gleichen Zeitraum auf 124 t (47%). Die entsprechenden CO₂-Äquivalente betragen 2010 nach Szenario I rd. 5 Mio. t und nach Szenario II rd. 3 Mio. t. Das bedeutet beim Beitrag zum Treibhauseffekt eine Entlastung um 2 Mio. t CO₂-Äquivalente oder 41%.

1 BaU-Emissionsprognose 2010 – Szenario I

Das Szenario I basiert für 1995 bis 2010 auf folgenden sektorspezifischen Annahmen¹:

8. Bei elektrischen Betriebsmitteln gilt in Szenario I und II: Die Gasverluste beim Hersteller bleiben konstant und steigen beim Betreiber wegen der Zunahme des inländischen Bestands jährlich um 0,2 t an. Die jahrgangswise Verschrottung findet erst ab 2010 statt. SF₆ aus den Altanlagen wird dann rückgewonnen.
9. Bei Schallschutzscheiben beträgt die jährliche Neuproduktion konstant 2,6 Mio. qm. Beim Füllgas bleibt die Relation SF₆ zu Argon konstant 30% zu 70%. Ab dem Jahr 2000 werden die ersten SF₆-befüllten Fenster aus den 70er-Jahren entsorgt. Die noch vorhandene SF₆-Füllung wird nicht aufgefangen, sondern freigesetzt.
10. Bei Autoreifen, wo Gasbefüllungen nach drei Jahren vollständig emittieren, bleibt das Verbrauchsniveau des Jahres 1998 von 30 t bis mindestens 2007 konstant. Die Emissionen verlaufen daher von 2001 bis 2010 gleichfalls auf diesem Niveau.

¹ Die Bereiche "Elektrische Betriebsmittel" und "Sonstiges" werden nicht nach zwei Szenarien hin untersucht. Ihre Emissionen gehen in beide Gesamtszenarien mit gleicher Größe ein.

11. Für Magnesiumguß gilt ein jährliches Wachstum von 20%. SF₆ als Schutzgas wird in den neuen Betrieben dank moderner Ofentechnologie in relativ kleinen spezifischen Einsatzmengen benutzt. Nur in der Anwendung bei alten Kleinbetrieben, die 1% des Magnesiumgusses erzeugen, bleibt ein spezifisch hoher SF₆-Einsatz pro t Mg.
12. In der Halbleiterfertigung steigen die Emissionen im Maße der 6-prozentigen jährlichen Wachstumsrate der inländischen Einsatzmenge für das Strukturätzen.
13. Bei sonstigen Anwendungen gilt in Szenario I und II: Die Emissionen aus acht Einzelanwendungen bleiben bis auf Sondergebiete im wesentlichen stabil.

Unter diesen Annahmen ergeben sich für die Zeit bis 2010 für alle Sektoren zusammen die in Tabelle 32 dargestellten Emissionen. Sie sinken von 1995 bis 2000 zwar von 260 auf 154 Tonnen, steigen danach aber wegen erhöhter Emissionen aus Schallschutzscheiben wieder an, und erreichen 2010 die Höhe von 210 t.

	1995	2000	2005	2010
1. Elektr. Betriebsmittel	25	27	28	29
2. Schallschutzscheiben	108	60	90	126
3. Autoreifen	110	50	30	30
4. Magnesiumguß	6	3	4	5
5. Halbleiter	4	6	8	11
6. Sonstiges	7	8	8	8
Summe	260	154	168	210

- Die mit Abstand meisten SF₆-Emissionen stammen aus Schallschutzscheiben (Tabelle 32, Zeile 2). 1995 sind sie mit 108 t zwar nicht ganz so hoch wie diejenigen aus Autoreifen, und im Jahr 2000 sind auch die Emissionen aus Schallschutzscheiben auf einem Tiefpunkt von 60 t. Nach 2000 setzt jedoch jahrgangsweise die Fensterentsorgung ein, ohne daß die Gasfüllung aufgefangen würde. Sie emittiert vollständig in die Atmosphäre. Im Jahr 2010 betragen die Emissionen aus Schallschutzscheiben 126 t und bilden 60% der inländischen Gesamtemissionen.
- Der starke Rückgang der Emissionen aus Autoreifen (Tabelle 32, Zeile 3) von 110 t im Jahr 1995 auf 30 t ab 2001 ist der Hauptgrund dafür, daß im BaU-Szenario die Emissionen insgesamt sinken. Die Ursache der Emissionsabnahme ist darin zu suchen, daß alle großen Ketten des Reifenfachhandels die aktive Vermarktung von SF₆ als Reifengas eingestellt haben. Die Reifenhändler füllen praktisch nur noch auf Wunsch ihrer alten Kunden SF₆ statt Luft oder Stickstoff ein.
- Die SF₆-haltigen elektrischen Betriebsmittel (Tabelle 32, Zeile 1) verursachen Emissionen, die teils bei ihrer Herstellung und teils im laufenden Betrieb anfallen. Bis 2010 wird noch mit einer Zunahme beim inländischen Bestand gerechnet. Dann werden die Emissionen insgesamt 29 t betragen. Sofern, wie beabsichtigt, im Rahmen der in den nachfolgenden Jahren einsetzenden Verschrottungen der Geräte das gebrauchte Gas aufgefangen und wiederaufgearbeitet wird, ist auch nach 2010 nicht mit einem weiteren Emissionsanstieg aus dieser Anwendung zu rechnen.
- Bei den kleineren Anwendungen "Magnesiumguß", "Halbleiter" und "Sonstiges" tendieren die Emissionen aus den Magnesiumgießereien dank neuer Technologien

nach unten (auf 5 t in 2010), während "Halbleiter" bis 2010 auf 11 t zunehmen. "Sonstiges" bleibt nahezu stabil (Anstieg 1995-2010 von 7 auf 8 t).

	1995	2000	2005	2010
1. Elektr. Betriebsmittel	0,60	0,65	0,68	0,70
2. Schallschutzscheiben	2,57	1,43	2,14	3,02
3. Autoreifen	2,63	1,20	0,72	0,72
4. Magnesiumguß	0,15	0,07	0,08	0,11
5. Halbleiter	0,10	0,15	0,20	0,27
6. Sonstiges	0,18	0,19	0,19	0,19
Summe	6,22	3,69	4,01	5,01

- Die treibhauswirksamen Emissionen sinken 1995-2010 von 6,22 Mio. t CO₂-Äquivalente auf 5,01 Mio. t, mithin auf 81% (Tabelle 33). Gegenüber dem Jahr 2000, in dem sie deutlich niedriger ausfallen, bedeutet dies einen kräftigen Wiederanstieg. Die Hauptmasse der Emissionen stammt 2010 von Schallschutzscheiben, mit weitem Abstand vor den Emissionen von Autoreifen und elektrischen Betriebsmitteln.

2 Emissionsminderung bis 2010 – Szenario II

Das Szenario II beruht für 1995 bis 2010 auf folgenden sektorspezifischen Annahmen:

1. Bei Schallschutzscheiben bleibt zwar die jährliche Neuproduktion konstant bei 2,6 Mio. qm. Beim Füllgas wird jedoch dank Veränderungen beim Glasaufbau schrittweise bis 2005 ganz auf SF₆-Neueinsatz verzichtet. Damit werden zwar die ab 2000 einsetzenden Verluste aus der Fensterentsorgung nicht geringer, wohl aber kurzfristig die Befüllungs- und mittelfristig auch die Bestandsverluste.
2. Zur Befüllung von Autoreifen wird bis zum Jahr 2007 kein SF₆ mehr verwendet. Voraussetzung dafür ist die Aufklärung der bisherigen Kunden über die Sicherheits- und Umweltprobleme infolge dieser Anwendung.
3. Für Magnesiumguß bleibt das jährliche Wachstum bei 20%. SF₆ als Schutzgas wird nicht nur in den alten Gießereien, sondern auch in den neuerrichteten als Schutzgas durch SO₂ abgelöst. SF₆ bleibt nur bei kleinbetrieblichen Spezialanwendungen.
4. In der Halbleiterfertigung werden ab dem Jahr 2000 neue Ätzkammern nur noch mit hocheffizienter Abgasreinigung installiert. Ab 2009 werden auch die Altanlagen durch neue ersetzt, die über Einrichtungen zur SF₆-Spaltung im Abgas verfügen.
5. Für elektrische Betriebsmittel und sonstige Anwendungen bleiben die Annahmen und folglich die Emissionen gegenüber Szenario I unverändert.

Unter diesen Bedingungen ergeben sich für die Zeit bis 2010 für alle Sektoren zusammen die atmosphärischen Emissionen lt. Tabelle 34.

- Die Gesamtemissionen sinken bis 2010 gegenüber Szenario I nicht nur auf 210 t, sondern auf 124 t. Das sind - am Szenario I gemessen - 86 t oder 41% weniger.
- Entscheidend für den Emissionsrückgang im Szenario II sind die Entwicklungen bei Schallschutzscheiben und Autoreifen. In beiden Anwendungen wird ab 1999 auf den SF₆-Neueinsatz schrittweise verzichtet. Aus Autoreifen fallen ab 2010 keine Emis-

sionen mehr an. Bei Schallschutzscheiben entstehen ab 2006 keine Befüllverluste mehr, so daß 2010 die aus Entsorgungs- und Bestandsverlusten gebildeten Gesamtemissionen nicht mehr 126 t, sondern nur noch 84 t betragen (Tab. 34, Zeile 2).

Tab. 34: SF₆-Emissionen nach Sektoren 1995-2010 in t/a nach Szenario II				
	1995	2000	2005	2010
1. Elektr. Betriebsmittel	25	27	28	29
2. Schallschutzscheiben	108	54	51	84
3. Autoreifen	110	50	17	0
4. Magnesiumguß	6	3	2	0,3
5. Halbleiter	4	6	6	2
6. Sonstiges	7	8	8	8
Summe	260	148	111	124

- Auch beim Magnesiumguß findet infolge der Umstellung auf SO₂ ein fast vollständiger Verzicht auf SF₆ statt. Die SF₆-Emissionen liegen 2010 beinahe bei Null. Sie betragen noch 0,3 t.
- Die SF₆-Emissionen aus der Halbleiterfertigung liegen trotz sechszwanzigprozentigen jährlichen Einsatzwachstums 2010 dank der vollständigen Ausrüstung aller Neuanlagen mit Abgasreinigungssystemen und des ab 2009 einsetzenden Altanlagenersatzes unter dem Ausgangsniveau von 1995.
- Bei elektrischen Betriebsmitteln und sonstigen Anwendungen sind die Emissionen voraussetzungsgemäß unverändert. Elektrische Betriebsmittel sind infolge des SF₆-Verzichts bei der Reifenbefüllung im Jahr 2010 zweitgrößte Emissionsquelle geworden, allerdings immer noch mit großem Abstand zu den Schallschutzscheiben.
- Auf Schallschutzscheiben entfällt 2010 im Szenario II ein größerer Anteil an den gegenüber Szenario I verminderten - Gesamtemissionen: 68%.
- Tabelle 35 zeigt die analoge Emissionsentwicklung in CO₂-Äquivalenten. 2010 werden 2 von knapp 3 Mio. t allein von Emissionen aus Schallschutzfenstern verursacht.

Tab. 35: SF₆-Emissionen nach Sektoren 1995-2010 nach Szenario II in Mio. t CO₂-Äquivalente				
	1995	2000	2005	2010
1. Elektr. Betriebsmittel	0,60	0,65	0,68	0,70
2. Schallschutzscheiben	2,57	1,28	1,21	2,01
3. Autoreifen	2,63	1,20	0,40	0,00
4. Magnesiumguß	0,15	0,07	0,04	0,01
5. Halbleiter	0,10	0,14	0,14	0,05
6. Sonstiges	0,18	0,19	0,19	0,19
Summe	6,22	3,53	2,66	2,95

Die unterschiedliche Emissionsentwicklung nach Szenario I und II für den ganzen Zeitraum 1995 bis 2010 wird grafisch in Diagramm 22 sichtbar:

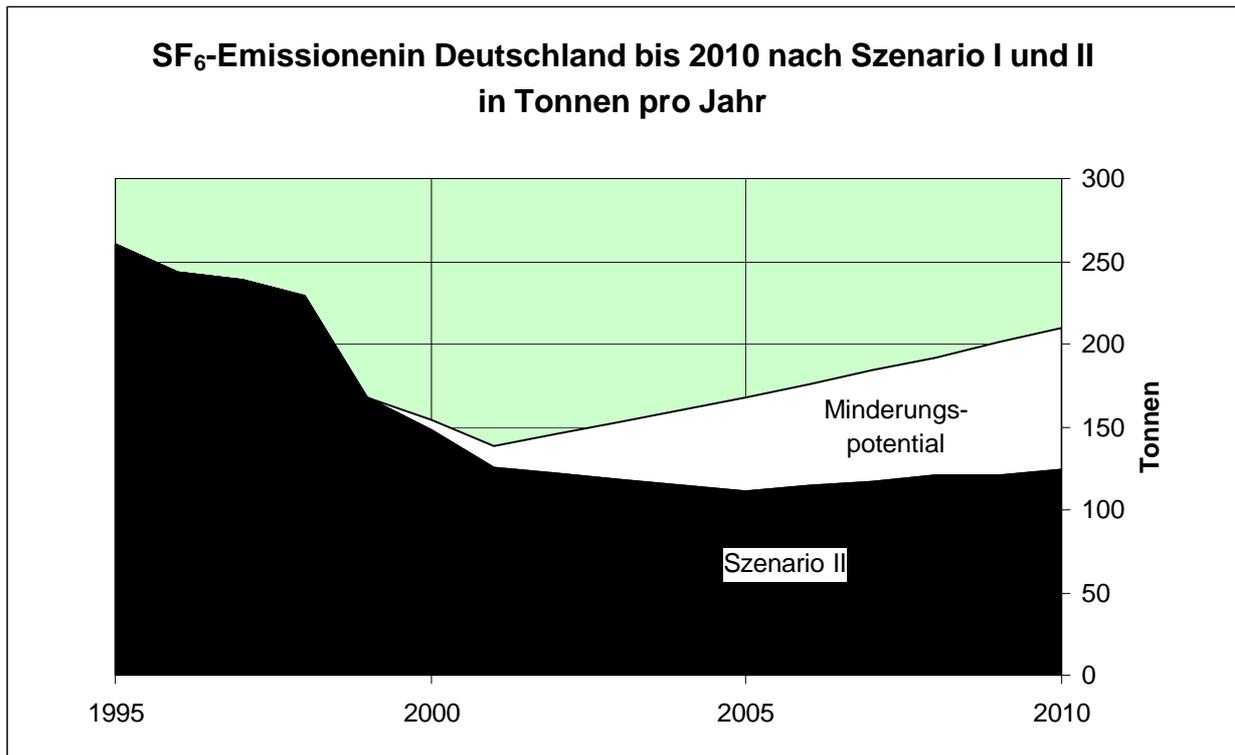


Diagramm 22: SF₆-Emissionen in Deutschland bis 2010 nach Szenario I und II in Tonnen. Nach starkem Rückgang bis 2001 bleiben die Emissionen in Szenario II trotz der 2001 einsetzenden Entsorgungsverluste aus Schallschutzfenstern stabil und begründen ein wachsendes Minderungspotential gegenüber Szenario I. Dort nehmen ab 2001 die Emissionen wieder zu.

Diagramm 23 zeigt, daß die CO₂-Äquivalente gemäß Szenario I bis 2010 bei 5 Mio. t liegen, während sie gemäß Szenario II 40% weniger betragen, nämlich ca. 3 Mio. t.

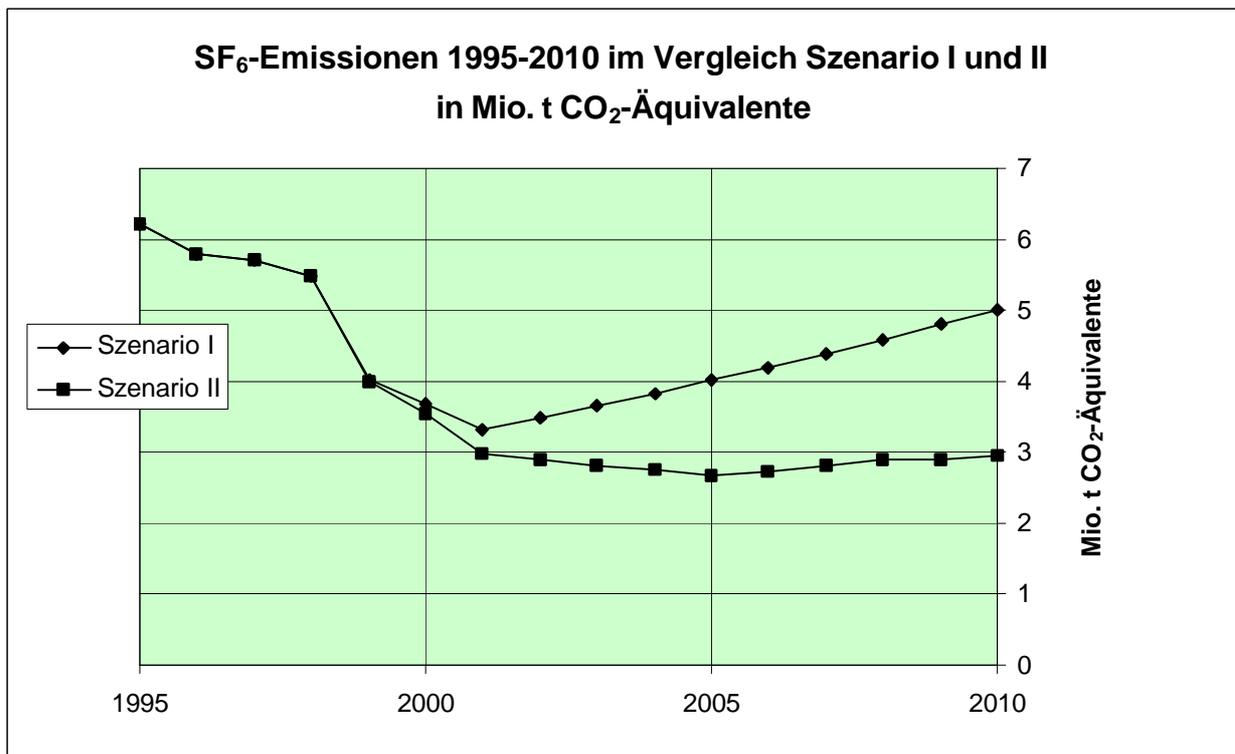


Diagramm 23: SF₆-Emissionen 1995-2010 im Vergleich Szenario I und II in Mio. t CO₂-Äquivalente. Nach Szenario I sind es 2010 über 5 Mio. t, nach Szenario II nur 3 Mio. t.

Anhang: Die Jahre 1995 bis 1997

Die Tabellen 36 und 37 dienen der Vervollständigung der umweltrelevanten Emissionsdaten für die Jahre 1996 und 1997.

Emissionen 1995-1997 in Jahrestonnen

Tab. 36: Emissionen von SF₆ nach Sektoren 1995-1997 in t/a			
	1995	1996	1997
1. Elektr. Betriebsmittel	25	28	27
2. Schallschutzscheiben	108	85	75
3. Autoreifen	110	115	120
4. Magnesiumguß	6	3	3
5. Halbleiter	4	5	5
6. Sonstiges	7	8	8
Summe	260	243	238

Beitrag zum Treibhauseffekt 1995-1997

Tab. 37: Emissionen von SF₆ nach Sektoren 1995-1997 in Mio. t CO₂-Äquivalente			
	1995	1996	1997
1. Elektr. Betriebsmittel	0,60	0,66	0,64
2. Schallschutzscheiben	2,57	2,02	1,80
3. Autoreifen	2,63	2,75	2,87
4. Magnesiumguß	0,15	0,07	0,07
5. Halbleiter	0,10	0,11	0,13
6. Sonstiges	0,18	0,18	0,19
Summe	6,22	5,81	5,70

1 Elektrische Betriebsmittel

Elektrische Betriebsmittel für die Stromversorgung sind mit jährlich knapp 400 t bei weitem der größte Einzelverbraucher von SF₆ in Deutschland. Aufgrund der hohen Exportquote von über 80% werden allerdings nur 60-70 t SF₆ in neuen Geräten und Anlagen dem inländischen Bestand zugeführt. Die inländischen Emissionen bei Herstellern und Betreibern elektrischer Betriebsmittel liegen bei ca. 25 t jährlich. 1995-1997 waren elektrische Betriebsmittel drittgrößte inländische SF₆-Emissionsquelle.

1 SF₆-befüllte elektrische Betriebsmittel: Schaltanlagen und Wandler

SF₆ findet vor allem in Schaltanlagen und Schaltgeräten der Hochspannung (110-380 kV) und der Mittelspannung (10-30 kV) Verwendung. Dabei wirkt das Gas sowohl als Lösch- als auch als Isoliermittel anstelle von Luft oder Mineralöl. Im Niederspannungsbereich (< 1 kV) ist seine Verwendung nicht üblich.

Schaltanlagen, Schaltgeräte und die ihnen meist zugeordneten Meßwandler befinden sich an Knotenpunkten der Stromversorgungsnetze, wo Energie von übergeordneten Übertragungsleitungen auf abgehende Leitungen verteilt wird. Neben dem Ein- und Ausschalten von Betriebsströmen in Teilnetzen (oft wegen Wartungs- und Reparaturarbeiten) soll die Schaltanlage befähigt sein, hohe Kurzschlußströme, die aus Fehlern und Störungen im Stromkreis resultieren, in Millisekunden abzuschalten und den an den Schaltkontakten entstehenden stromstarken Lichtbogen zu löschen.

1.1 Schaltanlagen und -geräte der Hoch- und Mittelspannung

Die beiden wichtigsten SF₆-haltigen Produkte in der Hochspannung, nämlich metallgekapselte Gas-isolierte Schaltanlagen (GIS) und Freiluft-Leistungsschalter, werden in Deutschland seit 1965 gebaut. Zwischen 1970 und 1974 setzte sich die SF₆-Technologie im Hochspannungsbereich durch. Bei Mittelspannungsschaltanlagen setzte die SF₆-Isolierung später ein: 1978 kamen die ersten Lastschaltanlagen auf den Markt, 1982 die ersten SF₆-isolierten Leistungsschaltanlagen.

1.2 Hochspannungs-Meßwandler

SF₆-isolierte Freiluft-Meßwandler wurden 1978 eingeführt. Lange dominierte bei diesen Geräten die Isolierung durch ölprägniertes Papier. 1990 stellte der führende inländische Produzent ganz auf SF₆ um, und bei dem anderen Hersteller verschob sich die Relation zwischen Öl- und SF₆-Isolierung deutlich zugunsten der letzteren.

1.3 Der inländische SF₆-Bestand in elektrischen Betriebsmitteln

Die Hauptbetreiber SF₆-haltiger Betriebsmittel, zu knapp 90% öffentliche Stromversorger, hatten 1995 eine Bestandsmenge von 1000 t dieses Gases. "Davon entfallen 89% auf Hochspannungsgeräte und -anlagen, wobei konventionelle Geräte (Leistungsschalter, Wandler) mit einem Drittel und gasisolierte Schaltanlagen (GIS) mit zwei Dritteln am SF₆-Bestand beteiligt sind. Nur etwa 11% der in der elektrischen Energieversorgung befindlichen SF₆-Mengen kommen in Mittelspannungsanlagen zur Anwendung." (VDEW 1996, 2-3)

Im Unterschied zum inländischen Bestand wird der inländische Absatz SF₆-haltiger Schaltanlagen zur Zeit (1996 zu zwei Dritteln) vom Mittelspannungsbereich getragen. Betreiber solcher Anlagen und Geräte sind kaum überregionale Stromversorger, sondern vor allem Großindustrie und kommunale Stromversorger bzw. Stadtwerke (ABB 1999). In der Mittelspannung diente noch Anfang der neunziger Jahre hauptsächlich Luft als Isoliermedium.

2 Inlandsverbrauch 1995-1997

Der jährliche SF₆-Verbrauch der Hersteller zur Befüllung neuer elektrischer Betriebsmittel (Schaltanlagen und -geräte, Wandler) stieg von 1995 bis 1997 um 40 t - von 349 t auf 388 t. Davon setzten die Schaltanlagenbauer 308 t bzw. 348 t ein und die Meßwandlerbauer jährlich 40 t (vgl. Tabelle 38). Die Hauptmenge des Gases wurde zusammen mit den Produkten ins Ausland exportiert.

Tab. 38: Inländischer SF₆-Verbrauch der Hersteller elektrischer Betriebsmittel 1995-1997 in t/a			
	1995	1996	1997
Schaltanlagen und -geräte	308	345	348
Wandler	40	40	40
Transformatoren	1	<1	-*
Summe:	349	386	388

Quellen: ZVEI 1996 und UBA 1999; Befragung Wandler 1999.

* SF₆-befüllte Transformatoren werden seit Ende 1996 nicht mehr produziert.

3 Inlands-Emissionen 1995-1997

Bei den inländischen Emissionen ist zwischen Gasverlusten beim Hersteller und beim Betreiber zu unterscheiden. Die Emissionen des Herstellers sind Werksverluste und Montageverluste, die Emissionen des Betreibers sind Leckage- und Wartungsverluste.

3.1 Werksverluste der Hersteller

Im Werk fallen Verluste bei Entwicklung, Prüfung und Herstellung von Komponenten oder Anlagen für das Inland und den Export an. Für Schaltanlagen und -geräte betragen nach UBA 1999 die werksinternen Verluste 4,4% (1996) bzw. 3,9% (1997) des SF₆-Gesamtverbrauchs (s. Tabelle 38).

Die Verluste bei der Geräte- und Anlagenbefüllung werden dadurch eingeschränkt, daß SF₆ nicht unter Luftverdrängung in die Gasräume gelangt, wodurch es mit der austretenden Luft partiell entweichen könnte; vielmehr ist Stand der Technik, vor der Befüllung die Gasräume zu evakuieren. Die Motive dafür resultieren aus der technischen Notwendigkeit, das SF₆-Gas frei von Luft und Feuchtigkeit zu halten, um die Bildung von Zersetzungsprodukten durch Sekundärreaktionen zu minimieren.

Für Wandler werden die Werksverluste durch fehlerhafte Geräte u. dgl. von den Herstellern auf nur 2% der jährlichen Füllmenge geschätzt (Befragung Wandler 1999). Dies komme u.a. daher, daß Wandlerbauer nur wenig eigene Forschungs- und Entwicklung betreiben.

Die gesamten Werksverluste betragen 16 t in 1996 und 14,3 t in 1997 (Tabelle 39).

Tab. 39: Inländische SF₆-Emissionen von Herstellern und Betreibern elektrischer Betriebsmittel 1995-1997 in t/a			
	1995	1996	1997
Werksverluste der Hersteller	14,00	15,99	14,27
Montageverluste der Hersteller	1,30	1,37	1,80
Lfd. Betreiberverluste*	9,90	10,35	10,90
Summe:	2057,20	2060,71	2060,97
<i>Emiss. in Mio. t CO₂-Äquiv.</i>	<i>0,602</i>	<i>0,662</i>	<i>0,645</i>

Quellen für 1996 und 1997: UBA 1999, für 1995: Eigenschätzungen.

* Leckage- und Wartungsverluste (jährliche Nachfüllungen)..

3.2 Montageverluste der Hersteller

Eine weitere - kleinere - Emissionsquelle sind die Gasverluste am Aufstellungsort. Sie entstehen bei Montage und Inbetriebnahme der Anlagen und Geräte vor der Übergabe an die Betreiber. Die Anlagen und Geräte werden zum Aufstellungsort entweder mit SF₆-Befüllung bei Normaldruck oder mit Stickstoff-Befüllung geliefert.

Zur Inbetriebnahme muß im Hochspannungsbereich in den Gasräumen der Druck auf 3 bis 4 bar gesteigert werden, weil bei Überdruck die Isolierwirkung etwa zehn Mal besser als von Luft ist. Aus diesem Umstand resultiert die Möglichkeit, die Abstände zwischen spannungsführenden Bauteilen und damit die Gesamtabmessungen bis zu zehn Mal geringer zu halten. Die Platzersparnis ist eines der wesentlichen Argumente für den Einsatz der SF₆-Technologie. Im Leistungsschalter-Raum einer gasisolierten Schaltanlage (GIS), wird der Arbeitsdruck sogar auf 6,5 bar erhöht. Das ist der Druck, bei dem SF₆ bei minus 25°C gerade noch gasförmig ist (ABB 1996).

Bei der Befüllung der Schaltanlagen und -geräte am Aufstellungsort in Deutschland betragen die Montageverluste 2% bis 2,6%. Die Wandlerbauer geben für ihre im Inland aufgestellten Geräte (Freiluftwandler) nur 0,2% auf die neueingesetzte Menge an.

Die gesamten Montageverluste betragen 1,37 t in 1996 und 1,80 t in 1997 (Tabelle 39).

3.3 Leckagen bei Betreibern

Obwohl die Füllräume der meisten metallgekapselten SF₆-Anlagen in der Hochspannung unter Drücken bis über 6 bar stehen, sind Gasverluste durch Leckagen während des laufenden Betriebs relativ gering. Eine DIN-Norm (DIN IEC 298 VDE 0670, S.43) läßt zwar jährliche Leckraten von 1%-3% zu, aber in der Praxis liegen nur die älteren Anlagen aus der Bauzeit vor 1980 in diesem Bereich. Moderne Anlagen sind dichter und verlieren jährlich weniger als 0,5%, die nachgefüllt werden müssen. Alle Hersteller garantieren für neue Anlagen und Geräte Leckraten von weniger als 1%.

3.4 Wartungsverluste bei Betreibern

Wartungsverluste entstehen bei der routinemäßigen oder störungsbedingten Öffnung der Anlagen und Geräte. Im Normalfall besteht die Wartung aus der Reinigung des Gases von angesammelter Feuchtigkeit, Luft und chemischen Zersetzungsprodukten

sowie aus der Kontrolle bzw. Auswechslung der metallischen Kontakte und Bauteile und der Dichtungen. Die Wartung führen der Betreiber oder der Hersteller durch.

SF₆-Schaltanlagen sind wartungsarm, da ihr Inneres vor Verschmutzungen und Witterungseinflüssen (Eis, Schnee, Salzluft) geschützt ist. Außerdem kommen entladungsintensive Schaltvorgänge nicht häufig vor und stromstarke Kurzschlußlichtbögen, auf welche die Leistungsschalter ausgelegt sind, nicht öfter als alle 1-2 Jahre. Leistungsschalter sollen während ihrer Lebensdauer bis zu 10 000 mal Nennströme schalten und 50 bis 100 mal Kurzschlüsse ausschalten können (VDEW 1994, 12). So sieht z.B. ein Serviceplan für SF₆-Freiluft-Leistungsschalter die erste Revision mit Öffnung des Gerätes erst nach 20 Betriebsjahren vor (Siemens 1996; Siemens o.J.). Vergleichbar groß sind die Wartungsintervalle bei metallgekapselten SF₆-Anlagen.

Beim Öffnen des Gasraumes im Rahmen der Wartung und Instandhaltung können Emissionen heute begrenzt werden. Gas-Recycling vor Ort ist Stand der Technik: Entleeren und Wiederbefüllen geschieht im geschlossenen Kreislauf (VDEW 1993, 48, 49). Dazu stehen den Betreibern und den Herstellern spezielle Servicewagen zur Verfügung, mit deren Hilfe das SF₆ bis auf einen Absolutdruck von 50 mbar abgesaugt, von gas- und staubförmigen Verunreinigungen befreit, verflüssigt, zwischengespeichert und anschließend wieder eingefüllt wird (Neumann 1992, 269).

Die jährlichen Verluste bei den Betreibern der Anlagen durch Leckagen und Wartung betragen in Deutschland real 0,9% bezogen auf den in allen Anlagen enthaltenen SF₆-Gesamtbestand². Zu den Betreibern zählen außer den öffentlichen Stromversorgern auch Industrieunternehmen und die Eisenbahn. Letztere verfügen über ca. 10% des inländischen SF₆-Gesamtbestands in elektrischen Betriebsmitteln.

Stromversorger und sonstige Betreiber

In Deutschland erzeugten Stromversorger, Industrie und Bahn 1997 zusammen rund 508 (1996: 511) Milliarden Kilowattstunden (Mrd. kWh) Strom. Knapp 89 Prozent des Stroms stammten aus den Kraftwerken der Unternehmen der öffentlichen Stromversorgung. Auf Kraftwerke der Industrie entfielen 1997 rund zehn Prozent der gesamten deutschen Stromerzeugung. Die Deutsche Bahn hatte mit sieben Mrd. kWh einen Anteil von gut einem Prozent. (VDEW 1998b.) Expertenschätzungen gehen von einem 10-prozentigen Anteil der industrie- und bahneigenen SF₆-haltigen Anlagen und Geräte am inländischen Gesamtbestand aus (ABB 1996).

4 Emissionsprognose bis 2010

Zu den SF₆-Emissionen aus elektrischen Betriebsmitteln werden ausnahmsweise keine zwei Emissionsszenarien aufgestellt. Eine Unterscheidung in "Business as Usual" und "Minderungsszenario" ist für die Zeit vor 2010 nicht sinnvoll, weil eine andere Emissionsentwicklung als der sich abzeichnende Trend zu wenig Realitätsbezug hätte.

² Eine Rate der Betreiber-Emissionen von 0,9% hatte die VDEW bereits für 1995 ermittelt. Für die öffentlichen Stromversorger (ohne Industrie und Bahn) erklärte sie: "Aufgrund von konstruktionsbedingten Leckagen, Gasverlusten bei Wartungsarbeiten und störungsbedingten Verlusten müssen bei den in der elektrischen Energieversorgung in Deutschland eingesetzten Betriebsmitteln jährlich etwa 9000 kg SF₆-Gas nachgefüllt werden. Bezogen auf die gesamte eingesetzte Menge (1000 t; d. Verf.) entspricht dies einer durchschnittlichen jährlichen Nachfüllrate von 0,9%." (VDEW 1996)

Hintergrund ist, daß aufgrund der 40-jährigen Lebensdauer der SF₆-haltigen Anlagen erst nach 2010 jahrgangswise Altanlagen der ersten Generation zur Verschrottung anstehen. Dann steht tatsächlich die Frage: Was wird aus den SF₆-Füllungen - werden sie zurückgewonnen oder in die Atmosphäre entlassen? Da der Zeitrahmen vorliegender Studie bei 2010 endet, folgt hier statt zweier Szenarien nur eine einzige Prognose zu der bis 2010 wahrscheinlichsten Emissionsentwicklung. Im Anschluß daran werden Bedingungen erörtert, die nach 2010 die SF₆-Rückgewinnung aus Altanlagen gewährleisten.

4.1 Künftige Werksverluste

Die Schaltanlagen- und Wandlerindustrie nimmt für die absehbare Zukunft keine wesentliche Steigerung ihrer Produktion an, so daß mittelfristig der Gesamtverbrauch von SF₆ im Bereich zwischen 350 und 400 Jahrestonnen bleiben dürfte. Es ist daher mit keinem Anstieg der - dem SF₆-Gesamtverbrauch proportionalen - Werksverluste zu rechnen. Sie dürften sich zwischen 14 und 16 t jährlich bewegen (Zentrum: 15 t).

4.2 Künftige Montageverluste

Die Montageverluste der Hersteller hängen nicht vom jährlichen SF₆-Gesamtverbrauch ab, sondern nur von dem für das Inland bestimmten Teil davon. Die Wachstumsraten des inländischen Stromverbrauchs werden mittelfristig auf "nicht höher als durchschnittlich ein Prozent pro Jahr" (VDEW 1998a) geschätzt. Neuanlagen im Hochspannungsnetz der überregionalen Stromversorger dienen primär dem Ersatz ausgedienter luft- oder ölisolierte Anlagen der Baujahre vor 1970-1980 durch SF₆-befüllte. Eine Ausweitung des Anlagenbestands findet kaum statt.

Kompensiert wird die Verlangsamung beim Inlandsabsatz von Hochspannungsanlagen durch Mittelspannungsanlagen für Industriebetriebe und Stadtwerke. Entsprechend der gegenüber der Hochspannung geringeren Betriebsbelastung stehen SF₆-befüllte Mittelspannungsanlagen nur unter geringem oder keinem Überdruck. Ihre Gasbefüllung im Werk und ihre Aufstellung beim Betreiber gelten u.a. deswegen als weniger emissiv als Hochspannungsanlagen (ABB 1999).

Bei Montageverlusten wird mittelfristig kein Anstieg erwartet. Die Emissionen dürften sich im Bereich zwischen 1,3 und 1,8 t jährlich bewegen (Zentrum: 1,5 t).

4.3 Künftige Betreiberemissionen

Betreiber-Verluste sind die einzige Emissionskategorie, die bis 2010 leicht wächst: von 9,9 t im Jahre 1995 bis auf ca. 12,8 t.

SF₆-Verluste beim Betreiber hängen sowohl von der Altersstruktur als auch der Größe des Anlagenbestands ab.

Für die Folgen der Altersstruktur des Anlagenbestands auf die Undichtheits-Verluste ist die VDEW-Studie aus dem Jahre 1996 aufschlußreich. Im Jahre 1995 betrug die Nachfüllmengen für SF₆-isolierte Schaltanlagen der Baujahre 1980 und früher fast die Hälfte der gesamten Nachfüllmenge, obwohl der Anteil dieser Altanlagen am SF₆-Gesamtbestand bei unter 20% lag. "Dies entspricht einer jährlichen Nachfüllrate von 2,2%.

Die Nachfüllmengen für SF₆-isolierte Schaltanlagen der Baujahre 1980 und später lagen deutlich niedriger. Diese Komponenten erreichten jährliche Nachfüllraten zwischen 0,3% und 0,6%." (VDEW 1996) Die Dichtigkeit der Anlagen der zweiten und dritten Generation ist gestiegen. Was die seit 1996 wachstumsträchtigen Mittelspannungsanlagen betrifft, so werden ihre jährlichen Betriebsemissionen noch geringer als diejenigen moderner Hochspannungsanlagen kalkuliert (ABB 1999).

Halten die gegenwärtigen Nutzungstrends an, dann wächst der inländische Gesamtbestand zwischen 1996 und 2010 jährlich netto um ca. 50 t. Das führt bis 2010 zu einer Vermehrung um 750 t auf 1850 t - gegenüber 1100 t von 1995.

Für die Betriebsemissionen ist die Zusammensetzung der jährlichen Bestände nach Anlagenbaujahren entscheidend:

- Für die Neugeräte, die zwischen 1996 und 2010 den inländischen Bestand um 750 t vermehren, wird eine jährliche Rate der Betreiberemissionen (leakage- und wartungsbedingte Verluste) von 0,4% unterstellt.
- Anlagen und Geräte aus den Baujahren 1980 bis 1995 stehen laut VDEW 1996 mit einer Füllmenge von insgesamt 900 t bei öffentlichen Stromversorgern, Industrie und Bahn. Für sie wird eine Jahres-Emissionsrate von 0,6% angenommen.
- Anlagen und Geräte der Baujahre vor 1980 sind im Bestand mit 200 t vertreten und weisen eine jährliche Emissionsrate von 2,2% auf.

Daraus ergeben sich für die Stichjahre 2000, 2005 und 2010 die wachsenden Werte für Bestände und Emissionen bei den Betreibern lt. Tabelle 40:

Tab. 40: SF₆-Emissionen bei Betreibern elektrischer Betriebsmittel 1995-2010 in t/a nach Anlagenalter (Prognose)						
	2000		2005		2010	
Anlagenbaujahre	Bestand	Emission	Bestand	Emission	Bestand	Emission
vor 1980 <i>ER: 2,2%</i>	200 t	4,4 t	200 t	4,4 t	200 t	4,4 t
1980-95 <i>ER: 0,6%</i>	900 t	5,4 t	900 t	5,4 t	900 t	5,4 t
1996 ff. <i>ER: 0,4%</i>	250 t	1,0 t	500 t	2,0 t	750 t	3,0 t
Summe	1350 t	10,8 t	1600 t	11,8 t	1850 t	12,8 t

ER = jährliche Emissionsrate auf den Bestand.

4.4 Summe von Hersteller- und Betreiberemissionen bis 2010

Tabelle 41 und Diagramm 24 zeigen: Von 1995 bis 2010 erhöht sich die jährliche Summe der inländischen Hersteller- und Betreiberemissionen um ca. 3 t - auf knapp 30 t (rechnerisch: 29,3 t). Die Herstelleremissionen im Werk und bei der Montage bleiben stabil und betragen im Zeitraum 2000 bis 2010 jeweils 15 bzw. 1,5 t.

Anzumerken ist, daß aufgrund der hohen Exportquote der deutschen Schaltanlagenhersteller die Werksverluste mehrheitlich durch Anlagen bedingt sind, die für den Export produziert werden.

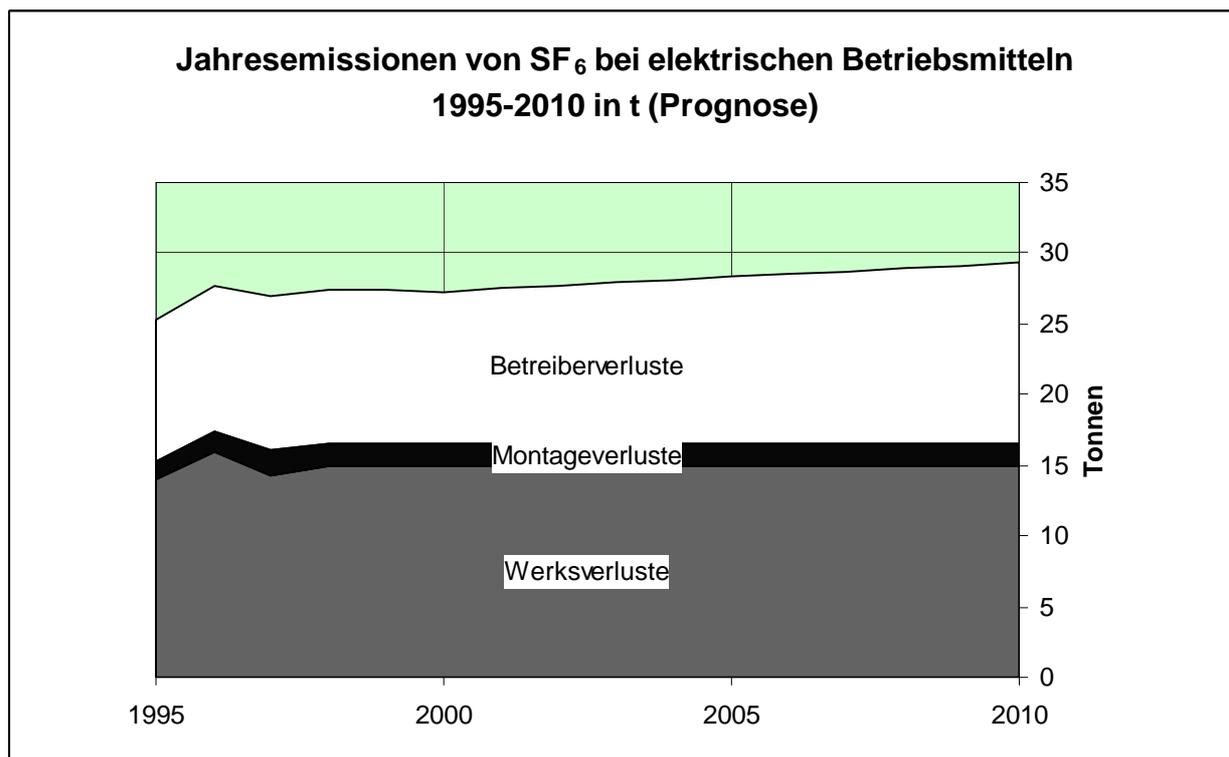


Diagramm 24: Jahresemissionen von SF₆ bei elektrischen Betriebsmitteln 1995-2010 in t (Prognose). Bei konstanten Herstelleremissionen (15 t Werks- und 1,5 t Montageverluste) nehmen die Betreiberemissionen leicht zu. Das niedrige Wachstum kommt daher, daß die neu installierten Anlagen nur geringe jährliche Emissionsraten (0,4%) aufweisen. Der Ersatz der emissionsträchtigen Altanlagen (2,2% Emissionsrate) setzt nach 2010 ein. Dann erst sinken die laufenden Betreiberemissionen zehn Jahre lang. Es treten allerdings Emissionen bei der Verschrottung auf - im Diagramm wegen des Zeitrahmens 2010 nicht mehr eingetragen.

Die Zunahme der Gesamtemissionen geht von den Betreiberemissionen aus. Bei diesen handelt es sich noch nicht um Verschrottungsemissionen, sondern um leakage- und wartungsbedingte Gasverluste aus dem laufenden Betrieb. Da die neu, d.h. ab 1996 installierten Betriebsmittel emissionsdichter sind als diejenigen früherer Baujahre, ist der absolute Umfang der Emissionszunahme relativ niedrig.

Tab. 41: Gesamte Jahresemissionen von SF₆ bei Betriebsmitteln zur Stromversorgung 1995-2010 (Prognose)				
	1995	2000	2005	2010
Werksverluste in t	14,0	15,0	15,0	15,0
Montageverluste in t	1,3	1,5	1,5	1,5
Betreiberverluste in t	9,9	10,8	11,8	12,8
Summe in t	25,2	27,3	28,3	29,3
<i>Mio. t CO₂-Äquivalente</i>	<i>0,602</i>	<i>0,652</i>	<i>0,676</i>	<i>0,700</i>

Die gesamten SF₆-Emissionen durch Herstellung und Betrieb elektrischer Betriebsmittel steigen lt. Tabelle 41 von 25,2 t im Jahr 1995 bis auf 29,3 t im Jahr 2010.

Der Beitrag zum Treibhauseffekt durch diese Emissionen erhöht sich zwischen 1995 und 2010 von 0,6 auf 0,7 Mio. t CO₂-Äquivalente (vgl. Tabelle 41).

5 Zur Vermeidung von Verschrottungsemissionen nach 2010

Aufgrund der langen Lebensdauer regulär gewarteter Anlagen erfolgt die jahrgangswise Außerbetriebnahme der ersten Gerätegeneration nach 2010. Bis dahin kommen Verschrottungen und damit verbundene Emissionen nur in Sonderfällen vor, wenn etwa ganze Geräte und Anlagen durch äußere Einwirkungen zerstört werden. Im Falle der ab 2010 in großem Maßstab vorzunehmenden Ausmusterung verschlissener SF₆-befüllter Anlagen ist es unbedingt erforderlich, das Füllgas vor der Anlagenverschrottung abzusaugen. Es kann dann vor Ort oder beim Anlagenbauer mit gängigen Servicegeräten zwecks Wiederbefüllung regeneriert werden. Sofern es zu sehr verunreinigt ist, ist eine stofflicher Aufarbeitung beim Gasehersteller möglich.

Die Elektrotechnik ist bisher die einzige SF₆-Anwendung, für die ein Konzept zur Wiederverwertung von genutztem SF₆-Gas entwickelt wurde. Es stammt vom SF₆-Hersteller Solvay Fluor und Derivate GmbH in Zusammenarbeit mit der DILLO Armaturen und Anlagen GmbH (Wartungs- und Meßgeräte für SF₆) und sieht neben dem Vor-Ort-Recycling durch Wartungsgeräte die Aufarbeitung genutzten Gases durch den SF₆-Hersteller (z.B. Solvay) vor, der gebrauchtes Gas zu "Neugas regeneriert", das "in allen Punkten der DIN IEC 376 für Neugas" entspricht (Solvay 1996). SF₆, welches nicht wiederverwendet werden kann, wird der Entsorgung zugeführt.

Die beiden Betreiber- und Herstellerverbände VDEW und ZVEI haben sich in einer "Erklärung zur Verwendung von SF₆ im Bereich elektrischer Schaltgeräte und -anlagen in Deutschland" 1996 zu dieser Art der Emissionsbegrenzung verpflichtet. (VDEW/ZVEI 1996)

Das Wiederverwertungskonzept soll bei der ab 2010 in größerem Maßstab einsetzenden Anlagenverschrottung garantieren, daß die SF₆-Füllungen von jährlich über 50 t mit möglichst niedrigen Rückgewinnungsverlusten aufgefangen und der stofflichen Aufarbeitung bzw. Entsorgung zugeführt werden.

2 Schallschutzscheiben

Schallschutzscheiben sind nach elektrischen Betriebsmitteln zweitgrößter Verbraucher von SF_6 und sind - auch langfristig - weitaus größter Emittent.

1 SF_6 als Schalldämmgas

Bei Mehrscheiben-Isolierglas, das sich in den siebziger Jahren gegen Einfachverglasung bei Fenstern und Glasfassaden durchgesetzt hatte, wird SF_6 seit 1975 zur Erhöhung der Schalldämmung in den Scheibenzwischenraum gefüllt. Gegenüber Scheiben mit Luft- oder Edelgas-Füllung reduziert SF_6 die Schallwirkung im "bauakustisch festgelegten Frequenzbereich" um 2-4 dB (Koch 1998). Ca. 5 dB werden als Geräuschhalbierung empfunden (Schumacher 1999).

Die Schalldämmung resultiert aus der verminderten Schallgeschwindigkeit, die in SF_6 nur 130 m/s gegenüber 330 m/s in Luft beträgt (Holler 1995, 82). In erster Näherung sinkt die Schallgeschwindigkeit proportional zur Quadratwurzel aus dem Molekulargewicht eines Gases (Derner 1992, 60). SF_6 als sehr schweres Gas ist darum für Schalldämmung geeignet - jedoch nicht für Wärmedämmung. Letztere ist gegenüber Luft schlechter (Huntebrinker 1995, 43). Als Gas für die Wärmedämmung dient Argon.

Funktionsfähigkeit und Lebensdauer aller Isolierglasscheiben hängen entscheidend von der Gasdichtheit des sog. Randverbundes ab. Die Versiegelung des Scheibenaußenrands muß sowohl Gasverluste nach außen als auch Eindringen von Wasserdampf nach innen möglichst lange verhindern: Der äußere Rand zweier Glasscheiben ist über die gesamte Kantenlänge beidseitig an eine mit Klebstoff beschichtete Metallschiene (Abstandshalter) gepreßt und rundum mit Dichtmasse versiegelt. Als Klebstoff dient Polyisobutylen, als Dichtmasse Polysulfid.

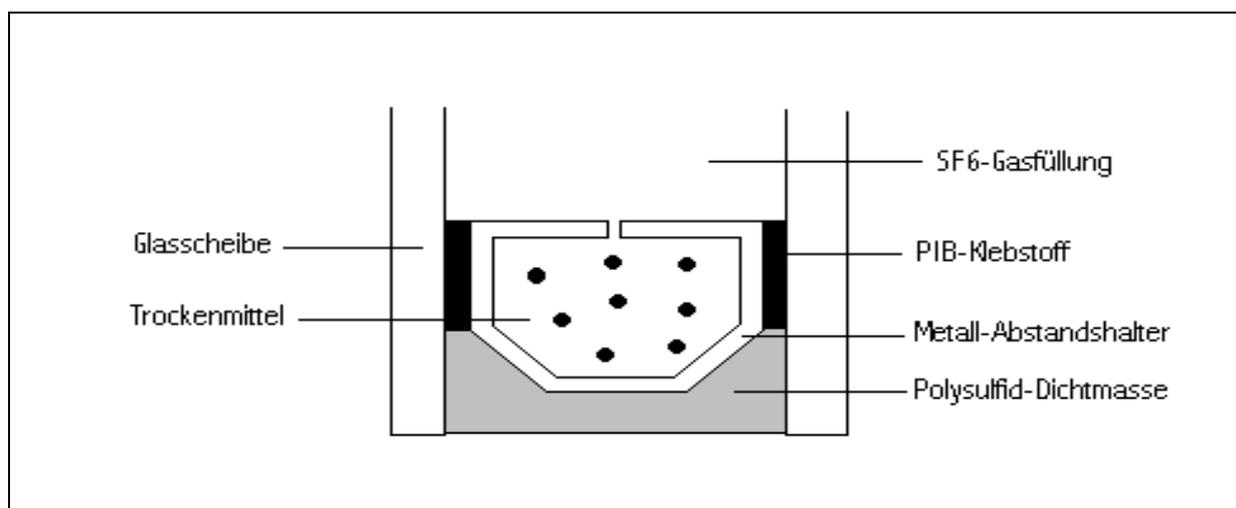


Abb. 2: Randverbund von Mehrscheiben-Isolierglas mit SF_6 -Füllung zum erhöhten Schallschutz. Der metallische Abstandshalter rund um die Kantenlänge der Scheiben ist mit einer Polysulfid-Masse gegen Diffusionen nach innen und außen abgedichtet. Das Trockenmittel saugt eindiffundierte Luftfeuchte 20 bis 30 Jahre lang auf. (Zeichnung nach Holler 1995, 69.)

Der Abstandshalter hat zum inneren Druckausgleich einen Diffusionsspalt und enthält ein Trockenmittel zur Bindung von eindiffundiertem Wasserdampf. Siehe Abb. 2.

Die Haltbarkeit des Isolierglases hängt vornehmlich von der organischen Kleb- und Dichtmasse ab, und zwar von ihrer Belastung durch Bewitterung und UV/IR-Bestrahlung mit nachfolgender Rißbildung sowie durch eindringenden Wasserdampf aus feuchtem Fensterrahmenmaterial (PVC, Aluminium, Holz), in das die abgedichtete Glasscheibe eingefügt ist. Die normale Lebensdauer von Isolierglasscheiben beträgt je nach geographisch-klimatischer Lage ihres Einbauorts zwischen 15 und 30 Jahren (Befragung Schallschutzglas). Wichtigster begrenzender Faktor ist die Diffusion von Wasserdampf, die allmählich die Bindungskapazität des Trockenmittels übersteigt, zum Feuchteausgleich im Scheibenzwischenraum und damit zu Kondensationsbeschlag ("Erblindung") bei tieferen Temperaturen führt (Holler 1995, 92).

2 Inlands-Verbrauch und -Emissionen 1995-1998

Wegen der Liefernähe zum Fenster- und Glasfassadenbau erfolgt die Herstellung von Isolierglasscheiben aus industriell gefertigten Basisgläsern dezentral und kleinbetrieblich. Die Zahl der Herstellerbetriebe wird auf 300 bis 400 geschätzt. Außenhandel mit Isolierglas ist unbedeutend (Befragung Schallschutzglas).

2.1 SF₆-Verbrauch 1995-1998

Im Durchschnitt der Jahre 1995-1998 wurden in Deutschland ca. 36 Mio. qm Isolierglas hergestellt, wovon ca. 2,6 Mio. qm SF₆-haltige Schallschutzscheiben waren. Der durchschnittliche Scheibenzwischenraum hat sich seit 1975, dem Jahr der ersten SF₆-Befüllungen, vergrößert, und zwar von 12 auf 16 Millimeter. Daraus ergibt sich für 1995-1998 ein Gasfüllvolumen der Schallschutzscheiben von rd. 42 Mio. Liter.

Zur Ermittlung der dafür erforderlichen SF₆-Menge sind zwei Punkte zu beachten:

Erstens beträgt der Füllgrad des Scheibenzwischenraums mit Gas im Durchschnitt nur 90%, da 10% Restluft beim Befüllvorgang kaum zu eliminieren sind.

Zweitens: Der Anteil von SF₆ am eingefüllten Gas sinkt. Bis Mitte der 80er Jahre wurden Scheiben ausschließlich mit SF₆ befüllt. Seitdem stiegen die Auflagen an den Wärmeschutz (3. Wärmeschutzverordnung 1994). Darum gelangen auch in Schallschutzscheiben zunehmend Mischungen aus Argon und SF₆. Der mittlere Anteil von SF₆ gegenüber Argon in Schallschutzscheiben sank zwischen 1995 und 1998 von 75% auf 33%. Bereits 1999 dürfte sich als längerfristiger Kompromiß zwischen Schall- und Wärmeschutz die Gaszusammensetzung 30% SF₆/70% Argon etabliert haben.

Der 1995-1998 erfolgte Rückgang des spezifischen SF₆-Anteils in der Gasfüllung von 75% auf 33% hatte gravierende Auswirkungen auf den jährlichen Gesamtverbrauch (vom Gasehandel verkaufte Menge), wie er in Tabelle 42 dargestellt wird.

Der Jahresverbrauch sank zwischen 1995 und 1998 von 277 auf 121 t - um 56%.

Tab. 42: SF₆-Verbrauch für Schallschutzscheiben in Tonnen 1995 -1998				
	1995	1996	1997	1998
SF ₆ -Verbrauch in t	277	205	169	121

Quelle: Befragung Gasehandel 1999.

2.2 SF₆-Emissionen 1995-1998

Die SF₆-Emissionen aus Schallschutzscheiben setzen sich aus drei unterschiedlichen Kategorien zusammen, deren quantitative Bedeutung sich im Zeitverlauf ändert. Befüllungsverluste fallen ausschließlich im Fertigungsjahr an und sind direkt dem jährlichen SF₆-Verbrauch proportional. Bestandsemissionen sind die Gasverluste aus der befüllten Scheibe während ihrer gesamten Lebensdauer, die im Durchschnitt 25 Jahre beträgt. Die Emissionen der dritten Kategorie, die Entsorgungsverluste, fallen erst am Ende der Nutzungsphase der Scheiben an - 25 Jahre nach den Befüllungsemissionen.

2.2.1 Befüllungsverluste (Überfüllung)

Vom jährlichen SF₆-Verbrauch für Schallschutzscheiben fallen 33% als Befüllungsemissionen im Herstellungsjahr an. Sowohl bei Handgeräten als auch bei automatischen Gasfüllpressen sind Verwirbelungen im Innenraum unvermeidlich, so daß nicht nur Restluft, sondern auch ein Luft-SF₆-Gemisch austritt, und zwar umso mehr, je weiter fortgeschritten der Befüllungsvorgang ist. Der Gasverlust, die sog. Überfüllung, reicht von 30 bis 60% der Einfüllmenge. Im Durchschnitt, so ergibt eine Befragung der führenden Hersteller von Isolierglas bzw. von Gasfüllgeräten, beträgt die Überfüllung 50% auf die effektiv eingefüllte Menge (Befragung Schallschutzglas). Letztere beträgt, wie bereits bemerkt, nur 90% des Scheibenzwischenraums.

2.2.2 Bestandsemissionen

Die Bestandsemissionen werden in dieser Studie mit jährlich 1% angesetzt. Darin sind laufende Gasverluste durch die Randabdichtung hindurch ebenso enthalten wie Gasverluste durch Glasbruch vor und während der Nutzung. Für Gasverluste während der Nutzungsphase schreibt eine DIN-Norm eine Obergrenze von 1 bis 1,2 Prozent vor (DIN 1286, T 2). Laut einstimmiger Aussage aller befragten Experten liegt der reale SF₆-Gasverlust bei intaktem Glas unter diesem zulässigen Höchstwert (Befragung Schallschutzglas). Es kommen jedoch Gasverluste durch Glasbruch hinzu, der beim Transport, beim Einbau und während der 20- bis 30-jährigen Nutzungsphase eintreten kann.

2.2.3 Entsorgungsverluste

Während für SF₆ in elektrischen Betriebsmitteln ein Wiederaufarbeitungskonzept für die Entsorgung der befüllten Anlagen in der Einführung ist, gibt es Recycling im Bereich Schallschutzscheiben lediglich für das Rahmenmaterial PVC und Aluminium sowie partiell für das Glas (Koos 1996; Brüggemann 1996). Ein Konzept für SF₆-Rückgewinnung aus gebrauchten Glasscheiben ist nicht vorgesehen und wird für technisch undurchführbar gehalten (Koch 1999; Schumacher 1999). Daher ist damit zu rechnen, daß nach Ende der Lebensdauer der Schallschutzscheiben oder der Fensterrahmen das Füllgas in die Atmosphäre entweicht. Es handelt sich um große Emissionsmengen, da von der ursprünglichen SF₆-Befüllung lediglich die jährlich 1% betragenden Bestandsverluste während der 25-jährigen Lebensdauer fehlen, mithin noch ca. 78% vorhanden sind.

Da der Einbau der ersten SF₆-Schallschutzscheiben 1975 erfolgte, ist ab 2000 mit ersten jahrgangsweisen Entsorgungen und begleitenden Gasverlusten zu rechnen, die danach von Jahr zu Jahr bis zum Höhepunkt im Jahr 2020 (142 t) zunehmen.

2.2.4 Menge und Zusammensetzung der Emissionen 1995-1998

Aus Tabelle 43 geht hervor, daß die Gesamtemissionen 1995-1998 sanken, und zwar von 108 auf 60 t. Dieser Rückgang resultiert ausschließlich aus sinkenden Befüllungsverlusten (Zeile 1), die sich proportional zum - rückläufigen - Verbrauch des betreffenden Jahres entwickeln. Die Bestandsemissionen (Zeile 2) nehmen stetig, aber langsam zu. Entsorgungsverluste (Zeile 3) setzen erst im Jahr 2000 ein.

Tab. 43: SF₆-Emissionen aus Schallschutzscheiben in t/a und nach Beitrag zum Treibhauseffekt 1995-1998				
	1995	1996	1997	1998
1. Befüllungsverluste*	92	67	57	40
2. Bestandsverluste**	16	18	19	20
3. Entsorgungsverluste***	-	-	-	-
Gesamtemissionen	108	85	75	60
<i>Emiss. in Mio. t CO₂-Äquiv.</i>	<i>2,57</i>	<i>2,02</i>	<i>1,80</i>	<i>1,43</i>

* = 33% vom Verbrauch des betreffenden Jahres. ** = 1% vom seit 1975 akkumulierten Bestand. *** Entsorgungsverluste erst ab 2000.

Der Beitrag zum Treibhauseffekt durch die Gesamtemissionen sank 1995-1998 von 2,57 auf 1,43 Mio. t CO₂-Äquivalente.

Der Emissionsrückgang der Jahre 1995 bis 1998 ist nur vorübergehend. Wegen der Entsorgungsverluste werden die Gesamtemissionen künftig wieder steigen, selbst wenn ab sofort kein SF₆ mehr neu eingesetzt werden würde.

3 BaU-Emissionsprognose bis 2010 - Szenario I

Im Szenario I gilt, daß bis 2010 die jährlich neuproduzierten Schallschutzscheiben 2,6 Millionen Quadratmeter bzw. 6-7% sämtlicher Isolierglasscheiben bilden. Außerdem gilt:

1. In kombinierten Wärme- und Schallschutzscheiben beträgt die Gasrelation SF₆ zu Argon ab 1999 mittelfristig 30 zu 70. Daraus resultiert eine Konstanz der SF₆-Jahresverbräuche und der jährlichen Befüllungsemissionen bis 2010.
2. Seit 1975 liegen Daten zum jährlichen SF₆-Verbrauch vor. Daraus und aus den bis 2010 prognostizierten SF₆-Verbrauchswerten ergeben sich die akkumulierten SF₆-Bestände, aus denen jährlich 1% SF₆ entweicht.
3. Mit Zeitverzug von 25 Jahren Lebensdauer fallen bei der Fensterentsorgung Emissionen an, die nicht aufgefangen werden. Im Jahr 2000 wird der Produktionsjahrgang 1975 entsorgt, im Jahr 2001 der Jahrgang 1976 usw. Dabei ist in Rechnung zu stellen, daß sich die ursprüngliche Füllmenge um die jährlichen Bestandsemissionen von 1% pro Jahr Lebensdauer vermindert hat.

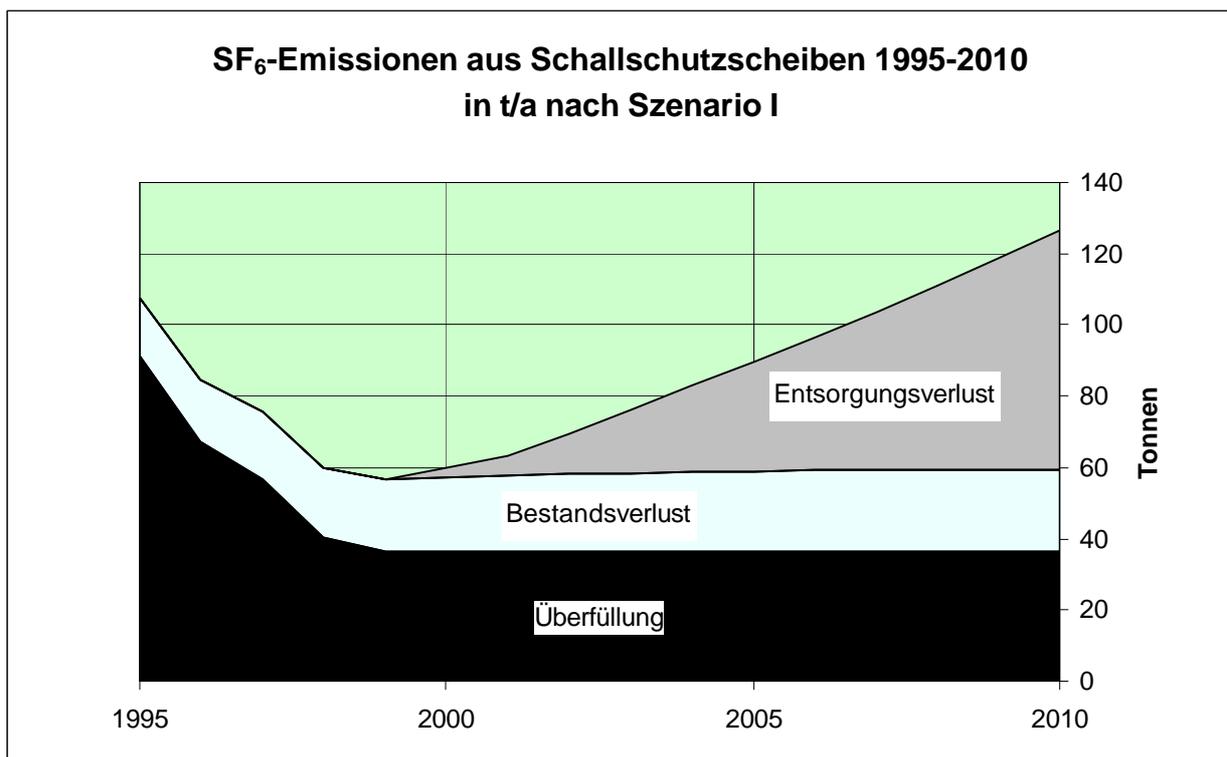


Diagramm 25: SF₆-Emissionen aus Schallschutzscheiben 1995-2010 nach Szenario I. Nach der Abnahme der Gesamtemissionen 1995-1999 bis auf 57 t infolge rückläufiger Befüllungsemissionen (schwarze Fläche) kommt es ab 2000 durch Entsorgungsverluste (graue Fläche) zu erneutem Anstieg. In 2008 wird das bisherige Rekordjahr 1995 übertroffen. In 2010 betragen die Emissionen 126 t (67 t Entsorgungsverlust + 23 t Bestandsverlust + 36 t Überfüllung).

Unter diesen Bedingungen ergeben sich für 1995 bis 2010 die Emissionen nach Diagramm 25 und Tabelle 44:

- Von 1995 bis 1999 sinken die Gesamtemissionen auf 57 t infolge der - dem rückläufigen Neuverbrauch proportionalen - Rückgänge der Befüllungsemissionen.
- Ab 2000 treten erstmals Entsorgungsverluste auf, die in der Folge zum größten Emissionsposten anwachsen, bis 2010 auf 67 t. Die Befüllungsemissionen bleiben ab 1999 voraussetzungsgemäß konstant, und zwar bei 36 t. Die Bestandsemissionen bleiben relativ stabil bei 22-23 t.
- Nach Szenario I betragen die Gesamtemissionen im Jahr 2010 rd. 126 t³.

Tab. 44: SF₆-Emissionen aus Schallschutzscheiben 1995-2010 in t/a nach BAU-Szenario I				
	1995	2000	2005	2010
1. Befüllungsverluste	92	37	37	37
2. Bestandsverluste	16	20	21	23
3. Entsorgungsverluste	-	3	31	66
Gesamtemissionen	108	60	89	126

³ Der Gipfelwert im Jahr 2020 beträgt 197 t Gesamtemissionen, davon 142 t aus der Entsorgung.

4 Relative Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II

Aufgrund der großen SF₆-Bestände in bereits verbauten Schallschutzscheiben (1998: 2000 t) ist mittelfristig eine wesentliche Emissionsentlastung ohne Rückgewinnung bei der Entsorgung unmöglich. Diese erscheint aus heutiger Sicht unrealistisch. Durch Verzicht auf SF₆ könnte allerdings der bedeutende Posten Befüllungsemissionen kurzfristig entfallen, und auch die Bestandsemissionen würden sinken.

Schalldämmung wird nicht in erster Linie durch SF₆ bewirkt, sondern durch verschiedene Glasaufbauten: vergrößerter Scheibenabstand, unterschiedliche Glasdicken, Einsatz von Gießharz-Verbundglas. Damit werden Dämmwerte von 35 bis 50 dB erzielt. SF₆ kann die Schalldämmung um zusätzliche 2-4 dB steigern, nicht aber unterschiedlich aufwendige Glasaufbauten ersetzen. (Koch 1999; Schumacher 1999)

Um SF₆ zu bewerten, ist es überaus wichtig, zwischen der an der reinen Verglasung und der am eingebauten Fenster gemessenen Schalldämmung zu unterscheiden.

Gemäß einem neuen Forschungsvorhaben durch das Institut für Fenstertechnik (i.f.t.) in Rosenheim ist zwar "das bewertete Schalldämmmaß von Verglasungen mit anteiliger SF₆-Füllung um ca. 4 dB höher als bei Argon-gefüllten Scheiben mit gleicher Konstruktion." Anders jedoch bei Fenstern: "Das bewertete Schalldämmmaß bei Fenstern wird durch Verglasungen mit SF₆-Anteil um ca. 1 dB verbessert. ... Es gab auch Konstruktionen, bei denen sich die Schalldämmung um 1 dB verringerte." (i.f.t. 1999).

Das i.f.t. folgert daraus: "Die Ergebnisse lassen eine Diskussion um den Sinn des Einsatzes von SF₆ sinnvoll erscheinen in der Weise, SF₆ als Füllgas aus dem Markt zurückzuziehen" (a.a.O.). Denn: "Die Minderung der Schalldämmung von Fenstern mit Isolierverglasungen durch den Einsatz von SF₆ bzw. SF₆-Gemischen kann kompensiert werden durch eine Erhöhung der Scheibendicke oder durch Vergrößerung des Scheibenzwischenraums um ca. 2-4 mm".⁴

SF₆ erhöht die schalldämmenden Wirkungen von Glasdicke, Glassorte und Scheibenabstand am unverbauten Glas um maximal 4 dB, aber am eingebauten Fenster nur um 1 dB. Dazu kommt als zusätzlicher Gesichtspunkt der eingeschränkte Frequenzbereich, in dem SF₆ dämmend wirkt. Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik weist darauf hin: Das "bewertete Schalldämm-Maß" nach DIN 52210 vom August 1984 gewichtet tiefe Frequenzen, bei denen der innerstädtische Verkehrslärm seine höchsten Pegelanteile hat weniger, als es nunmehr nach der europäischen DIN EN ISO 717, Teil 1 geschieht (Koch 1998). SF₆ hat einen "ausgeprägten Resonanzeinbruch gerade bei tiefen Frequenzen". Nach der europäischen Norm-Anpassung, welche die tiefen Frequenzen (< 300 Hz) im Schalldämm-Maß stärker gewichtet, bringt SF₆ keine Vorteile gegenüber Argon mehr. Das ist der Kern der Aussage, daß die Beimischung von SF₆ zu Argon "zu Werten führt, die von der Art der Gasfüllung unabhängig sind" (Koch 1998).

Mehrere Anbieter von Isolierglasscheiben (u.a. Glas-Trösch) und von Fenstersystemen (u.a. Unilux) verwenden für Schallschutzscheiben seit 1992 bzw. 1996 kein SF₆ mehr.

⁴ Daraus resultierende Mehrkosten der Isolierglasscheibe um ev. 20-30% schlagen sich bei den Kosten des fertigen Fensters (einschließlich Rahmen, Beschläge usw.) nur mit einem Zuwachs von maximal 5% nieder, weil auf die Scheiben nur ca. 10 bis 20% der Fensterkosten entfallen. (Eschbacher 1999)

In Szenario II wird angenommen, daß SF₆ schrittweise bis 2005 nicht mehr für neue Schallschutzscheiben benutzt wird. Die veränderten Emissionen sind in Diagramm 26 und Tabelle 45 eingetragen.

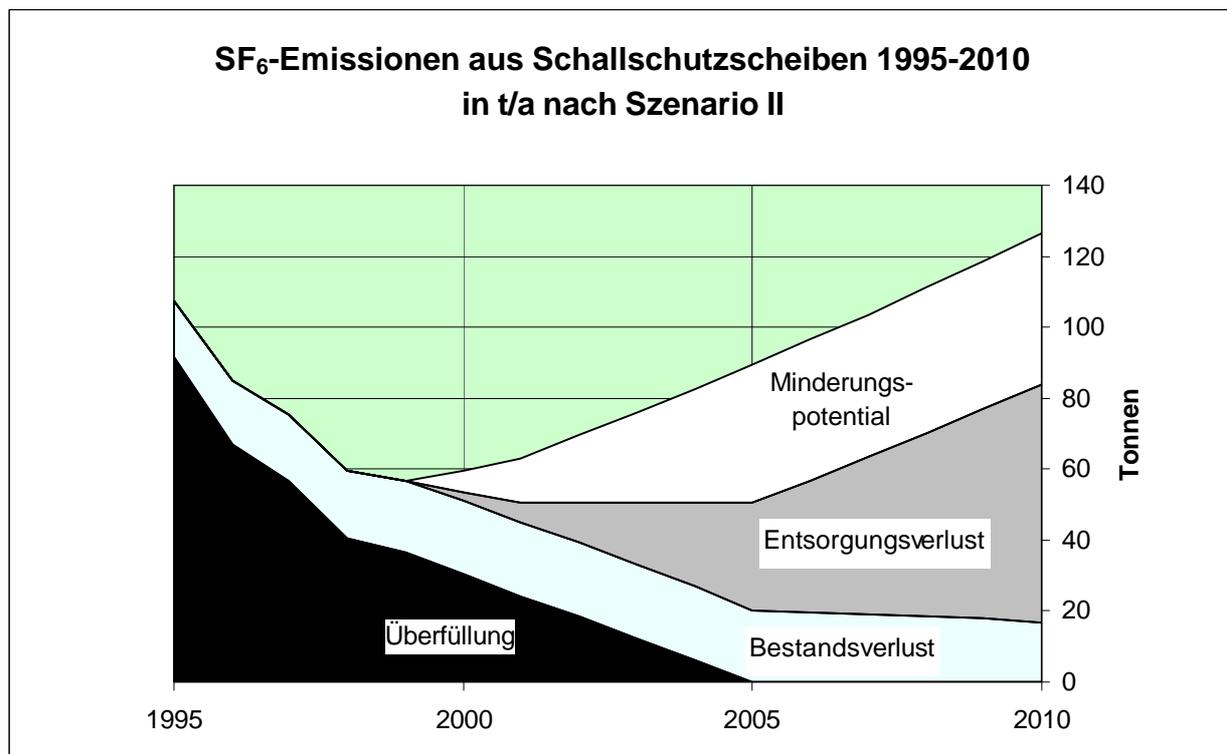


Diagramm 26: SF₆-Emissionen aus Schallschutzscheiben 1995-2010 in t/a nach Szenario II. Der Hauptunterschied zu Szenario I ist der Rückgang der Überfüllung (schwarze Fläche) auf Null im Jahr 2005. Dieses Minderungspotential (Differenz zu Szenario I) bei den Gesamtemissionen (oberste weiße Fläche), beträgt im Jahr 2010 bereits 42 t.

- Die Befüllungsemissionen (schwarze Fläche) sinken 1995-2005 von 92 t auf Null.
- Die Bestandsverluste gehen ab 2000 (20 t) leicht zurück bis auf 17 t in 2010. Im Szenario I waren sie im gleichen Zeitraum von 20 t auf 23 t gestiegen.
- Die Entsorgungsverluste verlaufen wie in Szenario I. Sie steigen von 3 t im Jahr 2000 bis auf 66 t im Jahr 2010 und bilden dann die Masse der Gesamtemissionen.
- Die Gesamtemissionen steigen nicht wie im Szenario I bis 2010 auf 126 t, sondern - vor allem wegen des Wegfalls der Befüllungsemissionen - nur auf 84 t.
- Die Entlastung bei den Gesamtemissionen gegenüber Szenario I (in Diagramm 26 oberste weiße Fläche) steigt von 2000 bis 2010 von 3 t auf 42 t.

Tab. 45: SF₆-Emissionen aus Schallschutzscheiben 1995-2010 in t nach Szenario II				
	1995	2000	2005	2010
1. Befüllungsverluste	92	31	0	0
2. Bestandsverluste	16	20	20	17
3. Entsorgungsverluste	-	3	31	66
Gesamtemissionen	108	54	51	84
<i>Minderungspotential (II zu I)</i>	0	6	39	42

5 Beitrag zum Treibhauseffekt im Vergleich der Szenarien I und II

Der Hauptunterschied von Szenario II gegenüber Szenario I besteht in der schrittweisen Einstellung der SF₆-Befüllung bis 2005. Durch diese Maßnahme sinken die Befüllungsverluste unmittelbar und mittelfristig auch die Bestandsverluste. Da allerdings die Entsorgungsverluste bis 2020 unverändert weiterwachsen, ist die Differenz bei den Gesamtemissionen zwischen beiden Szenarien begrenzt.

Nach Beitrag zum Treibhauseffekt durch die Gesamtemissionen ergeben sich die Werte der Tabelle 46 und des Diagramms 27:

Tab. 46: SF ₆ -Emissionen aus Schallschutzscheiben 1995-2010 - Szenario I und II in Mio. t CO ₂ -Äquivalente				
	1995	2000	2005	2010
Szenario I	2,57	1,43	2,14	3,02
Szenario II	2,57	1,28	1,21	2,01

Im Jahr 2000, dem ersten Jahr der schrittweisen Rückführung der SF₆-Befüllung, beträgt die Emissionsminderung durch Szenario II gegenüber Szenario I erst 0,15 Mio. t CO₂-Äquivalente. Sie steigt bis 2010 auf ca. 1 Mio. t an, wenn nach Szenario I rd. 3 Mio. und nach Szenario II ca. 2 Mio. t CO₂-Äquivalente aus Schallschutzscheiben emittieren.

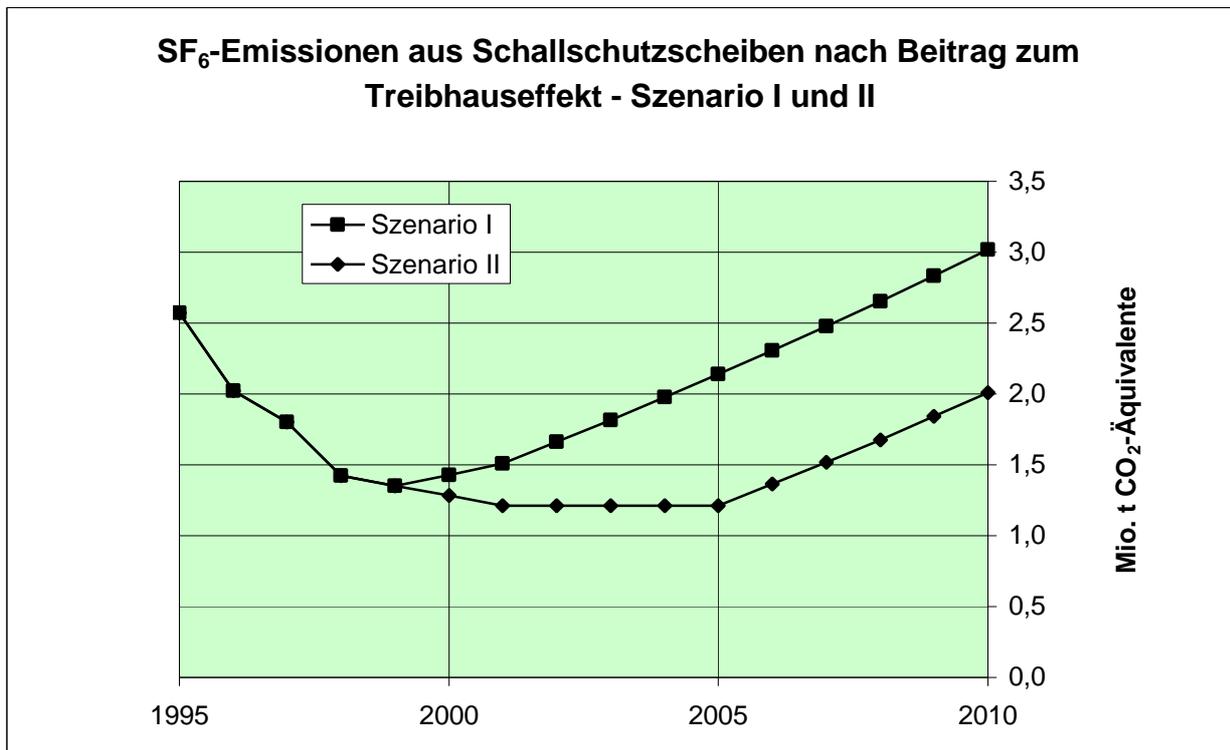


Diagramm 27: SF₆-Emissionen aus Schallschutzscheiben nach Beitrag zum Treibhauseffekt - Szenario I und II. Ab 1999, dem ersten Jahr der Rückführung der SF₆-Befüllung bis auf Null, trennen sich Emissionswerte beider Szenarien. Nach Szenario I beträgt der Beitrag zum Treibhauseffekt im Jahr 2010 über 3,0 Mio. t CO₂-Äquivalente, nach Szenario II nur 2,0 Mio. t.

3 Autoreifen

Autoreifen waren 1995 nach Schaltanlagen und Schallschuttscheiben der drittgrößte Verbraucher von SF₆. Sie sind der größte Emittent bis 1998. Ab 1999 nehmen die SF₆-Emissionen aus dieser Anwendung deutlich ab, sowohl in der Emissionsprognose nach Szenario I als auch II. Mit dreijährigem Zeitverzug, bei der Demontage der abgenutzten Reifen, entweicht das SF₆ ungehindert in die Atmosphäre. Bei dieser Anwendung steht der Nutzen in einem so großem Mißverhältnis zum ökologischen Schaden, daß ihre Fortsetzung höchst problematisch ist.

1 Erhöhte Druckstabilität dank SF₆

Seit 1984 können Autofahrer in Deutschland ihre Reifen mit SF₆ statt mit Luft befüllen lassen. Die Füllmenge pro Reifen beträgt 250-350 Gramm, pro Reifensatz über 1 kg. Die im Vergleich zur Luft größeren SF₆-Moleküle diffundieren wesentlich langsamer durch den Gummi. Der Erfinder von SF₆ als Reifenfüllgas (Continental AG) versprach daher "stabilen Reifendruck für 1 Jahr und länger" (Continental o.J.).

Konstanter korrekter Reifendruck trägt zu mehr Fahrsicherheit, geringerem Reifenverschleiß und niedrigerem Kraftstoffverbrauch bei. Mit Druckabweichungen vom Sollwert sind lt. Continental "über die Hälfte der Autofahrer" unterwegs (ebd.). Das als "Air Safe" angebotene System kann Abweichungen vom korrekten Fülldruck nach oben und unten nahezu für die ganze Nutzungsdauer eines Reifens verhindern, sofern ihn keine mechanischen Beschädigungen, defekte Felgen oder Ventile undicht machen.

Gerade hierin liegt das Problem. Die SF₆-Befüllung kann in der Praxis eine Vernachlässigung regelmäßiger Druckinspektion (durch Ansetzen des Meßgerätes an die Ventile) begünstigen. Neben sicherheitstechnischen gibt es auch erhebliche ökologische Bedenken: Mit dreijährigem Zeitverzug nach der Befüllung wird bei der Demontage der abgenutzten Reifen das gespeicherte SF₆ ungehindert und vollständig in die Atmosphäre freigesetzt.

2 Inlands-Verbrauch und -Emissionen 1995-1998

Im Spitzenverbrauchsyear 1995 bestand bei über 500 der rd. 3500 Verkaufsstellen des deutschen Reifenfachhandels die Möglichkeit, die Reifen mit SF₆-Gas zu befüllen. Die Reifenhändler mit SF₆ im Angebot gehörten zu verschiedenen Handelsketten bzw. Kooperationen, die vom Gasehandel versorgt wurden. Der inländische SF₆-Verbrauch für Autoreifen stieg von 1992 bis 1995 von 110 auf 125 t (Befragung Gasehandel). Mit 125 t SF₆ konnten über 100 000 Reifensätze befüllt werden. Das entspricht 0,25% des inländischen Pkw-Bestands.

Die Emissionen folgen dem Verbrauch im Abstand von ca. 3 Jahren. Bei einer durchschnittlichen Pkw-Fahrleistung von jährlich 15 000 km und einer mittleren Reifenlaufzeit von 50 000 km steht ein Reifenwechsel im Turnus von drei Jahren an (Continental 1996a). Beim Reifenwechsel entweicht das Füllgas vollständig, ob SF₆ oder Luft. Die SF₆-Verbräuche des Jahres 1992 sind daher die Emissionen des Jahres 1995, und 1998 emittiert, was 1995 eingefüllt wurde usw. (vgl. Diagramm 28 und Datentabelle)

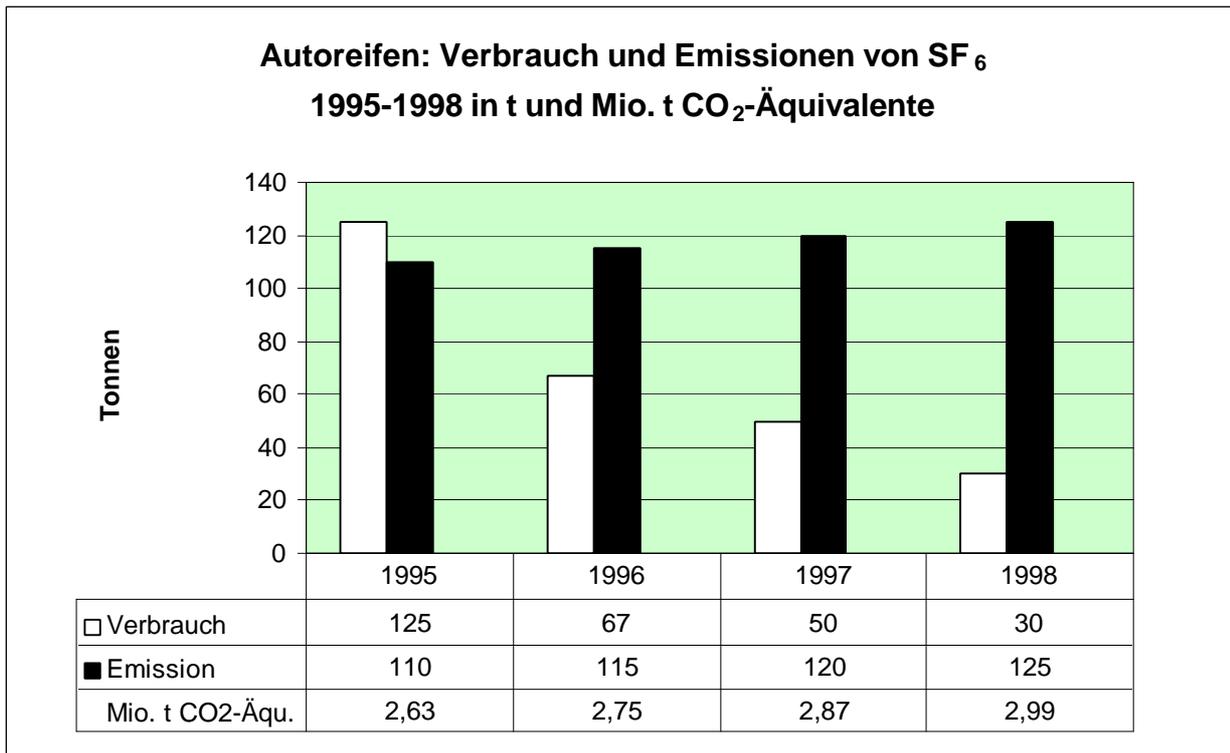


Diagramm 28: Autoreifen: Verbrauch und Emissionen von SF₆ 1995-1998 in Tonnen. Die jährlichen Verbräuche (weiße Säulen) sanken zwar 1995-1998 von 125 auf 30 t. Infolge dreijährigen Zeitverzugs stiegen im gleichen Zeitraum die Emissionen (schwarze Säulen) aber noch an. Die Emissionen von 1998 waren die Verbräuche von 1995. Nach Beitrag zum Treibhauseffekt (3. Zeile der Tabelle) betragen die 1998er Emissionen 2,99 Mio. t CO₂-Äquivalente.

Diagramm 28 und die dazugehörige Datentabelle zeigen einen klaren Trend. Die Verbräuche (im Diagramm linke, weiße Säulen) vermindern sich von 1995 bis auf 1998 von 125 auf 30 t. Wegen des dreijährigen Zeitverzugs steigen die Emissionen jedoch zwischen 1995 und 1998 noch an: von 110 t bis auf 125 t. (Die 125 t Emissionen des Jahres 1998 sind identisch mit den 125 t Verbrauch des Jahres 1995).

Die Emissionen, ausgedrückt in Mio. t CO₂-Äquivalente, stiegen von 1995 bis 1998 von 2,63 auf 2,99 Mio. t (Datentabelle von Diagramm 28).

Die Entwicklung für die drei Jahre nach 1998 ist vorgezeichnet: Die Emissionen sinken bis 2001 auf 30 t. Das ist der Verbrauchswert des Jahres 1998.

3 Sicherheits- und ökologische Bedenken gegen SF₆ im Reifen

Im Jahre 1996 setzte ein Rückgang der Reifenbefüllung mit SF₆ ein. Mitte 1996 stellte Continental die Direktbelieferung des Reifenhändlers mit SF₆ ein. Das Unternehmen überließ es aber den Reifenhändlern, Kundenwünsche nach SF₆ weiter zu befriedigen, allerdings nicht mehr unter der Marke "Conti Air Safe" (Glück 1999). Die Gasversorgung übernahm der allgemeine Gasehandel. Bis 1998 verzichteten weitere Ketten des Reifenhändlers, darunter Stinnes Reifendienst (Petz 1999), auf SF₆ und boten Stickstoff als Alternative an. Stickstoff statt SF₆ war seit 1996 von mehreren anderen Händlergruppen als neues Reifenfüllgas angeboten worden für diejenigen Autofahrer, die Luft als zu gewöhnlich empfinden. Mittlerweile verfügen nahezu 1000 Reifenhändler über Stickstoff-Flaschen zur Reifenbefüllung.

Sicherheitsbedenken gegen SF₆-Gas als Reifenfüllung werden durch das Verhalten der Kunden selbst genährt. Es handelt sich nicht um sogenannte Sportfahrer, die ihrem Fahrzeug überdurchschnittlich viel Aufmerksamkeit widmen. Die Hauptanwender von SF₆ schätzen Bequemlichkeit und Fahrkomfort und halten Fahrzeuge der oberen Ausstattungs- und Preiskategorie (Continental 1996a). Diese Käufergruppe wird zusätzlich durch die umlaufende Behauptung motiviert, daß SF₆ im Reifen zur Verminderung von Fahrgeräuschen und mechanischen Erschütterungen beiträgt. In der Tat berichten Kunden mit SF₆-gefüllten Reifen ihren Händlern immer wieder von einem subjektiven Gefühl erhöhten Fahrkomforts.

Die offizielle Stellungnahme der Continental AG (s. Kasten) mißt dem Objektivitätsgehalt solcher Aussagen wenig Wert bei (Continental 1996b). Möglicherweise sind psychologische Faktoren beteiligt, die den Kauf einer Ware, für die Geld ausgegeben wurde (hier 100 DM pro Fahrzeug), nachträglich begleiten.

Verbrauch und Begründung für SF₆ in Reifen

Stellungnahme der Continental AG vom 21.10.1996

1. SF₆ besitzt gegenüber Luft im Reifen eine wesentlich geringere Diffusionsrate und führt dadurch zu einer längeren zeitlichen Konstanz des Luftdrucks, was die Möglichkeit eines optimalen Rollwiderstandes und eines geringsten Abriebs ermöglicht. Das entbindet allerdings nicht von einer ständigen Luftdruckkontrolle, da bei Verletzungen von Reifen ein schleichender Druckverlust entstehen kann, der neben Sicherheitsaspekten auch die o.g. Vorteile hinfällig macht.
2. Die Kundenbehauptung "höhere Bequemlichkeit bei Verwendung von Air Safe" konnte von Versuchsfahrern auf unserem Testgelände nicht bestätigt werden. Wissenschaftliche Untersuchungen dazu wurden allerdings bei uns nicht durchgeführt.

Wegen der bekannten Wirkung von SF₆ auf den Treibhauseffekt im Vergleich zu den o.g. Vorteilen hat Continental den Vertrieb von SF₆ eingestellt. Wir haben es allerdings unseren Handelsgesellschaften freigestellt, Kundenwünsche auch weiterhin zu erfüllen.

Die ökologische Kritik an der Reifenfüllung mit SF₆ räumt zwar ein, daß Minderdruck von 0,3 bar gegenüber dem Sollruck zu Treibstoffmehrverbrauch von 1,5% führt. Das bedeutet nach drei Jahren mittlerer Laufzeit ca. 60 Liter mehr Benzin. Aus deren Verbrennung entstehen etwa 140 kg CO₂. Diese Menge durch korrekten Reifendruck zu vermeiden, ist sicher angebracht, aber nicht, wenn dies mittels SF₆ geschieht. Wird den 140 kg CO₂ die Emissionswirkung von 1 kg SF₆ nach dreijähriger Reifenlaufzeit gegenübergestellt, nämlich 23 900 Kilogramm CO₂-Äquivalente, dann springt das ökologische Mißverhältnis ins Auge. Der Beitrag zum Treibhauseffekt durch die SF₆-Füllung ist fast 170 Mal so groß wie seine Reduzierung über weniger Kraftstoffverbrauch.

Angesichts dieses Mißverhältnisses ist SF₆ als Reifenfüllgas ökologisch nicht vertretbar. Der Verzicht darauf ist praktisch zuzumuten, zumal SF₆ nicht die Häufigkeit der Reifendruckmessungen, sondern nur der Gasnachfüllungen verringern soll. Wer aber schon das Druckmeßgerät auf das geöffnete Ventil angesetzt hat, kann auch noch die wenigen Sekunden für die Nachfüllung von Luft aufbringen.

4 BaU-Emissionsprognose 2010 - Szenario I

Szenario I gründet nicht auf einer Renaissance von SF₆ in Autoreifen, wohl aber darauf, daß die 1998 erreichte Verbrauchsmenge mittelfristig stabil bleibt. SF₆ wird zwar nicht mehr von Reifenherstellern empfohlen und auch von Handelsketten nicht mehr offensiv vermarktet. Dennoch kann der einzelne Reifenhändler, ob Mitglied einer Handelskette oder unabhängig, SF₆ weiterhin einsetzen, wenn es seine Kunden wollen. Sie zahlen ihm für die SF₆-Befüllung eines Reifensatzes ca. 100 DM, für Stickstoff-Befüllung nur 20 DM.

Bleibt das Verbrauchsniveau von 1998 bis 2007 konstant bei jährlich 30 t, sinken die Emissionen bis 2001 auf diesen Wert, den sie bis 2010 beibehalten (vgl. Diagramm 29).

5 Relative Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II

Das Szenario II nimmt an, daß SF₆ als Reifengas mittelfristig nicht mehr verwendet wird. Es wird kein gesetzliches Verbot dieser Anwendung unterstellt, allerdings eine Informationspolitik über den Umweltschaden durch die SF₆-Reifenbefüllung. Auch von den Reifenherstellern wird erwartet, daß sie sich an einer Aufklärung beteiligen, die sich nicht nur an Autofahrer, sondern auch an Reifenhändler richtet. Werbung für SF₆ als Reifengas unterbleibt, so daß keine neuen Käuferschichten gewonnen werden.

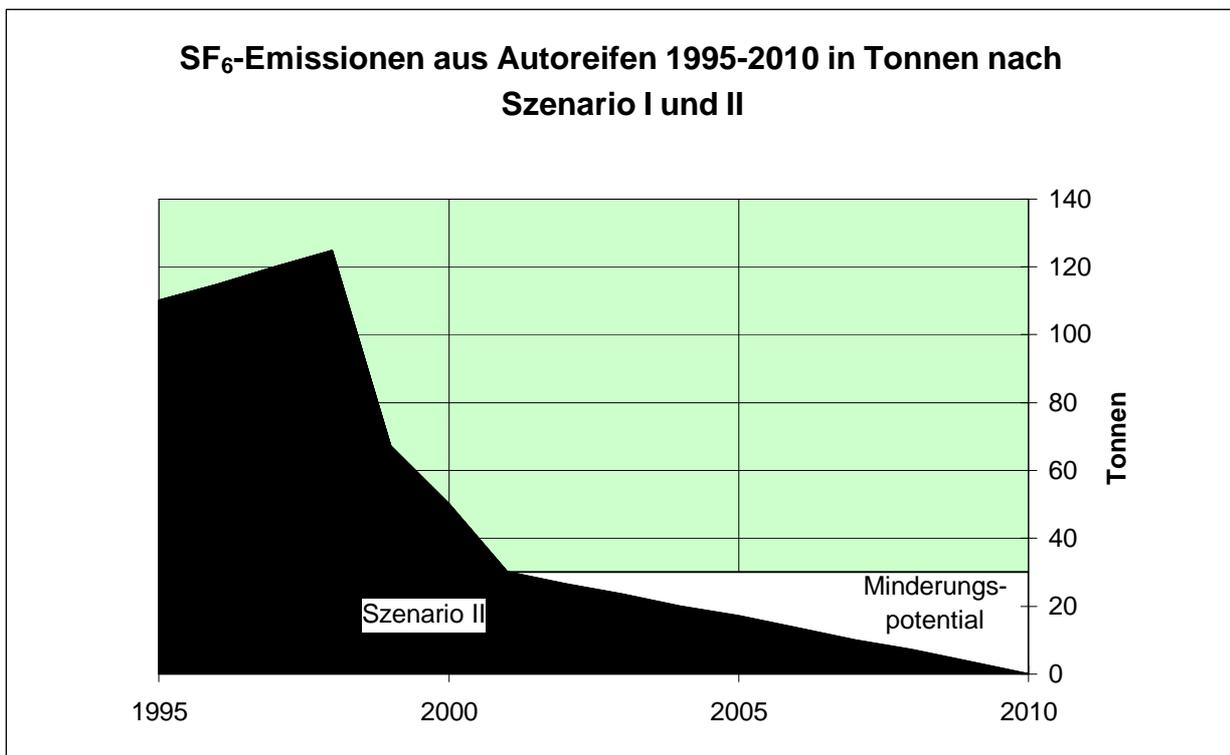


Diagramm 29: Emissionen von SF₆ als Reifenfüllgas 1995-2010 im Vergleich der Szenarien I und II in Tonnen. Der Verbrauchsrückgang seit 1995 führt ab 1999 zur Emissionssenkung bis 2001. Danach bleiben in Szenario I die Emissionen konstant auf 30 t jährlich. Nach Szenario II (schwarze Fläche) sinken die Emissionen weiter und erreichen im Jahr 2010 den Wert Null.

Unter diesen Bedingungen ist mit einem weiteren allmählichen, aber stetigen Rückgang von Verbrauch und Emission zu rechnen. Für 2007 wird der Verbrauch Null angenommen, so daß es spätestens 2010 keine Emissionen mehr gibt.

6 Beitrag zum Treibhauseffekt durch SF₆ aus Autoreifen

Tab. 47: SF ₆ -Emissionen aus Autoreifen 1995-2010 in t und in Mio. t CO ₂ -Äquivalente					
<i>GWP: 23 900</i>	1995	1998	2000	2005	2010.
Emissionen in t Szenario I	110	125	50	30	30
Emissionen in t Szenario II				17	0
Mio. t CO ₂ -Äquivalente	2,63	2,99	1,20	0,72	0,72
				0,40	0,00

Der Beitrag zum Treibhauseffekt durch SF₆-Emissionen aus Autoreifen betrug 1995 rd. 2,63 Mio. t CO₂-Äquivalente und erreichte 1998, drei Jahre nach dem Spitzenverbrauchsjahr 1995, die Rekordhöhe von 2,99 Mio. t (vgl. Tabelle 47). Danach sinkt der Wert, in Szenario I bis auf 0,72 Mio. t CO₂-Äquivalente, in Szenario II bis auf Null.

7 SF₆-Alternativen

Die Alternative zur SF₆-Reifenfüllung ist Luft. Allerdings werben mit der gleichen Argumentation wie für SF₆ mehrere Händlergruppen für die Reifenbefüllung mit Stickstoff. Prospekte versprechen "verminderten Profilverschleiß und verringerten Druckverlust", weil das Gas "die Druckstabilität erhöht", da es länger im Reifen bleibe als "gewöhnliche Luft". Das erklärten u.a. "point S" und "Reifenring" 1996.

Es konnten keine Meßergebnisse gefunden werden, die Aufschluß darüber geben, inwieweit und ob überhaupt Luft aufgrund ihres 20%igen Sauerstoffgehalts anders durch Gummireifen entweicht als 100%iger Stickstoff. Fest steht allerdings, daß reiner Stickstoff im Unterschied zu SF₆ keinen direkten Beitrag zum Treibhauseffekt liefert. Ein indirekter Beitrag zum Treibhauseffekt entsteht jedoch durch seine unter Energieaufwand stattfindende Erzeugung und durch seinen Transport, weshalb die mitunter anzutreffende Bezeichnung "grünes" oder "umweltfreundliches" Reifengas nur gegenüber SF₆, nicht aber gegenüber Luft angemessen ist.

Daß reiner Stickstoff in Flugzeugreifen gefüllt wird, ist übrigens kein Anhaltspunkt für seinen Nutzen am Auto. Denn im Flugzeug muß die Reifenfüllung erstens absolut feuerfest und zweitens absolut trocken sein, um eine durch die extremen Temperaturunterschiede bedingte korrosive Kondensation zu verhindern (Lufthansa 1996).

4 Magnesiumguß

Beim Gießen von Magnesium wird SF₆ als Schutzgas über der Schmelze eingesetzt, um ihre Oxidation und Entzündung zu verhindern. Es wird in Konzentrationen bis 1 Vol.-% im Gemisch mit Trägergasen wie trockener Luft oder CO₂ über der Oberfläche des über 650 °C flüssigen Metalls verteilt, das sich sonst bei Temperaturen über 500°C entzündet (Solvay 1992, 16/17). Das zudosierte⁵ SF₆ wird nur minimal chemisch umgesetzt, so daß Verbrauch und Emission gleichgesetzt werden können.⁶

Das seit Mitte der 70er Jahre eingesetzte SF₆ trat in Konkurrenz zu SO₂, das in Konzentrationen von 0,5-1,5% über der Schmelze zu einem Schutzfilm aus MgSO₄ führt und so die Schmelze schützt (Gjestland/Westengen 1996, 7). Da SF₆ einfacher als das stark toxische SO₂ zu handhaben ist, setzte es sich in vielen neuen Gießereien durch.

Schutzgas wird in Deutschland nur bei der Verarbeitung von Magnesium eingesetzt, das in Barren importiert wurde. Beim Vergießen frisch gewonnenen Metalls in diese Barren wird in den Erzeugerländern ebenfalls Schutzgas benutzt, und zwar mehr als in deutschen Gießereien. Nachfolgend wird das im Ausland bei der Primärproduktion eingesetzte SF₆ nicht mitberücksichtigt, sondern nur der SF₆-Einsatz im Inland.

1 Inlands-Verbrauch und -Emissionen 1995-1997

Von 1995 bis 1997 sank der inländische Einsatz von SF₆ als Schutzgas von 6,1 auf 3,0 t (vgl. Datentabelle von Diagramm 30), obwohl die Produktion vom Magnesiumguß von 5000 auf 12 000 t anstieg.

In den ca. 20 deutschen Magnesiumgießereien wurden 1995 etwa 5000 t Gußteile aus Magnesium hergestellt. Nur für 2000 t Mg (40%) wurde SF₆ als Schutzgas eingesetzt: insgesamt 6,1 Tonnen. Die Mehrheit des Mg-Gusses wurde mithilfe von SO₂ erzeugt. In den folgenden drei Jahren 1996, 1997 und - vorläufig - 1998 nahm die Magnesiumguß-Produktion sprunghaft auf das Dreifache zu, nämlich auf 14 600 t in 1998. Im gleichen Zeitraum halbierte sich der absolute Verbrauch von SF₆ auf 3,1 t (Befragung Magnesiumguß 1999).

Der SF₆-Rückgang bei wachsendem Magnesium-Ausstoß hat zwei Ursachen:

Erstens stellten Gießereien, die 1995 noch 1000 t Magnesium mithilfe von 3,4 t SF₆ gossen, auf SO₂ um. Dadurch sank der absolute Verbrauch von SF₆ um die Hälfte.

Zweitens eröffneten vier Gießereien neu, die zwar SF₆ benutzen und 1997 bereits 5500 t (1998: 7350 t) Magnesium herstellten, aber dank SF₆-sparender neuer Ofentechnologie den spezifischen Gasverbrauch pro Tonne Metall von 2-3 kg um den Faktor 100 auf 25-30 Gramm senkten (Befragung Magnesiumguß). Die vier modernen Gießereien, die zu Automobil- bzw. Autozulieferbetrieben gehören, verbrauchten 1997 für die 5500 t Magnesium nur 150 kg SF₆.

⁵ "SF₆ reagiert mit der Oberfläche einer Mg-Schmelze unter Bildung eines Schutzfilms, wodurch weitere Mg-Reaktionen mit dem Sauerstoff der Luft verhindert werden" (Gmelin 1978, 184).

⁶ "In der Magnesiumindustrie gilt, daß alles SF₆, das in der Produktion eingesetzt wird, in die Atmosphäre emittiert." (Gjestland/Westengen/Magers 1996, 2)

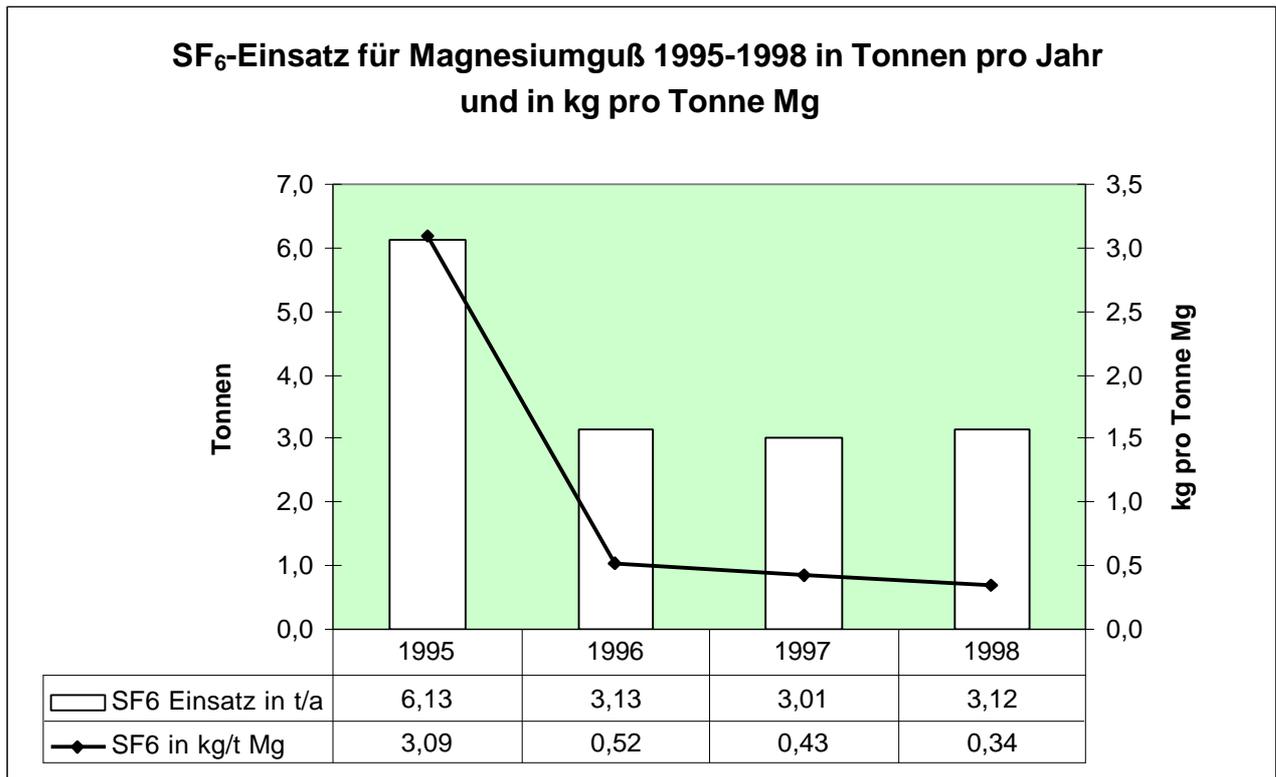


Diagramm 30: SF₆-Einsatz für Magnesiumguß 1995-1998 in t/a und kg pro Tonne Mg. Der absolute SF₆-Einsatz (Säulen, linke Achse) sank trotz Verdreifachung der Produktion von 6,13 t (1995) auf 3,13 t (1998). Der durchschnittliche spezifische SF₆-Einsatz pro Tonne Magnesiumguß (Linie, rechte Achse) sank dank moderner Technologie von 3,09 auf 0,34 kg.

Dank der jährlich wachsenden Bedeutung neuer gegenüber alter SF₆-Ofentechnologie sank von 1995 bis 1998 der durchschnittliche Emissionskoeffizient pro Tonne Magnesiumguß in allen SF₆-verwendenden Gießereien von 3,09 auf 0,34 kg pro Tonne Metall (vgl. Diagramm 30, Datentabelle, Zeile 2).

Im Jahr 1997 wurden von den 12 000 t Magnesiumguß 41% mit SO₂ hergestellt, außerdem 13% mit SF₆ bei alter Ofentechnologie (2 kg/t Mg) und 46% mit SF₆ bei neuer Ofentechnologie (27 g/t Mg). Damit war es möglich, die absolute Produktion von Magnesiumguß um ein Mehrfaches zu steigern und zugleich weniger SF₆ als im Jahr 1995 zu emittieren.

SF₆-Ersparnis durch neue Ofentechnologie

Die spezifischen SF₆-Emissionen sind bei kleinbetrieblicher diskontinuierlicher Herstellung besonders hoch, weil Anwärm- und Abklingphasen die Produktionszeit verlängern und die Materialbeschickung des Schmelztiegels meist mit Öffnung der Abdeckung verbunden ist. Darüber hinaus muß der Deckel für die Entfernung von Eisenfluorid von den Tiegelinnenwänden von Hand geöffnet werden. Die Öffnung der Abdeckung im laufenden Betrieb ist eine starke Emissionsquelle, da die Atmosphäre über der heißen Schmelze einen starken Auftrieb hat. Oft wird das Schutzgas über Handsteuerung und nach Augenmaß zugegeben, und das heißt im Zweifel "lieber etwas mehr", um "auf der sicheren Seite" zu sein. (Frech 1999)

Seit den Erkenntnissen über die starke Klimawirksamkeit von SF₆ warnen Magnesium-Lieferanten zwar ihre Kunden vor Überdosierungen (Hydro Magnesium 1996). Doch erst seit sich die Anlagenbauer die SF₆-Verminderung zur besonderen Aufgabe machen, gehen die spezifischen SF₆-Emissionen deutlich zurück.

Die Verminderung der Emissionen gründet u.a. auf folgenden technischen Maßnahmen:

1. Die Dichtheit der Öfen wird erhöht: Die feuerfeste Abdichtung zwischen Ofentiegel und Ofendeckel verhindert den Gasaustritt, und die Materialzufuhr erfolgt vollautomatisch, kontinuierlich und durch ein Schleusensystem hindurch.
2. Die Dosierung für das Schutzgas wird vollautomatisiert, und zwar durch elektronische Regelung sowohl des Gasmischers als auch der Gaszufuhr und des Zufuhrdrucks jeweils nach dem für den Zustand der Schmelze nötigen Bedarf (Rauch 1999; Westofen 1999).
3. Bei großen Gießereien kommt der Vorteil dreischichtigen Betriebs hinzu, der Anlauf- und Abklingverluste minimiert (Scherelis 1996).

2 BaU-Emissionsprognose bis 2010 - Szenario I

In beiden Emissionsszenarien wird angenommen, daß die Produktionskapazitäten ab 1998 durch neue Anlagen bis 2010 um jährlich 20% zunehmen (Hartmann 1999). Der jährliche Ausstoß steigt bis 2010 auf 73 000 t. Allein neue, moderne Großbetriebe vervielfachen ihre Produktion von 1998 bis 2010 von 7350 auf 65 500 t.

Dem Magnesiumguß wird in Deutschland eine so stark wachsende Nachfrage für die nächsten Jahre in erster Linie wegen höherer Einsatzmengen im Automobil vorausgesagt. Der Kapazitätsausbau setzte 1996 mit der Gründung von vier neuen Gießereien ein. Das Leichtmetall mit der Dichte 1,8 soll Stahl (Dichte ca. 7,8) als Werkstoff ersetzen, um das Fahrzeuggewicht zu verringern - zunächst bei Lenkrad, Getriebegehäuse u. dgl.

Szenario I hat zum Schutzgas die zwei folgenden Annahmen:

1. Alle neuen Betriebe verwenden als Schutzgas SF₆ mit moderner Ofentechnologie. Der spezifische Gaseinsatz pro t Magnesiumguß beträgt 30 Gramm.
2. In den alten Betrieben werden bis 2000 noch die bereits geplanten Umstellungen von 1600 t Kapazität auf SO₂ vorgenommen. Die dann erreichte Jahresproduktion von 7000 t (SO₂-Technologie) wird nicht mehr erhöht. Ab 2000 werden in den Altbetrieben 7000 t Magnesiumguß mit SO₂ und 600 t mit SF₆ hergestellt. Die 600 t werden in sieben Kleinbetrieben mit diskontinuierlicher Fertigung erzeugt. Dort beträgt der spezifische SF₆-Verbrauch pro t Magnesiumguß konstant 4,5 kg.

Unter diesen Bedingungen kommt es bis 2010 zu folgenden SF₆-Emissionen:

Vom empirischen Ausgangswert 3,12 t des Jahres 1998 steigen die Emissionen bis 2010 langsam auf insgesamt 4,67 t an. Davon stammt immer noch die Mehrheit, nämlich 2,7 t (58%) von den kleinen Altbetrieben mit einer Jahresleistung von 600 t Guß. Die neuen Großbetriebe erzeugen in 2010 mit 65 500 t das Hundertfache der alten Kleinbetriebe, setzen aber nur knapp 2 t SF₆ ein. Die Gesamtemissionen von SF₆ liegen im BaU-Szenario in 2010 immer noch um 24% unter dem Wert von 1995.

3 Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II

Der größte europäische Magnesiumhersteller Norsk Hydro befürchtet für sein Produkt, daß "der Einsatz von SF₆ seine Attraktivität stark reduziert", weil das Leichtmetall, das über die Kraftstoffersparnis beim Autofahren weniger CO₂-Ausstoß ermöglichen soll, durch zu viel SF₆ bei seiner Herstellung in der Ökobilanz seine klimagünstige Wirkung wieder einbüßt (Gjestland/Westengen 1996, 6). Die Autoren beziehen sich auch auf das SF₆, das beim Gießen von Primärmetall im Erzeugerland eingesetzt wird, und zwar mit z.Zt. "0,5 kg pro Tonne Metallguß". Sie befürworten generell die Umstellung auf SO₂: "Der Einsatz von SF₆ in der Magnesiumindustrie sollte strikt reduziert oder gar eliminiert werden" (ebd.). Norsk Hydro, d.h. sein Geschäftszweig Hydro Magnesium, empfiehlt seinen Kunden grundsätzlich SO₂ als Schutzgas (Hartmann 1999), und zwar mit Erfolg bei spezialisierten Leichtmetallgießereien.

Das Reduktionsszenario II nimmt für den Magnesiumguß bis 2010 die gleiche Produktionsmenge wie in Szenario I an. Die Annahmen zum Schutzgas sind jedoch andere:

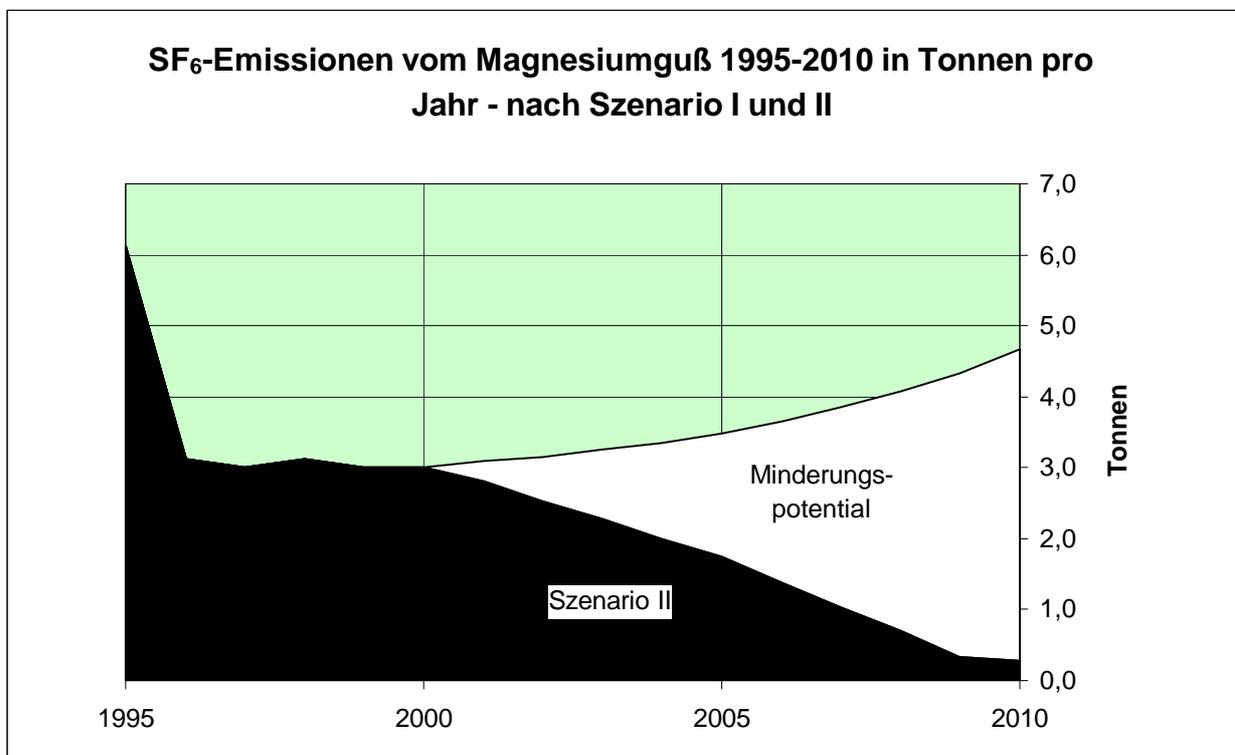


Diagramm 31: SF₆-Emissionen vom Magnesiumguß 1995-2010 in Tonnen pro Jahr - nach Szenario I und II. Durch SO₂ statt SF₆ als Schutzgas sinken die SF₆-Emissionen von 1995 bis 2000 auf die Hälfte. Nach Szenario I steigen sie bis 2010 trotz Verzehnfachung des Ausstoßes von Magnesiumguß dank SF₆-armer Ofentechnologie nur leicht an. Nach Szenario II sinken sie ab 2000 sogar weiter, weil SF₆ generell bis auf kleine Reste als Schutzgas abgelöst wird.

1. Auch die kleinen spezialisierten Betriebe mit einer Jahresleistung von 600 t Magnesiumguß stellen von 2000 bis 2010 weitgehend, d.h. bis auf 10% ihrer Produktion, von SF₆ auf SO₂ um.
2. Ab 2002 schützen auch neue Großgießereien, die zu Auto- oder Autozulieferbetrieben gehören, die Magnesiumschmelze nicht mehr mit SF₆, sondern mit SO₂ oder einem anderen SF₆-Substitut. Ab 2005 wird SF₆ auch bei den seit 1996 neugegründeten Gießereien ersetzt.

Unter diesen Bedingungen kommt es gegenüber Szenario I ab 2000 zu geringeren SF₆-Emissionen: Sie resultieren im Jahr 2010 ausschließlich aus Kleinbetrieben, bei denen 10% der Produktionskapazität nicht auf ein anderes Schutzgas umgestellt sind. Die Gesamtemission beträgt nach Szenario II im Jahr 2010 nur noch 0,27 t (270 kg).

4 Emissionsentwicklung im Vergleich beider Szenarien

Im Diagramm 31 und in Tabelle 48 sind die SF₆-Emissionen im Vergleich beider Szenarien wiedergegeben. Die Ersparnis von Szenario II gegenüber Szenario I im Jahr 2010 beträgt 4,4 t SF₆ bzw. 0,105 Mio. t CO₂-Äquivalente.

Tabelle 48: SF ₆ -Emissionen vom Magnesiumguß 1995 bis 2010 im Vergleich der Szenarien I und II*				
	1995	2000	2005	2010
Emissionen Szenario I in t	6,13	3,02	3,49	4,67
Emissionen Szenario II in t			1,73	0,27
Minderungspotential in t	-	-	1,76	4,40
Minderung in Mio. t CO ₂ -Äqu.	-	-	0,042	0,105

Der Beitrag zum Treibhauseffekt im Szenarienvergleich ist grafisch in Diagramm 32 dokumentiert: Der Ausgangswert von 1995 wird im Szenario II bis 2010 weit unterschritten, aber auch in Szenario I bis 2010 nicht wieder erreicht.

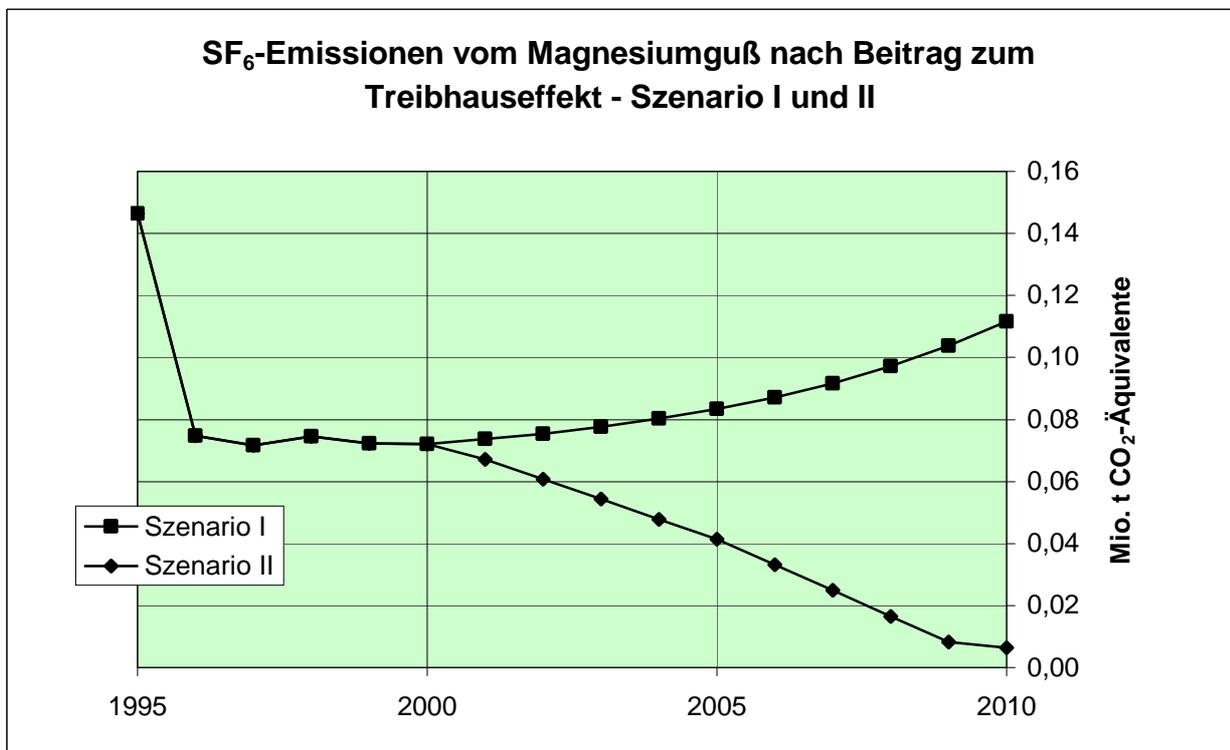


Diagramm 32: SF₆-Emissionen vom Magnesiumguß nach Beitrag zum Treibhauseffekt - Szenario I und II. Auch nach Szenario I werden bis 2010 die Ausgangswerte von 1995 (0,146 Mio. t CO₂-Äquivalente) nicht wieder erreicht. Nach Szenario II (weitestgehende SF₆-Substitution) beträgt der Beitrag zum Treibhauseffekt in CO₂-Äquivalenten nur 0,006 Mio. t.

5 Halbleiterfertigung

SF₆ ist in der Halbleiterindustrie ein wichtiges Gas zum Strukturätzen im Niederdruckplasma. Zusammen mit anderen in der Halbleiterfertigung verwendeten fluorierten Gasen wird diese SF₆-Anwendung im abschließenden Teil IV behandelt. Daraus stammen die nachfolgenden Daten zu Verbrauch und Emissionen.

1 Inlands-Verbrauch und -Emissionen 1995-1997

Tab. 49: Verbrauch und Emissionen von SF₆ in der Halbleiterindustrie 1995-1997 in t/a			
	1995	1996	1997
Verbrauch in t	7	9	10
Emissionen in t	4	5	5
<i>Emiss. in Mio. t CO₂-Äquiv.</i>	<i>0,097</i>	<i>0,114</i>	<i>0,126</i>

Die Differenz zwischen Verbrauch und Emission resultiert erstens aus der nur partiellen chemischen Umsetzung im Plasmareaktor und zweitens an der Wirkung nachgeschalteter Abgasreinigungsanlagen.

2 BaU-Emissionsprognose 2010 - Szenario I

Die Annahmen für die Szenarien I und II sind ebenfalls in Teil IV dargestellt. Hier werden nur die Resultate in Bezug auf die Emissionsmengen präsentiert.

Tab. 50: Jahresemissionen von SF₆ aus der Halbleiterfertigung 1995-2010 nach BaU-Szenario I				
	1995	2000	2005	2010
Emissionen in t	4	6	8	11
<i>Mio. t CO₂-Äquivalente</i>	<i>0,097</i>	<i>0,150</i>	<i>0,200</i>	<i>0,268</i>

Nach BaU-Szenario I ergeben sich bis 2010 die Emissionen der Tabelle 50. Die SF₆-Emissionen steigen 1995-2010 von 4 t auf 11 t an.

3 Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II

Nach Szenario II ergeben sich ab 2000 niedrigere Emissionen (Tabelle 51). Sie liegen im Jahr 2010 mit 2 t unter dem Ausgangswert von 1995 (4 t).

Tab. 51: Jahresemissionen von SF₆ aus der Halbleiterfertigung 1995-2010 nach Minderungsszenario II				
	1995	2000	2005	2010
Emissionen in t	4	6	6	2
<i>Mio. t CO₂-Äquivalente</i>	<i>0,097</i>	<i>0,137</i>	<i>0,138</i>	<i>0,045</i>

Das Szenario II bringt bei den Emissionen im Jahr 2010 eine Entlastung von 9 t. Der Beitrag zum Treibhauseffekt beträgt dann statt 0,268 Mio. t CO₂-Äquivalente (Szenario I) nur 0,045 Mio. t bzw. 17% davon.

6 Sonstige SF₆-Bereiche

Neben den fünf Hauptanwendungen von SF₆ gibt es weitere Einzelanwendungen, die für sich genommen quantitativ wenig, aber zusammen nicht zu vernachlässigende Emissionen bilden. Insgesamt werden acht verschiedene Bereiche mit SF₆-Emissionen zwischen 70 kg/a und 3100 kg/a identifiziert. Aus ihnen stammten bereits 1995 Emissionen im Umfang von 7,4 t (s. Tabelle 52).

	1995	1996	1997
Teilchenbeschleuniger	2,9	3,1	3,1
Elektronenmikroskope	0,2	0,2	0,27
Röntgen-Materialtester	0,23	0,26	0,3
Röntgen-Therapiegeräte	0,07	0,08	0,09
Tracergas	0,5	0,5	0,5
Flugzeugradar	1,0	1,0	1,0
Aluminium-Reinigung	0,5	0,5	0,5
Sondergebiete	2,0	2,0	2,0
Summe	2052,4	2053,64	2054,76

1 Tandem-Teilchenbeschleuniger mit Van-de-Graaff-Generatoren

In der Kernforschung werden u.a. Elektrostatische Teilchenbeschleuniger eingesetzt (vgl. NuPECC 1995). Bei diesen Tandem-Beschleunigern mit Van-de-Graaff-Generatoren wird die für die Ionenbeschleunigung im Vakuum notwendige Hochspannung von außen angelegt. Die Geräte befinden sich mitsamt dem Hochspannungsgenerator in einem Tank, der mit Isoliergas gefüllt ist. Nicht in allen Fällen wird mit SF₆ isoliert; wo dies der Fall ist, nimmt man es allein oder fügt es in unterschiedlicher Konzentration anderen Gasen als Beimischung zu. Um an der Vakuumröhre zu Forschungszwecken manipulieren zu können, muß der Gerätetank geleert werden. Das Isolationsgas wird dazu in einen Vorratstank gepumpt, gereinigt bzw. getrocknet und dann wieder zurückgepumpt. Beim Umpumpen treten Gasverluste auf, ebenso beim Anspringen von Überdruckventilen etc., da die Anlagen generell unter relativ hohem Druck (in den untersuchten Fällen zwischen 5 und 25 bar) gefahren werden.

Die Geräte sind unterschiedlich groß; die SF₆-Füllmenge lag in den untersuchten Fällen zwischen 10 kg und knapp 16 Tonnen. Je nach Größe und Betriebsbedingungen der Gesamtanlage unterscheiden sich auch die jährlichen Emissionen stark. Erfasst wurden 18 Anlagen an 14 Standorten (Universitäten und öffentliche Forschungseinrichtungen). Die Aufsummierung des Bestands und der Emissionen in Tabelle 53 folgt den Angaben der Anlagenbetreiber. Diese ermittelten die lfd. Emissionen aus ihren jährlichen Nachfüllungen. Die Jahresemissionen liegen bei etwa 7,5 Prozent des Bestands. Der Verbrauch für Neuanlagen (nicht Verbrauch für Emissionsersatz) verläuft diskontinuierlich und wird hier nicht berücksichtigt. Seit 1965 wurde im Durchschnitt alle zwei Jahre eine Anlage neu installiert. Zwischen 1990 und 1995 wurden zwei Anlagen in Betrieb genommen, eine im Jahr 1992 mit 360 kg SF₆ und die andere im Jahr 1993 mit 900 kg SF₆. 1996 kamen zwei weitere hinzu mit zusammen 1750 kg SF₆, so daß der Gesamtbestand an SF₆ seit 1995 um etwa 2 t auf 41 t stieg.

Tab. 53: SF₆-Emissionen aus Teilchenbeschleunigern 1995-1997 in t/a			
Jahr	1995	1996	1997
Emissionen t/a	2,9	3,1	3,1
Bestand in t	39	41	41

Quelle: Befragung Teilchenbeschleuniger; Lfd. Emissionsrate: 7,5%.

Emissionsprognose bis 2010

Beim Bestand ist künftig mit Konstanz, nicht mit Zuwachs zu rechnen. Darum bleiben auch die laufenden Emissionen langfristig (bis 2010) auf einem Niveau von 3,1 t/a. Von Verschrottungsemissionen wird abgesehen, weil unterstellt wird, daß bei künftiger Verschrottung das SF₆ abgesaugt und wiederaufgearbeitet wird (Solvay 1996).

2 Hochspannungs-Elektronenmikroskope

Bei einem kleinen Teil (< 10 Prozent) der in Deutschland installierten Durchstrahlungs-Elektronenmikroskope dient SF₆ zur Isolation von Hochspannungsgenerator und Emissionskammer. Bei Geräten im Spannungsbereich unter 200 kV ist eine entsprechende Isolation nicht notwendig. Der Bestand an SF₆-isolierten Geräten im Bereich von 200 bis 400 kV Spannung hat seit der Markteinführung Mitte der 80er Jahre jährlich um ca. 6 Stück zugenommen und wurde vom führenden inländischen Anbieter für 1995 auf etwa 60, für 1997 auf über 70 Geräte geschätzt (Fei 1999). Die SF₆-Menge der Elektronenmikroskope beträgt zwischen 8 kg bei 200-kV-Geräten und 40 kg bei 400-kV-Geräten, im Schnitt etwa 18 kg. Der SF₆-Gesamtbestand in den in Deutschland installierten Geräten belief sich 1995 auf 1080, 1997 auf 1300 kg.

Die Geräte haben eine Lebensdauer von 15 Jahren und weisen jährliche Leckagen von etwa 0,5 kg unabhängig vom Gerätetyp auf (Fei 1999). Reparaturen finden meist beim Hersteller statt. Jedoch ist, nach Angaben von Anwendern, auch mit Emissionen im Havariefall und bei Reparatur vor Ort zu rechnen, die in Tabelle 54 in Höhe von weiteren 0,5 kg pro Gerät einkalkuliert sind. Die Jahresemissionen (Nachfüllungen) betragen somit pro Gerät 1 kg, insgesamt 60 kg (1995) bzw. 70 kg (1997). Nicht berücksichtigt werden Emissionen bei der Verschrottung von Altgeräten, da Rückführung ins Herstellerwerk und SF₆-Rückgewinnung vorausgesetzt wird (Fei 1999).

Außer den Elektronenmikroskopen im Kilovoltbereich gibt es auch SF₆-isolierte Großgeräte im Mega-Volt-Bereich (über 1000 kV), auf die rd. zwei Drittel des SF₆-Bestands entfallen. Davon gibt es bisher drei mit zusammen ca. 2000 kg Füllmenge. Im Zeitraum 1995-1997 ist eine Anlage mit ca. 500 kg Füllmenge neuinstalliert worden. Der SF₆-Jahresverbrauch für Emissionsersatz wird von Anwendern auf ca. 10% kalkuliert (Max-Planck-Institut 1996), mithin 200 kg/a.

Tab. 54: SF₆-Emissionen bei HS-Elektronenmikroskopen 1995-1997 in kg/a			
	1995	1996	1997
Kilo-Volt-Geräte	60	65	70
Mega-Volt-Geräte	140	140	200
Summe	200	205	270

Tabelle 54 stellt die laufenden Bestandsemissionen aus Kilo- und Mega-Volt-Geräten zusammen. Sie stiegen 1995-1997 von 200 auf 270 kg.

Emissionsprognose bis 2010

Die Jahresemissionen (Nachfüllungen) für Geräte im Kilo-Volt-Bereich werden bis 2000 auf 100 kg steigen. Danach wohl nicht weiter, weil ab dem Jahr 2000 mit einer Bestandssättigung (100 Geräte) gerechnet wird. Bei Mega-Volt-Geräten sind Prognosen schwierig, da innerhalb von 25 Jahren nur drei Geräte installiert wurden. Hier wird mit keinem Emissionszuwachs gerechnet. Sofern das SF₆-Rückgewinnungskonzept für elektrische Betriebsmittel (vgl. Kap.1 von Teil II) greift und rückgewonnenes Gas aus Altgeräten für Neubefüllungen zur Verfügung steht, ist mit nennenswerten Zuwächsen weder bei den Emissionen noch bei den Neuverbräuchen zu rechnen.

Die Emissionen bis 2010 werden auf jährlich insgesamt 300 kg geschätzt.

3 Röntgen-Materialuntersuchungsgeräte

Bei transportablen Röntgen-Materialuntersuchungsgeräten (Schweißnahtprüfungen u.ä.) wird SF₆ gegenüber der sonst üblichen Ölisolierung aus Gewichtsgründen bevorzugt. Der Bestand an entsprechenden Geräten hat seit Ende der 80er Jahre kontinuierlich zugenommen. Er wird von Herstellern (Philips Industrieröntgen 1996; Yxlon 1999) wie folgt geschätzt: 1995 ca. 500, 1997 ca. 700 Geräte. Der Jahresabsatz 1995-1997 in Deutschland wird auf rd. 100 Geräte geschätzt. Bei einer Füllmenge von durchschnittlich 1,5 kg SF₆ ergibt sich ein jährlicher Zuwachs des inländischen SF₆-Bestands von 150 kg. Dieser betrug 1995 etwa 750 kg und 1997 etwa 1050 kg.

Gasverluste treten bei Befüllungen von Neugeräten und nach Reparaturen (15% der Nachfüllung) sowie bei der Wartung (jährlich 20% des Bestands) auf.

Bei der Neubefüllung von jährlich ca. 250 Geräten, die zum größten Teil exportiert werden, fallen Befüllungsverluste von ca. 15% an. Das sind jährlich etwa 55 kg.

Vom inländischen Bestand werden jährlich ca. 20% repariert. Dabei wird das SF₆ freigesetzt. Die Nachfüllung für diese Gasverluste betrug 1995 150 kg und 1997 210 kg. Dazu kommen 15% Befüllungsverluste auf diese Reparatur-Nachfüllungen: 1995 ca. 20 kg; 1997 ca. 30 kg.

Die zusammengefaßten Emissionen von 1995 bis 1997 enthält die Tabelle 55.

Tab. 55: Emissionen aus Röntgen-Materialuntersuchungsgeräten 1995-1997 in kg/a:			
Jahr	1995	1996	1997
Emissionen in kg/a	230	260	300

Emissionsprognose bis 2010

Eine Sättigung für Röntgen-Materialuntersuchungsgeräte in Deutschland wird für 2000 angenommen, bei einem Gerätebestand von 1000 Stück (1500 kg SF₆-Füllung). Die Lebensdauer wird mit wenigstens 10 Jahren angegeben. SF₆-isolierte Geräte sind seit Ende der 80er Jahre auf dem Markt. Darum spielen neben Befüllungs- und Wartungsverlusten ab 2000 auch Verschrottungsemissionen eine Rolle. Es wird eine

Verschrottungsrate von 100 Stück pro Jahr angenommen. Die dabei freiwerdenden 150 kg werden nicht zurückgewonnen. Im Sättigungszustand ab 2000 betragen die Befüllungsverluste für Neugeräte 55 kg, die Einfüllungen nach Reparaturen 300 kg (=20% des Bestands), die Befüllungsverluste bei diesen Einfüllungen 45 kg. Schließlich emittieren bei der Verschrottung noch 150 kg.

Diese Gesamtemissionen von jährlich 550 kg bleiben voraussichtlich bis 2010 stabil.

4 Röntgen-Therapiegeräte (Linearbeschleuniger)

Die SF₆-Menge bei diesen für medizinische Zwecke eingesetzten Geräten ist mit etwas über 0,1 kg pro Gerät gering; sie wird in der Regel beim Anwender vierteljährlich gewechselt, was knapp 0,5 kg SF₆ Jahresverbrauch bzw. Jahresemission pro Gerät entspricht. Das Gas wird bisher nicht aufgefangen. Eine Rückgewinnung ist nicht geplant.

Da SF₆ als Isolatorgas erst seit 1992 genutzt wird (Elekta 1999), ist der entsprechende Gerätebestand vorerst noch gering. Für 1995 kann von 140 SF₆-isolierten Geräten ausgegangen werden und einem jährlichen Zuwachs von 15 Stück. Der Emissionsausgleich nahm von 1995 bis 1997 von 70 auf 85 kg zu. (In 2000 beträgt er 110 kg.)

Jahr	1995	1996	1997
Emissionen kg/a	70	77	85

Emissionsprognose bis 2010

Eine Gerätesättigung wird ab ca. 2005 erwartet. Der Gerätebestand beträgt dann etwa 300 Stück, die für den jährlichen Emissionsausgleich 150 kg benötigen. Die Lebensdauer wird auf 12 bis 15 Jahre geschätzt (Elekta 1999).

Bei der ab 2005 anstehenden Verschrottung der Altgeräte ist mit geringen Emissionen von weniger als 0,1 kg/Gerät zu rechnen, die hier nicht berücksichtigt werden.

5 Tracergas für die Untersuchung von Luftströmungen

Als stabiles und auch in extrem geringer Konzentration gut nachweisbares Spurengas wird SF₆ für die Untersuchung bodennaher und atmosphärischer Luftströmungen und Gasausbreitungen eingesetzt (Zenger u.a. 1994). Experten schätzen die verwendete Menge für Stadtklima- und Standort-Untersuchungen (Kaltluftausbreitung, Frischluftschneisen; Deponieanlagen, Kläranlagenbau usw.) auf max. 100 kg/Jahr.

Im Forschungsbereich (Großforschungseinrichtungen) werden pro Jahr 250 - 400 kg verbraucht. Verbrauch und Emissionen sind hier identisch. Die Gesamtemissionsmenge kann auf 400 - 500 kg SF₆/Jahr geschätzt werden (Befragung Tracergas).

Jahr	1995	1996	1997
Emissionen kg/a	500	500	500

Emissionsprognose bis 2010

Es gibt bisher keinen Hinweis darauf, daß sich die bisherigen Einsatzmengen von jährlich 500 kg künftig verändern.

6 Flugzeugradar

SF₆ wird als Isolationsmedium in den großen militärischen Aufklärungsflugzeugen vom Typ AWACS beim Radar eingesetzt. Es soll elektrische Überschläge in den sog. Hohlleitern zur Antenne hin verhindern, in denen hohe Spannungen über 135 kV herrschen (Dornier 1996). Alle übrigen inländischen Radarausrüstungen für Flugzeuge, ob Bord- oder Bodenradar, ob aktives oder passives, werden mit geringerer Spannung (bis zu 30 kV) betrieben, so daß kein SF₆ erforderlich ist, sondern Öl (Silikonöl) genügt (Dasa 1996). Bei der AWACS-Ausrüstung handelt es sich im Grunde nicht um ein Bordradar, sondern um in Flugzeuge eingebaute Bodenradarstationen, die hohe Leistungen bringen müssen, aber wenig Platz beanspruchen dürfen.

Bei der Wartung der AWACS-Flotte der NATO werden jährlich etwa 1000 kg SF₆ als Emissionsersatz verbraucht (Dasa 1999).

Tab. 58: SF₆-Emissionen vom AWACS-Radar 1995-1997 in kg/a

Jahr	1995	1996	1997
Emissionen kg/a	1000	1000	1000

Emissionsprognose bis 2010

Da AWACS-Flugzeuge auch in den nächsten zwanzig Jahre erhalten bleiben sollen, ist mit keiner Änderung der SF₆-Emissionen zu rechnen.

7 Reinigungsgas für Sekundäraluminiumguß

Zur Entfernung (Entgasung) von Wasserstoff sowie von Alkali- und Erdalkalimetallen und Feststoffen werden in Aluminiumschmelzen vor dem Gießen die Inertgase Stickstoff und/oder Argon eingeleitet, um bei den Gußteilen Porosität zu verhindern. Während bei der Reinigung von Primärschmelzen den Inertgasen üblicherweise elementares Chlor zugesetzt wird, weil die Reinheitsanforderungen an Primäraluminium sehr hoch sind, genügen zum Spülen von Sekundäraluminium-Schmelzen in der Regel die Inertgase ohne Additive (Steinhäuser 1996).

In einigen wenigen, meist kleineren, Sekundäraluminium-Gießereien sowie in Labors kommt ein Reinigungssystem aus Inertgasen zum Einsatz, denen SF₆ in Konzentrationen von 1 oder 2,5% zugesetzt ist (AGA-Gas 1999; Westfalen AG 1999).

Tab. 59: SF₆-Reinigungsgas von Aluminiumschmelzen 1995-1997 in kg/a

Jahr	1995	1996	1997
Emissionen kg/a	500	500	500

Die in Deutschland für diesen Zweck eingesetzte SF₆-Menge wird vom Gasehandel auf 500 kg/a geschätzt - bei konstanter, keineswegs steigender Marktentwicklung seit 1990.

Emissionsprognose bis 2010

Bisher gibt es keine Alternative für diese Gasmischung, so daß auch 2005 und 2010 mit der gleichen SF₆-Menge zu rechnen ist.

8 Sondergebiete einschl. Füllgas in Sportschuhen

Die Nachforschungen im Rahmen dieser Ausarbeitung stießen auf mehrere SF₆-Kleinstverbraucher wie z.B. Massentrenner, Tscherenkow-Detektoren usw., deren exakte Erfassung nicht erfolgte, weil die eingesetzten Mengen jeweils für sich genommen marginal sind und nur zusammengefaßt nennenswert sind. Ein größerer Einzelposten SF₆ wurde von einem amerikanischen Sportartikel-Unternehmen mit der Bitte um Vertraulichkeit mitgeteilt. Es handelt sich um SF₆, das in Sohlen von Sportschuhen ("Air System") importiert wird (Nike 1996).

Werden die nichtidentifizierten, folglich nur geschätzten, SF₆-Mengen mit den der Diskretion unterliegenden SF₆-Mengen zusammengefaßt, sind Gesamtemissionen von ca. 2 bis 2,2 t SF₆ jährlich eine durchaus realistische Größe für 1995 bis 1997. Dabei ist zum Bereich der Schuhsohlenfüllung anzumerken, daß das SF₆ zwar in Deutschland emittiert, die Schuhe aber im Ausland gefertigt werden.

Tab. 60: SF₆-Emissionen aus Sondergebieten einschl. Sportschuhen 1995-1997 in t/a			
Jahr	1995	1996	1997
Emissionen t/a	2,0	2,1	2,2

Quellen: Eigenschätzung; Nike 1996; Die Sportschuhfüllung ist nicht gesondert ausgewiesen.

Emissionsprognose bis 2010

Die Emissionen aller Sondergebiete werden in der Zeit nach 2000 voraussichtlich nicht zunehmen, sondern sich bei 2 t stabilisieren. Grund ist der Verzicht von Nike auf SF₆ zugunsten Stickstoff in Schuhsohlen. Der SF₆-Ausstieg bei der Neubefüllung soll 2001 abgeschlossen sein (Nike 1999). Ab 2005 fallen in Deutschland aus Sportschuhen, deren Lebensdauer auf 3 bis 4 Jahre geschätzt wird, keine SF₆-Emissionen mehr an.

9 Vermutete, aber nicht verifizierte SF₆-Anwendungen

Die Differenz zwischen den Angaben über den aufsummierten jährlichen inländischen Gesamtabsatz von SF₆-Herstellern und Gasehandel einerseits und den Verbrauchsangaben der inländischen Anwender andererseits in Höhe von ca. 8 t pro Jahr war Anlaß, nach weiteren Anwendungen von SF₆ zu suchen. Diese Recherchen ergaben keine weiteren nennenswerten Einsatzgebiete. SF₆ wird in Deutschland nicht in Lasergeräten eingesetzt (Poprawe 1996), nicht in Tennisbällen (Dunlopillo 1996) und offenbar auch nicht als Lecksuche-Gas.

10 Beitrag zum Treibhauseffekt 1995-1997

Werden die jährlichen Emissionsmengen 1995-1997 aus den acht sonstigen Anwendungen mit dem GWP-Wert von SF₆ multipliziert, ergibt sich ein Beitrag zum Treibhauseffekt zwischen 0,177 Mio. und 0,185 Mio. t CO₂-Äquivalente.

Tab. 61: SF₆-Emissionen sonstiger Bereiche in t und Mio. t CO₂-Äquivalente			
<i>GWP 23900</i>	1995	1996	1997
Emissionen in t	7,4	7,64	7,76
<i>Mio. t CO₂ Äquivalente</i>	0,177	0,183	0,185

11 Emissionsprognose bis 2010

Im Text dieses Kapitels wurden für jeden der acht Anwendungsbereiche außer Emissionsabschätzungen für 1995 bis 1997 auch Emissionsprognosen bis 2010 gegeben. Diese sind nachfolgend in Tabelle 63 eingetragen und zusammengefaßt.

Die summierte Emissionsprognose schreibt die gegenwärtigen Nutzungstrends fort. Sie kann als Business-as-Usual-Prognose qualifiziert werden. Allerdings hat sie bereits zur Grundlage, daß das Konzept zur Wiederverwendung von genutztem SF₆-Gas aus elektrischen Betriebsmitteln (vgl. Kapitel 1) zum Tragen kommt, und zwar auch bei Teilchenbeschleunigern und Röntgen-Materialtestern. Es macht darum wenig Sinn, diesem Szenario ein zweites gegenüberzustellen, das wesentliche Emissionsminderungen prognostiziert. Dafür fehlen aus heutiger Sicht die Grundlagen.

Tab. 62: Inländische SF₆-Emissionen aus sonstigen Anwendungen 1995-2010 in t/a und Mio. t CO₂-Äquivalente				
	1995	2000	2005	2010
Teilchenbeschleuniger	2,9	3,1	3,1	3,1
Elektronenmikroskope	0,2	0,3	0,3	0,3
Röntgen-Materialtester	0,23	0,55	0,55	0,55
Röntgen-Therapiegeräte	0,07	0,11	0,15	0,15
Tracergas	0,5	0,5	0,5	0,5
Flugzeugradar	1,0	1,0	1,0	1,0
Aluminium-Reinigung	0,5	0,5	0,5	0,5
Sondergebiete	2,0	2,0	2,0	2,0
Summe	2049,4	2055,06	2060,1	2065,1
<i>Emiss. in Mio. t CO₂ Äquiv.</i>	0,177	0,193	0,194	0,194

In der Summe werden die SF₆-Emissionen aus sonstigen Anwendungen von 1995 bis 2010 von 7,4 t auf 8,1 ansteigen.

Der Beitrag zum Treibhauseffekt erhöht sich damit von 1995 bis 2010 von 0,177 Mio. auf 0,194 Mio. t CO₂-Äquivalente oder um 10%.

Nachweise SF₆

3. Wärmeschutzverordnung: Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden vom 16.08.1994, BGBl. I, S. 2121 (Ausgabe 55 vom 24.08.1994); ABB Calor Emag Schaltanlagen AG, Mannheim, Fachgespräch mit Bodo Zahn (Marketing- und Produktmanager), Werk Großauheim, 17.4.1996; ABB Calor Emag Schaltanlagen AG, Mannheim, pers. Mitt. (B. Zahn) 9.8.1999; AGA Gas GmbH, Hamburg, pers. Mitt. 29.7.1999;
- Befragung Gasehandel: Im März 1999 abgefragte Inlandsabsätze von SF₆ nach Anwendungssektoren 1995 bis 1998 von: AGA Gas GmbH, Hamburg; Air Products GmbH, Hattingen; Chemogas GmbH, Bochum; Linde AG, Höllriegelskreuth; Messer-Griesheim GmbH, Krefeld; Westfalen AG, Münster;
- Befragung Magnesiumguß: Befragung der inländ. Magnesiumgießereien im März 1999: C&C Bark Metallguß, Schömburg; Bayerisches Druckguß-Werk, Markt Schwaben; Dietz-metall GmbH, Unterensingen; Eifelwerk Heinrich Stein, Eichelhardt; Handtmann Metallgußwerk, Biberach; Honsel-Werke AG, Meschede; Honsel Guß GmbH, Nürnberg; Laukötter GmbH, Wadersloh; Leibfried Mahle Metallwerk GmbH, Fellbach; Metallbearbeitung Friedrichshafen, Friedrichshafen; Petri AG, Aschaffenburg; Pierburg GmbH, Nettetal; Poppe, Kiel; W.Schenk GmbH Leichtgußwerke, Maulbronn; Schweizer & Weichand GmbH, Murrhardt; Andreas Stihl, Prüm-Weinsheim; TRW Automotive GmbH, Aschaffenburg; Volkswagen AG, Kassel; Weißensee Druckguß, Berlin; Paul Zitzmann GmbH, Stockheim;
- Befragung Schallschutzglas: Befragung zu Schallschutz-Isolierglas (1996 und 1999): Flachglas AG, Gelsenkirchen; Glas Trösch AG, Bützberg; Sanco Glas, Nördlingen; Isolar Glas-Beratung GmbH, Kirchberg; Interpane Glasgesellschaft mbH, Plattling; VEGLA Vereinigte Glaswerke GmbH, Aachen; DCL Glas Consult, jetzt: DGT-Anlagen und Systeme GmbH, Sauerlach; Ratiotechnik GmbH & Co KG, Braunschweig; Lenhardt Maschinenbau GmbH, Neuhausen;
- Befragung Teilchenbeschleuniger: Schriftliche und mündliche Befragung bei 19 Forschungseinrichtungen zum ev. SF₆-Einsatz: Uni Bochum; Uni Erlangen; Uni Köln; TU München; Uni Frankfurt; Uni Freiburg; Uni Jena; Uni Leipzig; Uni Tübingen; Uni Stuttgart; Uni Augsburg; MPI Stuttgart; MPI Heidelberg; MPI-IPP München-Garching; FZ Rossendorf; FZ Jülich; PTB Braunschweig; HMI Berlin; GSI Darmstadt;
- Befragung Tracergas: Telefonische Befragung von: Zentrum für Umweltforschung der Universität Frankfurt; Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz; FZ Jülich, Abteilung Sicherheit und Strahlenschutz; TÜV Südwest, Stuttgart; Deutscher Wetterdienst, Offenbach; Universität Gießen, Geographisches Institut;
- Befragung Wandler: Befragung der Hersteller Trench Germany, Bamberg, 31.5.1999; Ritz Meßwandlerbau GmbH, Hamburg, 2.8.1999;
- Brüggemann (Reiling Glas Recycling GmbH) Marienfeld, pers. Mitt. 5.9.1996; Continental AG, ContiAIRSAFE-Informationsblatt o. J.; Continental AG, Hannover, pers. Mitt. 27.3., 10.9., 1.10.1996a; Continental AG, Hannover, Schreiben an Öko-Recherche vom 21.10.1996b; Dasa = Daimler-Benz Aerospace AG, Ulm, pers. Mitt. 11.10.96; Dasa = DaimlerChrysler Aerospace AG, Manching, pers. Mitt. 3.8.1999; Derner, P., Schalldämm-Isolierglas, in: Funktions-Isoliergläser: moderne Verglasungen für Fenster und Fassaden, Hg. H. J. Gläser, Ehningen 1992, 45-82;

- DIN 1286, Teil 2, Mehrscheiben-Isolierglas gasgefüllt. Zeitstandsverhalten, Grenzabweichungen des Gasvolumenanteils, Mai 1989;
- DIN 52210, Teil 4, August 1984, Bauakustische Prüfungen, Luft- und Trittschalldämmung, Ermittlung von Einzahl-Angaben;
- DIN EN 20717, Teil 1, November 1993, Akustik, Einzahlangaben für die Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen, Teil 1: Luftschalldämmung;
- DIN IEC 298 VDE 0870, Teil 6: Metallgekapselte Wechselstrom-Schaltanlagen für Nennspannungen über 1 kV bis einschließlich 52 kV, Berlin, März 1994;
- Dornier Luftfahrt GmbH, Oberpfaffenhofen, pers. Mitt., 11.10.1996;
- Dunlopillo-Slazenger GmbH, Hanau, pers. Mitt. 21.3.1996;
- Elektro Onkologische Systeme Vertriebsgesellschaft mbH, Hamburg, pers. Mitt., 2.8.1999;
- Eschbacher (Glas Trösch AG) Bützberg/Schweiz, pers. Mitt. 2.8.1999;
- Fei Deutschland GmbH, Kassel, pers. Mitt. 2.8.1999;
- Flachglas AG, Gelsenkirchen, pers. Mitt. 14.4.1996b;
- Frech Engineering GmbH & Co, Schorndorf, pers. Mitt. 19.3.1999;
- Gjestland, H. and Westengen, H. (Norsk Hydro Research Centre Porsgrunn), Use of SF₆ in the Magnesium Industry. An Environmental Challenge; presented at 3rd International Magnesium Conference, Manchester, April 10-11, 1996;
- Gjestland, H., Westengen, H., Magers, D., Protection of Molten Magnesium from Oxidation at Diecasters, Vortrag beim 4. Magnesium Abnehmerseminar, Aalen, 12.-13.9.1996;
- Glück (Continental AG) Hannover, pers. Mitt. 27.7.1999;
- Gmelins Handbuch der Anorganischen Chemie, S, Ergänzungsband 2, Schwefelhalogenide, Berlin 1978, 3-218;
- Hartmann (Hydro Magnesium Marketing GmbH) Bottrop, pers. Mitt. 26.7.1999;
- Holler, G., Die Gas- und Wasserdampfdurchlässigkeit des Isolierglasrandverbundes und die Alterungsbeständigkeit des Mehrscheiben-Isolierglases (MIG), in: Mehrscheiben-Isolierglas. Verhalten und Eigenschaften, Hg. H.J.Gläser, Renningen 1995, 68-99;
- Huntebrinker, K., Die thermischen Eigenschaften des Mehrscheiben-Isolierglases, in: Mehrscheiben-Isolierglas. Verhalten und Eigenschaften, Hg. H.J.Gläser, Renningen 1995, 25-46;
- Hydro Magnesium Marketing GmbH, Bottrop, Schreiben vom 17.6.1996;
- i.f.t. (Institut für Fenstertechnik) Rosenheim, Schreiben an Öko-Recherche vom 3.8.1999 mit Auszügen aus dem noch unveröffentlichten Forschungsbericht "Überarbeitung von DIN 4109, Beiblatt 1, Tabelle 40";
- Koch, Siegfried (Fraunhofer Institut für Bauphysik) Stuttgart, pers. Mitt. 2.8.1999;
- Koch, Siegfried: Schalldämmung von Isolierglasscheiben für den Wärmeschutz, in: Fortschritte der Akustik, Plenarvorträge und Fachbeiträge der 24. Deutschen Jahrestagung für Akustik - DAGA 98, Oldenburg 1998, 650-651;
- Koos (Verband der Fenster- und Fassadenhersteller e.V.) Frankfurt, pers. Mitt. 19.6.1996;
- Lufthansa Räderwerkstatt, Frankfurt, pers. Mitt. 4.7.1996;
- Max-Planck-Institut für Metallforschung, Stuttgart, Schreiben vom 20.5.1996;
- Neumann, C., Umgang mit SF₆ aus Sicht eines Betreibers von gasisolierten Schaltanlagen und -geräten, Teil 2, in: ETG-Fachbericht 40 "Isoliersysteme der elektrischen Energietechnik - Lebensdauer, Diagnostik und Entwicklungstendenzen", Berlin und Offenbach 1992, 267-276;
- Nike International, Niederlassung Deutschland, Weiterstadt, Vertrauliches Schreiben zum aktuellen und langfristigen SF₆-Absatz in Sportschuhen, 7.5.1996;

- Nike Inc., Beaverton (USA), pers. Mitt. (Sarah Severn) 7.9.1999;
 NuPECC Handbook 1995, 3rd ed., Strasbourg 1995;
 Petz (Stinnes Reifendienst) Kaiserslautern, pers. Mitt. 27.7.1999;
 Philips Industrieröntgen, Hamburg, pers. Mitt. 3.5.1996;
 point S und Reifen-Ring: Faltblätter zur Reifenfüllung mit PRO FILL, Oberramstadt
 25.4.1996;
 Poprawe, R., Fraunhofer Institut Lasertechnik, Aachen, pers. Mitt. 23.4.1996;
 Rauch Fertigungstechnik GmbH, Gmunden in Österreich, pers. Mitt. 19.3.1999;
 Scherelis (Volkswagen AG) Wolfsburg, Schreiben an Öko-Recherche 3.12.1996;
 Schumacher, Rolf (Institut für Fenstertechnik e.V.) Rosenheim, pers. Mitt. 2.8.1999;
 Siemens AG Bereich Energieübertragung und -verteilung: Unser Serviceprogramm:
 Leistungen und Ideen. Service in der Hoch- und Mittelspannungs-Schalttechnik,
 Firmenfaltblatt o.J.;
 Siemens AG Energieübertragung und -verteilung, Frankfurt am Main, pers. Mitt. 7.10.;
 Erlangen, pers. Mitt. 22.4.1996;
 Solvay Fluor und Derivate GmbH, Konzept zur Wiederverwendung von genutztem SF₆-
 Gas. Ein Beitrag zur Wirtschaftlichkeit durch Umweltschutz, Firmenschrift
 Hannover 1996;
 Solvay Fluor und Derivate GmbH: Schwefelhexafluorid, Hannover 1992;
 Steinhäuser, Th., Universität Duisburg, Fachbereich 8, pers. Mitt. 8.10.1996;
 UBA = Umweltbundesamt, Berlin, pers. Mitt. 31.3.1999;
 Unilux AG, Salmtal, pers. Mitt. 5.6.1996;
 VDEW, Empfehlungen für Planung, Bau und Betrieb von gasisolierten
 metallgekapselten Schaltanlagen 123 kV, Frankfurt am Main, 1. Ausgabe 1993;
 VDEW, Gasisolierte metallgekapselte Leistungsschalteranlagen bis 36 kV. Betriebliche
 Anforderungen für Projektierung, Bau und Betrieb im EVU, Frankfurt am Main,
 1. Ausgabe 1994;
 VDEW, Umfrage zum Thema SF₆ in Betriebsmitteln der elektrischen
 Energieversorgung. Eingesetzte Gesamtmenge und jährliche Nachfüllmengen
 (Manuskript-Druck), Frankfurt am Main, August 1996;
 VDEW (Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke e.V.): Pressekonferenz, Frankfurt am
 Main, 15. Juni 1998a;
 VDEW (Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke e.V.): Presseerklärung, Frankfurt am
 Main, 29. Juni 1998b;
 VDEW/ZVEI, Erklärung zur Verwendung von SF₆ im Bereich elektrischer Schaltgeräte
 und -anlagen in Deutschland, Frankfurt 1996;
 Westfalen AG, Münster, pers. Mitt. 28.7.1999;
 Westofen GmbH, Mainz-Kastel, pers. Mitt. 19.3.1999;
 Yxlon International X-Ray GmbH, Hamburg, pers. Mitt. 2.8.1999;
 Zenger, A., Rühling, A., Bächlin, W., Lohmeyer, A.: Tracergasuntersuchungen zur na-
 turgetreuen Simulation von atmosphärischen Transport- und Mischungsvorgän-
 gen im Rahmen von Umweltverträglichkeitsprüfungen, in: Staub - Reinhaltung
 der Luft 54 (1994), 51-54;
 ZVEI (Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.) Fachverband 6
 (Schaltgeräte, Schaltanlagen, Industriesteuerung): Umfrage zum SF₆-Verbrauch
 bei den Mitgliedsfirmen, Frankfurt am Main 1996;

III. Perfluorierte Kohlenwasserstoffe - PFC

Überblick

Die für die globale Erwärmung mengenmäßig bedeutendsten Spurengase aus der Gruppe der perfluorierten Kohlenwasserstoffe (engl. perfluorocarbons = PFC) sind CF_4 und C_2F_6 . Für CF_4 in der Atmosphäre hat die Forschung außer anthropogenen auch natürliche Quellen identifiziert (Harnisch/Eisenhauer 1998). Für einen natürlichen Ursprung von C_2F_6 wurden bisher keine Anzeichen gefunden (Harnisch 1996). Die seit Mitte der 30er Jahre dieses Jahrhunderts einsetzende Zunahme der globalen atmosphärischen CF_4 -Konzentration über die natürliche Hintergrundkonzentration hinaus korreliert mit dem weltweiten Anstieg der Produktion von Primäraluminium (ebd.). Letztere gilt als Hauptquelle der anthropogenen Emissionen von CF_4 und von C_2F_6 .¹ Auch in Deutschland ist die Aluminiumproduktion größter Emittent von CF_4 . Größter Emittent von C_2F_6 (und zweitgrößter Emittent von CF_4) ist allerdings seit 1996 die Halbleiterindustrie. Von den längerkettigen PFC hat nur C_3F_8 einen nicht zu vernachlässigenden Anteil an den deutschen Emissionen.

Für die von Deutschland ausgehenden künftigen PFC-Emissionen bis zum Jahr 2010 werden nachfolgend jeweils zwei Szenarien pro Anwendungssektor aufgestellt.

Szenario I ist ein Business-as-Usual-Szenario (BaU) und schreibt die gegenwärtigen Trends weitgehend unverändert fort. Szenario II ist ein Minderungsszenario. In ihm werden vorhandene technische Potentiale zur Emissionsdämpfung bzw. zur PFC-Substitution in jedem Sektor ausgeschöpft.

Im - aus vier sektoralen BaU-Szenarien zusammengefaßten - Gesamtszenario I steigen die PFC-Emissionen von 1995 bis 2010 von 258 t auf 340 t, im Minderungsszenario II sinken sie auf 167 t. Im Jahr 2010 sind die Emissionen nach Szenario II nur etwa halb so hoch wie nach Szenario I. Die entsprechenden CO_2 -Äquivalente betragen 2010 nach Szenario I rd. 2,52 Mio. t und nach Szenario II rd. 1,15 Mio. t. Das bedeutet beim Beitrag zum Treibhauseffekt eine Entlastung um 1,37 Mio. t CO_2 -Äquivalente oder 54%.

1 BaU-Emissionsprognose 2010 - Szenario I

Das BaU-Szenario I basiert für 1995 bis 2010 auf folgenden sektoralen Annahmen:

14. Bei der Aluminiumelektrolyse bleibt die Produktionskapazität der deutschen Hütten konstant auf dem 1998er Niveau. Auch die 1998er Zusammensetzung der Gesamtkapazität nach Elektrolysezellen mit Zufuhr des Aluminiumoxids von der Seite (SWPB) bzw. von der Mitte mittels Pointfeeder (PFPB) bleibt konstant. Beide Zufuhrtechnologien werden allerdings pro Jahr um 1% effizienter.
15. In der Halbleiterindustrie werden wie in den 90er Jahren auch in den ersten zehn Jahren nach 2000 zur Kammerreinigung zu über 95% PFC (C_2F_6 , CF_4 und C_3F_8) eingesetzt. Deren Emissionen steigen im Maße der für die Kammerreinigung er-

¹ Um eine Größenordnung geringer sind die Emissionen von C_3F_8 aus Aluminiumhütten, die auf 0,3% der CF_4 -Emissionen beziffert werden (Harnisch 1996, 58). In vorliegender Ausarbeitung wird C_3F_8 aus Aluminiumhütten nicht berücksichtigt.

warteten überdurchschnittlichen Verbrauchszuwächse um 11% pro Jahr, da auch die Ausstattungsquote mit Abgassystemen zur PFC-Zerstörung gleichbleibt.

16. Die jährliche Einsatz- bzw. Emissionsmenge von CF_4 bei der Leiterplattenfertigung bleibt konstant auf 4 bzw. 3,4 t.

17. Kältemittelmischungen, die PFC (C_3F_8 , C_2F_6) als Komponente enthalten, werden nur zum FCKW-, nicht aber HFCKW-Ersatz in Altanlagen benutzt. Ihr Neuverbrauch endet im Jahr 2000, ihre Emissionen enden im Jahr 2005.

Unter diesen Annahmen ergeben sich für 1995-2010 für alle Sektoren zusammen die PFC-Emissionen nach Tabelle 63. Sie steigen von 258 t auf 340 t an (letzte Zeile), wobei der Anstieg fast vollständig auf die starke Zunahme der Emissionen aus der Halbleiterindustrie zurückgeht. Dort steigen die CF_4 -Emissionen von 1995 bis 2010 um 65 t (Zeile 2) und die C_2F_6 -Emissionen um 90 t (Zeile 6). Die PFC-Emissionen aus Aluminiumhütten sinken im gleichen Zeitraum um 67 t CF_4 und 7 t C_2F_6 (Zeilen 1 u. 5).

Herkunft	PFC	1995	2000	2005	2010
1. Aluminiumhütten	CF_4	209	157	149	142
2. Halbleiterindustrie	CF_4	12	31	50	77
3. Leiterplattenfertigung	CF_4	3,4	3,4	3,4	3,4
Summe	CF_4	2267,4	2239,4	2255,4	2280,4
5. Aluminiumhütten	C_2F_6	21	16	15	14
6. Halbleiterindustrie	C_2F_6	11	36	62	101
Summe	C_2F_6	4566,8	4530,8	4587,8	4675,8
7. Halbleiterindustrie	C_3F_8	0	1	2	3
8. Kältetechnik	C_3F_8	2	15	0,03	0
Summe	C_3F_8	2	16	2	3
Summe alle PFC		258	259	281	340

Gemessen an den CF_4 - und C_2F_6 -Emissionen aus der Halbleiterindustrie und der Aluminiumelektrolyse sind die anderen PFC-Emissionen von untergeordneter Bedeutung: CF_4 -Emissionen aus der Leiterplattenfertigung (Tabelle 63, Zeile 3) bleiben auf niedrigem Niveau von 3,4 t (voraussetzungsgemäß) konstant. C_3F_8 -Emissionen aus der Kältetechnik (Zeile 8) gehen bis 2010 ganz zurück. Emissionen von C_3F_8 aus der Halbleiterindustrie (Zeile 7) wachsen zwar relativ, sind aber, absolut gesehen, niedrig.

Herkunft	1995	2000	2005	2010
1. Aluminiumhütten	1,551	1,165	1,108	1,054
2. Halbleiterindustrie	0,174	0,542	0,904	1,445
3. Leiterplattenfertigung	0,022	0,022	0,022	0,022
4. Kältetechnik	0,015	0,103	0	0
Summe	2045,762	2050,832	2056,034	2061,521

Der Beitrag zum Treibhauseffekt der PFC-Emissionen ist in Tabelle 64 eingetragen. Die Gesamtemissionen im Jahr 2010 betragen 2,52 Mio. t CO_2 -Äquivalente. Sie stammen zu 57% aus der Halbleiterindustrie und zu 42% aus der Aluminiumverhüttung.

2 Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II

Das Minderungsszenario (Szenario II) beruht 1995-2010 auf folgenden Annahmen:

1. Bei der Aluminiumelektrolyse bleiben die Produktionskapazität der inländischen Hütten und die jährlich einprozentige Effizienzsteigerung der Aluminiumoxidzufuhr wie im Szenario I. Der Unterschied besteht allein in der Annahme, daß die restlichen seitenbedienten Elektrolyseöfen (SWPB) auf mittebediente Punktdosierung (PFPB) umgestellt werden, so daß bis 2010 in Deutschland Aluminium nur noch mit den modernsten und am wenigsten PFC-erzeugenden Verfahren produziert wird.
2. In der Halbleiterindustrie erfolgt ab dem Jahr 2000 ein Umbruch im Reinigungsprozeß von Plasmakammern. In neuinstallierten Anlagen werden keine PFC mehr eingesetzt, sondern nur noch das fluorierte, aber kohlenstoff-freie Gas NF_3 . Da NF_3 vor der Einleitung in den Prozeß chemisch zu 98%-99% zersetzt wird, ohne zu rekombinieren, fallen nicht nur Emissionen von PFC weg (CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8), sondern es entstehen an deren Stelle auch nur wenig neue NF_3 -Emissionen.
3. Zu den Bereichen Leiterplattenfertigung und Kältetechnik werden keine emissionsmindernden Annahmen gemacht. Diese PFC-Emissionen gehen in beide Gesamtszenarien mit gleicher Größe ein.

Unter diesen Bedingungen kommt es zwischen 1995 und 2010 für alle Sektoren zusammen zu den niedrigeren PFC-Emissionen, die in Tabelle 65 enthalten sind.

Tab. 65: PFC-Emissionen 1995-2010 nach Herkunft nach Minderungsszenario II in t/a					
Herkunft	PFC	1995	2000	2005	2010
1. Aluminiumhütten	CF_4	209	157	131	124
2. Halbleiterindustrie	CF_4	12	27	27	11
3. Leiterplattenfertigung	CF_4	3,4	3,4	3,4	3,4
Summe	CF_4	224	188	161	139
5. Aluminiumhütten	C_2F_6	21	16	13	12
6. Halbleiterindustrie	C_2F_6	11	31	28	11
Summe	C_2F_6	2525,4	47	41	23
7. Halbleiterindustrie	C_3F_8	0	1	2	3
8. Kältetechnik	C_3F_8	2	15	0,03	0
Summe	C_3F_8	2	16	2	3
Summe alle PFC		258	250	204	165

Die Emissionssumme aller PFC geht zwischen 1995 und 2010 von 258 t auf 165 t zurück. Gegenüber dem Ausgangsjahr 1995 ist dies eine Senkung um 93 t oder um 36%. (Im Szenario I steigen die Emissionen gegenüber 1995 um 82 t oder um 21%.)

Daß die PFC-Emissionen nicht steigen, sondern absolut sogar deutlich sinken, liegt in erster Linie an der Halbleiterindustrie. Sie emittiert im Jahr 2010 nur jeweils 11 t CF_4 bzw. C_2F_6 (Tabelle 65, Zeilen 2 und 6). Das sind gemessen am Szenario I bei CF_4 66 t weniger und bei C_2F_6 sogar 90 t weniger. Von beiden PFC emittieren im Jahr 2010 nach dem Minderungsszenario etwas weniger als im Basisjahr 1995. Die C_3F_8 -Emissionen aus der Halbleiterfertigung bleiben unverändert niedrig (Tab. 65, Zeile 7).

Bei der Aluminiumverhüttung ist der Abstand zwischen Minderungsszenario und BaU-Szenario geringer als bei der Halbleiterfertigung. Die CF_4 -Emissionen sinken statt um 67 t nach Szenario I als Folge der Umstellung der bisher seitenbedienten Schmelzöfen auf Pointfeeder-Zufuhr im Szenario II um 85 t (vgl. Tabelle 65, Zeile 1). Parallel dazu gehen die C_2F_6 -Emissionen aus der Aluminiumelektrolyse im Minderungsszenario von 21 t nicht auf 14 t, sondern auf 12 t zurück (Tabelle 65, Zeile 5).

Die PFC-Emissionen aus der Leiterplattenfertigung und der Kältetechnik verlaufen (voraussetzungsgemäß) im Minderungsszenario nicht anders als im BaU-Szenario.

Tab. 66: PFC-Emissionen 1995-2010 nach Herkunft nach Minderungsszenario II in Mio. t CO_2-Äquivalente				
Herkunft	1995	2000	2005	2010
1. Aluminiumhütten	1,551	1,165	0,969	0,922
2. Halbleiterindustrie	0,174	0,468	0,446	0,193
3. Leiterplattenfertigung	0,022	0,022	0,022	0,022
4. Kältetechnik	0,015	0,103	0	0
Summe	2047,762	2052,758	2057,437	2062,137

In Bezug auf den Treibhauseffekt stellt das Minderungsszenario gegenüber dem BaU-Szenario eine deutliche Entlastung dar. Die Emissionen steigen bis 2010 nicht - wie im BaU-Szenario - auf 2,52 Mio. t CO_2 -Äquivalente, sondern sinken auf 1,137 Mio. t CO_2 -Äquivalente. Gegenüber dem Basisjahr 1995 (1,762 Mio. t CO_2 -Äquivalente) ist dies eine Reduktion um 0,62 Mio. t CO_2 -Äquivalente oder um 35%.

Die Unterschiede zwischen Szenario I und II verdeutlicht das Diagramm 33.

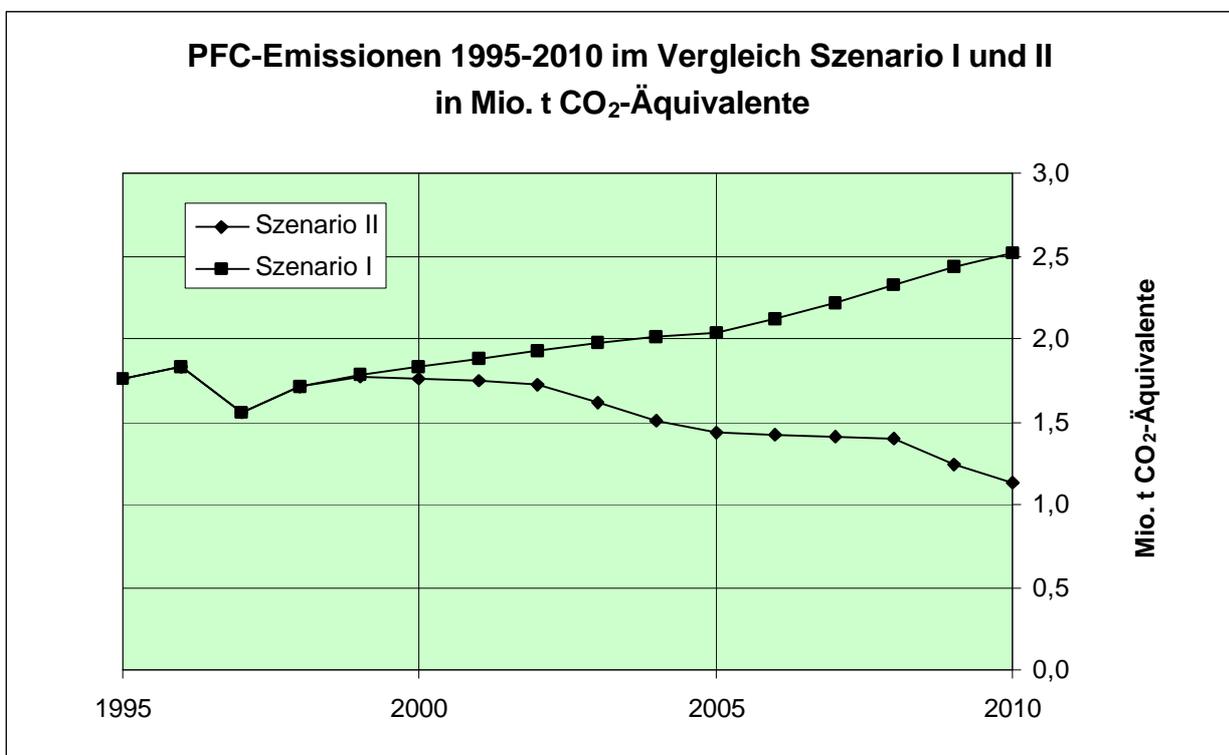


Diagramm 33: PFC-Emissionen 1995-2010 im Vergleich Szenario I und II in Mio. t CO_2 -Äquivalente. Vor allem dank des weitgehenden PFC-Ersatzes in der Halbleiterindustrie sinken ab 2000 die Emissionen im Minderungsszenario (Szenario II), während die Emissionen nach BaU-Szenario I bis auf 2,5 Mio. t CO_2 -Äquivalente im Jahr 2010 weitersteigen.

Die Diagramme 34 und 35 zeigen den großen Anteil der Halbleiterindustrie an der Emissionsminderung im Minderungsszenario II gegenüber dem BaU-Szenario I.

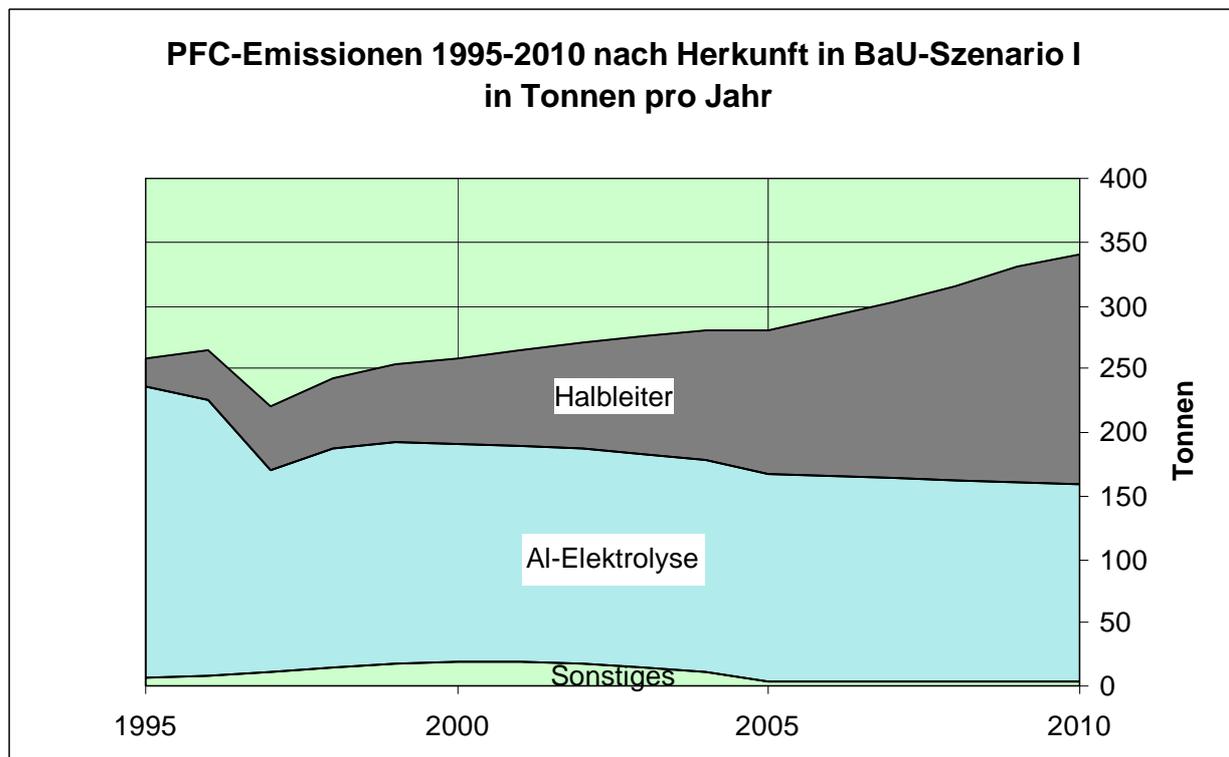


Diagramm 34: PFC-Emissionen 1995-2010 nach Herkunft in BaU-Szenario I in Tonnen pro Jahr. Die Rückgänge der Emissionen aus der Aluminiumelektrolyse werden durch den starken Emissionsanstieg aus der Halbleiterindustrie (dunkle Fläche) überkompensiert.

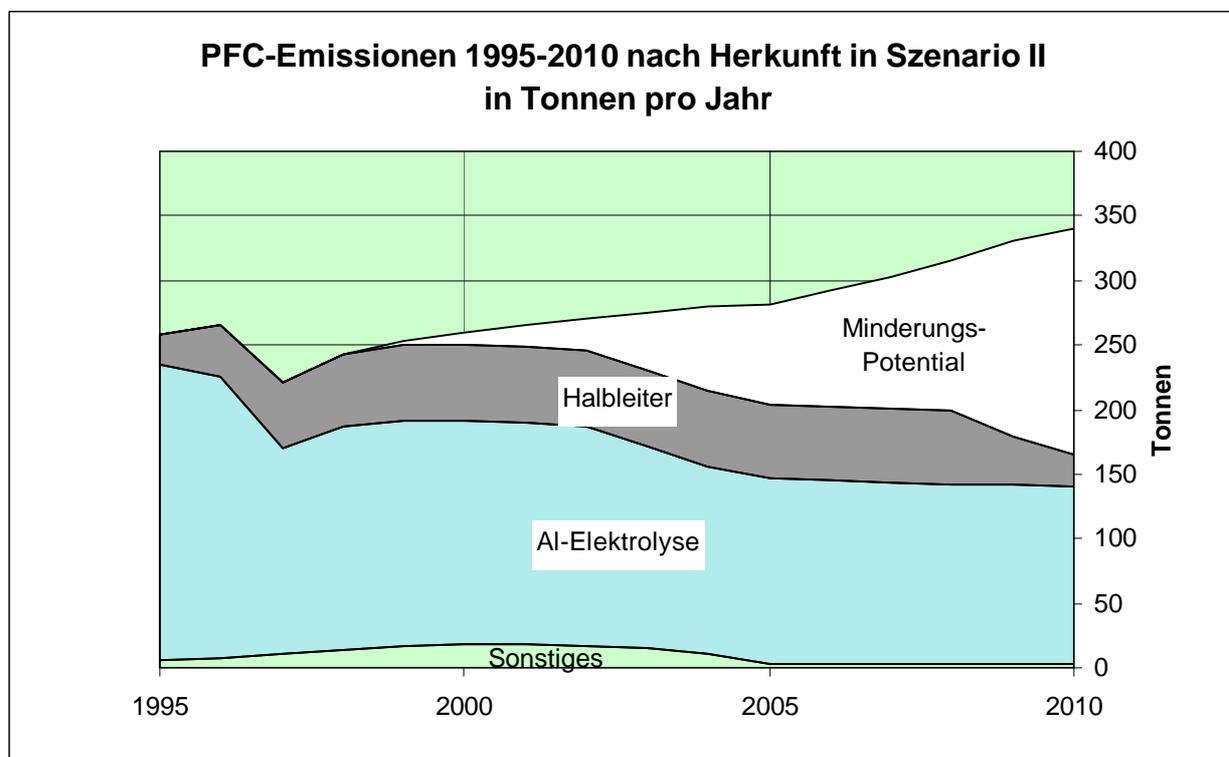


Diagramm 35: PFC-Emissionen 1995-2010 nach Herkunft in Szenario II in Tonnen pro Jahr. Das Minderungspotential (weiße Fläche oben) kommt vor allem durch sinkende PFC-Emissionen aus der Halbleiterindustrie zustande, die seit 2000 nicht mehr zunehmen.

Anhang: Die Jahre 1995 bis 1997

Die Tabellen 67 und 68 dienen der Vervollständigung der umweltrelevanten Emissionsdaten für die Jahre 1996 und 1997.

Emissionen 1995-1997 in Jahrestonnen

Tab. 67: PFC-Emissionen nach Sektoren 1995-1997 in t/a			
	1995	1996	1997
1. Aluminiumverhüttung*	230	218	160
2. Halbleiterindustrie**	22	39	50
3. Leiterplattenfertigung (CF ₄)	0	0	0,1
4. Kältetechnik (C ₃ F ₈)	2	5	8
Summe	258	265	221

* Summe von CF₄ und C₂F₆. ** Summe von CF₄, C₂F₆ und C₃F₈.

Beitrag zum Treibhauseffekt 1995-1997

Tab. 68: PFC-Emissionen nach Sektoren 1995-1997 in Mio. t CO₂-Äquivalente			
	1995	1996	1997
1. Aluminiumverhüttung*	1,551	1,471	1,076
2. Halbleiterindustrie**	0,174	0,307	0,399
3. Leiterplattenfertigung (CF ₄)	0,022	0,022	0,022
4. Kältetechnik (C ₃ F ₈)	0,015	0,032	0,054
Summe	1,762	2063,8322	2064,551

* Summe von CF₄ und C₂F₆. ** Summe von CF₄, C₂F₆ und C₃F₈.

1 CF_4 und C_2F_6 aus der Aluminiumelektrolyse

Die Hauptquelle von CF_4 -Emissionen ist die Aluminiumverhüttung, die auch einen erheblichen Teil der C_2F_6 -Emissionen verursacht. Die Emissionen sind keine Folge gezielter Anwendung der Gase im Produktionsprozeß, sondern entstehen als Nebeneffekt der elektrolytischen Reduktion von Aluminiumoxid (Tonerde) zu Aluminium.

1 Der Anodeneffekt

Zur Verbindung von Kohlenstoff mit Fluor und damit zu CF_4 und C_2F_6 kommt es bei normal verlaufender Aluminiumelektrolyse nicht. Zwar ist der Elektrolyt fluorhaltig. Aber er nimmt an der Reaktion der Kohlenstoff-Elektroden nicht teil. Nur unter besonderen Bedingungen kommt es zur Bildung organischer Fluoride, wenngleich in regelmäßigen Intervallen von Stunden oder mehreren Tagen. Diese Bedingungen sind der Anodeneffekt.

1.1 Die Aluminium-Elektrolyse

Lösungsmittel der Aluminium-Elektrolyse ist eine Mischung, die vor allem aus geschmolzenem Kryolith (Na_3AlF_6) besteht. Dieser bewirkt, daß das in ihm gelöste Aluminiumoxid nicht erst jenseits 2050 °C schmilzt, sondern bereits unterhalb 970 °C.

Eine typische Elektrolysezelle besteht aus einer bis zu 12 Meter langen, bis zu 4 Meter breiten und 1 bis 1,2 Meter tiefen Stahlwanne (Ullmann 1985, 466). Ihr Boden ist als Kathode geschaltet und mit Kohlenstoff ausgekleidet, weil andere Werkstoffe von der heißen Fluoridschmelze rasch zerstört würden. Oberhalb der Wanne ist die Anode angebracht. Diese besteht aus 14 bis 24 großformatigen Kohleblöcken, die in zwei Reihen an stromführenden Stangen in das ca. 20 cm tiefe Elektrolytbad eintauchen. Der Elektrolyt enthält außer Kryolith und weiteren Fluorsalz-Additiven (zur Senkung der Schmelztemperatur) Tonerde (Aluminiumoxid) in einer Konzentration zwischen 1,5 bis 5 Gewichtsprozent. Der Stromfluß von der Anode bewirkt die Elektrolyse des Aluminiumoxids, nämlich die Abscheidung des Aluminiums an der Kathode und des Sauerstoffs an der Anode. Der Sauerstoff entlädt sich als Gas und reagiert (verbrennt) mit dem Anodenkohlenstoff zu CO_2 . Das flüssige Metall sammelt sich am Boden zu einem "Metallbad" von bis zu 20 cm Höhe, von wo es regelmäßig entnommen wird.

An der Oberseite des Bades und um die Anodenblöcke herum bildet sich eine feste Kruste aus erstarrtem Elektrolyt. Diese bis zu 10 cm dicke Schicht schützt das Bad vor Wärmeverlusten und Verdampfungsemissionen und bewahrt den nicht vom Bad benetzten Teil der glühenden Anode vor Oxidation mit Luft. Der Nachteil der Kruste: Sie muß bei jeder Nachdosierung von Tonerde (Oxid) mechanisch aufgebrochen werden und führt, da Teile der aufgebrochenen Kruste ins Bad fallen, zu Schwankungen der Bad-Konzentration. Die feste Kruste löst sich im Bad langsamer als die pulverförmige Oxid-Zugabe. Sie kann sich als Schlamm auf dem Boden des Metallbades als feste Schicht ansammeln, die den Stromdurchgang hemmt und somit die Aluminiumausbeute senkt.

In einer Aluminiumhütte sind üblicherweise zwischen 150 und 600 Elektrolysezellen ("Öfen") in mehreren Linien aneinandergereiht. Diese Öfen werden mit einer konstanten Stromstärke von 100 bis 200 kA versorgt. Der Gleichstrom zwischen den Elektroden weist eine Spannung von 4-5 Volt auf (Grjothheim/Kvande 1993).

1.2 Der plötzliche Spannungsanstieg

Die Zufuhr von Oxid erfolgt nach Maßgabe seines Verbrauchs. Aber exakt nachzudosieren ist schwierig. Überdosierung erhöht die Gefahr der Schlammbildung durch ungelöste Mengen. Unterdosierung kann den sog. Anodeneffekt auslösen. Ein Anodeneffekt tritt bei der Aluminiumelektrolyse dann ein, wenn der Oxid-Gehalt im Elektrolyten unter eine Minimalkonzentration von ca. 1,5% absinkt (Grjotheim/Kvande 1993, 210).

Der Anodeneffekt ist durch einen starken Spannungsanstieg gekennzeichnet. Die Gasblasen unter den Anodenblöcken dehnen sich aus, so daß der eingetauchte Teil der Kohlenstoffblöcke nicht mehr vom Bad benetzt, sondern von einer isolierenden Gasschicht umhüllt wird. Dadurch erhöht sich der elektrische Widerstand an der Schnittstelle Anode/Bad, was wegen der Konstanz der Stromstärke einen Spannungsanstieg verursacht ($U = I \times R$). Aus 5 Volt Normalwert werden 30-40 Volt Überspannung (Tabereaux 1996). Diese reicht aus, um aus dem Elektrolyten Fluor freizusetzen, das mit dem Kohlenstoff der Anodenblöcke zu den Gasen CF_4 und C_2F_6 reagiert. Das Gas an der Anode ändert seine Zusammensetzung von CO_2 zu CO mit einer Beimischung von 5 bis 20% CF_4 (Grjotheim/Kvande 1993, 210). Außerdem entsteht C_2F_6 im Umfang von ca. 10% der CF_4 -Menge (Gibbs/Jacobs 1996, 34).² Der Anodeneffekt mit der Bildung von CF_4 hält an, solange das Anodengas als Film unter der Anode bleibt.

1.3 Löschung und Vermeidung des Anodeneffekts

Für die Beendigung des Anodeneffekts stellt die sofortige Nachdosierung und Feinverteilung von Tonerde im Elektrolyten nur den ersten Schritt dar. Zur Fortsetzung der Elektrolyse muß auch die Gasschicht beseitigt werden. Das geschieht bei modernen Öfen automatisch durch Hub-, Senk- und Schrägbewegungen der Anodenblöcke. Die Dauer eines Anodeneffekts beträgt in der Regel zwei bis vier Minuten. Nur in Ausnahmen muß heute, was früher die Regel war, manuell eingegriffen werden. Meist wird dann in das Bad eine Stange aus frischem Holz getaucht, die so starke Turbulenzen erzeugt, daß sich die Gasschicht auflöst (Aluminium Rheinfelden 1996). Oder es wird aus Stahllanzen Preßluft unter die Anodenblöcke geblasen.

Die Zeiten, in denen der Anodeneffekt das Hauptsignal für die Neubeschickung der Zelle war, sind vorbei. Dennoch ist er auch gegenwärtig in manchen Fällen willkommen. Denn er ist in der Lage, den aus Überdosierung entstandenen Bodenschlamm aufzulösen, die Anodenoberfläche zu glätten oder den Kohleschaum im Bad (heruntergefallener Kohlestaub von den Anoden) zu verbrennen (Barber 1996, 2).

Der Anodeneffekt wird heute aber überwiegend als Störfaktor betrachtet, da er mit verminderter Ausbeute, mit Temperaturanstieg des Bades und mit Produktionsunterbrechung verbunden ist. Seine deutliche Reduzierung wurde möglich, seit - ab 1970 - neue Technologien der kontinuierlichen und mikroprozessorgestützten Dosierung des Aluminiumoxids verfügbar wurden. Durch sie wird schlammbildende Überdosierung vermieden, die einen Anodeneffekt als Reinigungsmechanismus erforderlich macht. Förderlich war außerdem, daß zeitgleich die Ablösung der selbstbackenden Söderberg-Anoden (Härtung beim Prozeß) durch vorgebackene (prebaked) Anoden (Härtung vor dem Prozeß) den Anfall von Kohlestaub einschränkte.

² CF_4 wird während der ganzen 2-4-minütigen Dauer eines Anodeneffektes gebildet. Dagegen entsteht C_2F_6 nur während der ersten Minute, und zwar bis zu einer maximalen Konzentration von 1-2% der Gasschicht (Tabereaux 1996).

Mit der computergesteuerten Punkt dosierung (s.u.) wird das Ziel angestrebt, sowohl die obere Oxidgrenze mit der Gefahr der Verschlammung als auch die untere Oxidgrenze mit dem Auftreten des Anodeneffekts möglichst zu vermeiden. Auf diese Weise kann zwar nicht die Dauer, wohl aber die Häufigkeit des Anodeneffektes vermindert werden.

1.4 Oxidzufuhr - Schlüssel zur Senkung der Anodeneffekt-Frequenz

Seit in Deutschland 1990 die letzten Öfen mit selbstbackenden Söderberg-Anoden stillgelegt wurden, gibt es nur noch drei hinsichtlich der Anodeneffekt-Häufigkeit differierende Ofentypen. Alle verwenden vorgebackene (prebaked) Anoden. Die für den Anodeneffekt relevanten Unterschiede liegen in der Art und Weise der Zufuhr des Aluminiumoxids, die von der Seite, durch die Mitte oder als Punkt dosierung erfolgen kann.³

1.4.1 Oxidzufuhr von der Seite (SWPB)

Mit der in den 60er Jahren eingeführten Seitenbedienung sind in Deutschland immer noch 70 000 t Produktionskapazität für Primäraluminium ausgestattet. Die Oxidzufuhr in die Schmelzöfen erfolgt von der Seite, und die Anoden sind vorgebacken; daher der Name "Sidework Prebake" (SWPB). Nach Öffnung der Abdeckbleche fährt ein Fahrzeug an der Zelle entlang und bricht die Kruste auf. Die Oxiddosierung erfolgt in Intervallen von 4 bis 8 Stunden und ist dementsprechend grob, was Verschlammung begünstigt. Die Anodeneffekt-Häufigkeit liegt bei etwa 1 pro Ofentag (Aluminium Rheinfelden 1996). Daraus resultieren für die SWPB-Technologie typische PFC-Emissionen von 1-1,5 kg CF₄ pro t Primäraluminium (IPAI 1996), die in Deutschland allerdings - Herstellerangaben zufolge - deutlich unterschritten werden.⁴

1.4.2 Einfache Zufuhr durch die Mitte (CWPB)

Mit der ebenfalls in den 60er Jahren entwickelten Dosierung durch die Mitte arbeiteten seit 1990 alle anderen inländischen Öfen. Zu unterscheiden ist zwischen der ursprünglichen Mittebedienung, "Centerwork Prebake" (CWPB), und ihrer Weiterentwicklung zum mittebedienten Point Feeding (PFPB). Die ursprüngliche Zufuhr durch die Mitte (CWPB) bedeutet: Über der Ofenmitte verläuft ein Trägergerüst mit mechanischen Dosierern. Das Krustenbrechen besorgen Balken oder Meißel, die zwischen den beiden Anodenblockreihen herunterstoßen. Das Oxid fließt in abgemessenen Portionen von oben in den Badaufbruch. Die Zufuhrintervalle sind kürzer als bei Seitenbedienung und liegen bei 60 Minuten. Die Anodeneffekthäufigkeit liegt zwischen 0,5 und 1 pro Ofentag (VAW 1996). Daraus resultieren für die CWPB-Technologie typische PFC-Emissionen 0,350-0,600 kg CF₄ sowie zusätzlich 0,035-0,060 kg C₂F₆ pro t Primäraluminium.

1.4.3 Punkt dosierung durch die Mitte (PFPB)

Die Punkt dosierung ("Point Feeder Prebake") ist eine in den 70er Jahren begonnene Weiterentwicklung der Mittedosierung (Grjotheim/Kvande 1993, 80/81). Zwischen den Anodenblöcken angebrachte senkrechte Stößel, die an mehreren Stellen gleichzeitig die Kruste aufbrechen und Oxid zugeben können, werden fast kontinuierlich in Abständen von nur wenigen Minuten und mit einer Oxidzugabe von nur 0,2 bis 2 kg automa-

³ Daten über die eingesetzten Zufuhrtechnologien nach Einzelbetrieben sind dem pro Jahr mehrmals aktualisierten Directory "Primary Aluminium Smelters and Producers of the World" zu entnehmen.

⁴ Laut Umweltbundesamt (1999) betrug 1998 der Emissionsfaktor in deutschen Hütten nur 0,51 kg CF₄ sowie 0,051 kg C₂F₆ pro t Primäraluminium.

tisch betätigt (ebd., 81). Wegen der kurzen Intervalle verkrustet das Dosierloch kaum, was Ungenauigkeiten der Oxidzufuhr durch Krusteneintrag zu vermeiden hilft. Computersteuerung ermöglicht die bedarfsgerechte Nachdosierung und relativ konstante Oxidkonzentrationen im Bad, so daß Anodeneffekte zur Badkontrolle weitgehend wegfallen. Bei Schmelzöfen mit der Pointfeeder-Technologie tritt ein Anodeneffekt nur 1 bis 3 mal wöchentlich auf, d.h. 0,15 bis 0,4 mal pro Ofentag (Aluminium Essen 1996). Daraus resultieren für Pointfeeder-Öfen typische PFC-Emissionen von 0,1 bis 0,25 kg CF₄ sowie zusätzlich 0,01-0,025 kg C₂F₆ pro t Primäraluminium.

2 Emissionen in Deutschland 1995-1997

Zwischen 1995 und 1997 blieb die Kapazität der fünf deutschen Aluminiumhütten konstant bei ca. 580 000 t/a. Die Produktion von Primäraluminium lag in diesen drei Jahren nahe an der Kapazitätsgrenze (s. Tabelle 69, letzte Zeile). Die CF₄-Emissionen gingen dagegen im gleichen Zeitraum von 209 auf 145 t zurück (s. Tabelle 69). Entsprechend sanken auch die C₂F₆-Emissionen: von 21 auf 15 t. Der Beitrag zum Treibhauseffekt sank von 1995 bis 1997 von 1,552 auf 1,076 Mio. t CO₂-Äquivalente.

	1995	1996	1997
CF ₄	209	198	145
C ₂ F ₆ *	21	20	14,5
<i>Emiss. in Mio. t CO₂-Äquiv.</i>	<i>1,552</i>	<i>1,471</i>	<i>1,076</i>
<i>Aluminiumproduktion in t</i>	<i>575 000</i>	<i>576 500</i>	<i>571 900</i>

Quellen: Für CF₄ Umweltbundesamt 1999. Für Aluminiumproduktion GDA 1999.

* C₂F₆ wurde nicht gemessen, sondern generell auf 10% der CF₄-Menge kalkuliert.

Der Emissionsrückgang ist Folge der seit Ende 1994 forciert betriebenen Ofenmodernisierung der deutschen Hütten. Sie hatte im wesentlichen zum Ziel, die Mittebedienung (CWBP) auf die energetisch effizientere und mit weniger Anodeneffekten belastete Punktdosierung (PFPB) umzurüsten. 1995 war erst ein Drittel der mittebedienten Öfen mit Point Feeder ausgerüstet, 1996 war es schon die Hälfte, und 1997 wurde die Umrüstung vollendet (GDA 1999). Von der Ofenkapazität von 580 000 t/a waren damit 510 000 t auf modernen Stand der Oxidzufuhr gebracht worden. Die restlichen 70 000 t/a Kapazität sind Öfen mit Seitendosierung (SWPB), bei denen eine technische Umrüstung auf Punktdosierung eine vollständige Neukonzeption der Öfen erfordert. Eine solche Maßnahme ist, soweit bekannt, auf absehbare Zeit nicht vorgesehen.

Empirische Messung der CF₄-Emissionen 1996

Im zweiten Halbjahr 1996 ließen die Mitgliedsunternehmen des Fachverbandes Primäraluminium im Gesamtverband der Deutschen Aluminiumindustrie (GDA) in allen deutschen Produktionsstätten Messungen der CF₄-Emissionen durchführen. Dabei wurden direkt die CF₄-Emissionen während einzelner Anodeneffekte erfaßt und über diesen Weg die für einen bestimmten Betrieb typische CF₄-Emissionsmenge pro Anodeneffekt bestimmt. Da die Anodeneffekte in allen Betrieben seit vielen Jahren protokolliert werden, konnte die jährliche betriebliche CF₄-Emission als Produkt aus Anzahl der Anodeneffekte und jener betriebstypischen CF₄-Menge pro Anodeneffekt ermittelt werden, und zwar nicht nur für das Meßjahr, sondern für alle zurückliegenden Jahre mit statistischer Erfassung der Anodeneffekte.

Seit einer großangelegten empirischen Messung der CF₄-Emissionen im Jahr 1996 (s. Kasten) liegen für die drei Verfahren SWPB, CWPB und PFPB spezifische Emissionskoeffizienten mit Bezug auf die inländischen Hütten vor (vgl. Tabelle 70).

Tab. 70: CF₄-Emissionskoeffizienten der inländischen Aluminiumhütten in kg/t Al nach Verfahren der Oxidzufuhr			
Verfahren der Oxidzufuhr	SWPB	CWPB	PFPB
kg CF ₄ / t Aluminium	0,51	0,40	0,22

Quelle: UBA 1999.

Abkürzungen: SWPB: Sidework Prebake; CWPB: Centerwork Prebake; PFPB: Point Feeder Prebake. Prebake heißt vorgebacken im Unterschied zu Elektroden, die im Prozeß aushärten.

Die CF₄-Emissionskoeffizienten reichen von 0,51 kg/t Al bei Seitenbedienung (SWPB) bis 0,22 kg/t Al bei Punktdosierung (PFPB). Je nach dem Anteil der drei Ofensysteme an der jährlichen Aluminiumproduktion lassen sich auf diese Weise die CF₄-Emissionen auch ohne erneute Messung einige Jahre lang relativ zuverlässig abschätzen.

So ergeben sich 1997 aus 67 000 t Al von SWPB-Öfen 34 t CF₄ (67 000 x 0,51 kg) und aus 505 000 t Al von PFPB-Öfen 111 t CF₄ (505 000 x 0,22 kg). Die Summe der CF₄-Emissionen beträgt 145 t. Dazu kommen noch 10% C₂F₆-Emissionen.

3 BaU-Emissionsprognose 2010 - Szenario I

Die BaU-Emissionsprognose bis 2010 geht davon aus, daß die 1998 vorhandenen inländischen Kapazitäten für Primäraluminium nach Umfang und Zusammensetzung unverändert fortbestehen. Unveränderte Zusammensetzung bedeutet: Die seitenbedienten Öfen mit einer Kapazität von 70 000 t/a werden im fraglichen Zeitraum nicht auf Punktdosierung umgerüstet. Unveränderter Umfang gegenüber 1998 bedarf kurzer Erläuterung: Die 1998er Kapazitäten sind um 52 000 t/a höher als diejenigen der Jahre 1995-1997 und belaufen sich auf nunmehr 632 000 t/a. (Die Produktion des Jahres 1998 betrug 612 000 t.) Es ist wichtig hervorzuheben, daß es sich bei dieser Ausweitung weder um einen Hütten-Neubau handelte noch um die Wiederinbetriebnahme stillgelegter Hütten. Vielmehr wurde im Rahmen eines bestehenden Werks eine von drei Ofenlinien, die vor mehreren Jahren abgeschaltet worden war, nach durchgreifender Modernisierung wieder kapazitätswirksam (Aluminium Essen 1999).

Die inländischen Hütten decken seit Beginn der 90er Jahre den inländischen Verbrauch nur zu ca. 50% - gegenüber 70% in der ersten Hälfte der 80er Jahre (Metallstatistik 1994, 71). Dennoch ist mit der Wiederinbetriebnahme stillgelegter Hütten oder Hütten-Neubauten nicht zu rechnen. Sofern verstärkte Nachfrage zu völlig neuen Kapazitäten führt, dürften diese, wenn überhaupt, im Ausland errichtet werden.⁵

Andererseits scheint aus gegenwärtiger Sicht mittelfristig auch kein Abbau von Kapazitäten mehr erforderlich. Die inländischen Hütten weisen gegenüber den mit niedrigeren Kosten arbeitenden überseeischen Hütten spezifische Vorteile durch ihre integrierte Produktionsweise auf. Sie verfügen über angeschlossene Gießereien und erzeugen

⁵ Der letzte Neubau einer Elektrolyse-Hütte in Deutschland erfolgte im Jahre 1973. Neubauten unter deutscher Beteiligung erfolgten seitdem nur im Ausland, und zwar wurde zwischen 1989 und 1992 ein Werk mit 215 Tsd. t/a Kapazität in Kanada errichtet und zwischen 1991 und 1993 ein Zubau von 120 Tsd. t/a Kapazität in einer australischen Hütte durchgeführt. (VAW-GB 1989, 31; 1990, 22; 1993, 28)

nicht nur einfache Aluminiumbarren, sondern sind in der Lage, kundenspezifisch zugeschnittene Legierungen und Zwischenprodukte zu liefern (Aluminium Essen 1996). Nachdem seit 1997 alle Elektrolysezellen der inländischen Hütten bis auf 70 000 t/a Kapazitäten seitenbedienter Öfen mit Pointfeeder-Dosiertechnik ausgerüstet sind, sind mittelfristig keine vergleichbaren Modernisierungssprünge mehr zu erwarten, die zu signifikanten Minderungen der Anodeneffekte und der damit verbundenen PFC-Emissionen führen würden. Stattdessen dürften kontinuierlich kleine Verbesserungen an den vorhandenen Techniken (verbesserte Ofensteuerung u.dgl.) realisiert werden.

Die quantitativen Annahmen für das BaU-Szenario I sind folgende:

1. Die Produktionskapazität der inländischen Aluminiumhütten beträgt bis auf weiteres 632 000 t/a. Die Kapazität setzt sich aus 70 000 t/a Kapazität seitenbedienter Elektrolyseöfen (SWPB) und 562 000 t/a Kapazität mittebedienter Elektrolyseöfen mit Punktdosierung (PFPB) zusammen.
2. Die Kapazitätsauslastung durch die Produktion beträgt aufgrund der Erfahrungen vergangener Jahre generell 98%. Produktionsschwankungen werden nicht erfaßt.
3. Im Jahr 1998 beträgt der Emissionskoeffizient "kg CF₄ pro Tonne Aluminium" für die SWPB-Technik 0,51 und für die PFPB-Technik 0,22. C₂F₆ entsteht jeweils im Umfang von 10% der CF₄-Menge. (Weitere PFC-Gase werden nicht berücksichtigt).
4. Bei beiden Dosierverfahren findet eine kontinuierliche technische Weiterentwicklung statt, die sich in einer jährlichen Senkung der Emissionskoeffizienten um 1% gegenüber dem Vorjahr ausdrückt. In 2010 beträgt der Wert für SWPB noch 0,46 und für PFPB noch 0,20 kg CF₄ pro Tonne Aluminium.

Unter diesen Bedingungen ergeben sich für die PFC-Emissionen 1995-2010 die Werte der Tabelle 71. Zu beachten gilt, daß es sich ab 2000 um Schätzwerte handelt.

Tab. 71: CF₄- und C₂F₆-Emissionen aus der Aluminiumverhüttung 1995-2010 in t/a und Mio. t CO₂-Äquivalente nach BaU-Szenario I				
	1995	2000	2005	2010
CF ₄ in t	209	157	149	142
C ₂ F ₆ in t	21	16	15	14
Mio. t CO ₂ -Äquivalente*	1,551	1,165	1,108	1,054

* GWP von CF₄: 6500; GWP von C₂F₆: 9200.

Zwischen 1995 und 2010 sinken die CF₄-Emissionen aus der inländischen Aluminium-Schmelzflußelektrolyse um 32%, nämlich von 209 auf 142 t. Bei C₂F₆ beträgt der entsprechende Emissionsrückgang 21 t zu 14 t.

Die Emissionsentwicklung in der Phase 1995-1997 und in der Zeit danach ist durch unterschiedliche Faktoren geprägt. Der starke Emissionsrückgang zwischen 1995 und 1997 beruht auf der Vollendung der Umstellung einfacher mittebedienter Schmelzöfen (CWPB) auf moderne Punktdosierung (PFPB), die pro Tonne Aluminium nur etwa die Hälfte der früheren CF₄-Emissionen verursacht.

In den 13 Jahren von 1997 bis 2010 nehmen die PFC-Emissionen insgesamt um ca. 10% ab. Der im Jahre 1998 produktionswirksam gewordene Kapazitätsaufbau um 52 000 t/a, der zu über 11 t neuer CF₄-Emissionen führte, hält den rückläufigen

Emissionstrend der PFC nur vorübergehend auf. Der Rückgang seit 1998 beruht ausschließlich auf kontinuierlichen Verbesserungen der beiden Dosiersysteme für das Aluminiumoxid, die pro Jahr für einen Rückgang von 1% gegenüber dem Vorjahr bei den PFC-Emissionen sorgen. Der durchschnittliche Emissionsfaktor (gewichteter Mittelwert aus beiden Dosieretechniken) sinkt zwischen 1998 und 2010 von 0,257 auf 0,229 kg CF₄/t Al. 1995 betrug er noch 0,363 kg CF₄/t Al.

Der Beitrag zum Treibhauseffekt durch PFC aus der Aluminiumverhüttung sinkt zwischen 1995 und 2010 von 1,551 auf 1,054 Mio. t CO₂-Äquivalente, mithin um 32%.

4 Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II

Die Bedingungen für eine stärkere Emissionsminderung als nach BaU-Szenario I lassen sich in einem Satz zusammenfassen: Von Szenario I unterscheidet sich das Minderungsszenario einzig durch die Annahme, daß auch die restlichen seitenbedienten Elektrolyseöfen (SWPB) auf mittebediente Punktdosierung (PFPB) umgestellt werden. Es wird unterstellt, daß diese Maßnahme nach dem Jahr 2000 erfolgt. Im Szenario II wird dafür (willkürlich) der Zeitraum 2003 bis 2005 angesetzt.

Die Annahmen zu Gesamtkapazität, Kapazitätsauslastung, Emissionskoeffizienten (kg PFC pro t Aluminium) und zu deren jährlicher Senkung (um 1% gegenüber dem Vorjahr) sind die gleichen wie in Szenario I.

Die Umrüstung der letzten 70 000 t Produktionskapazität von Seite- auf Punktdosierung gilt zwar pro Ofen als zweieinhalb Mal so teuer wie die Umrüstung von einfacher Mittebedienung (CWPB) aus (Harnisch et al. 1998, 13). Das ist aber nur ein Bruchteil dessen, was die Umrüstung von - in den 80er Jahren in Deutschland ersetzen - Söderberg-Öfen auf Punktdosierung kostete. Nach der gleichen Literaturquelle sind diese Umrüstkosten etwa zehn Mal so hoch.

Das Szenario II bezieht keine weiteren PFC-emissionsmindernden Faktoren ein. Der für Punktdosierung in deutschen Hütten 1998 verwendete CF₄-Emissionskoeffizient "0,22 kg CF₄/t Al" ist zwar im internationalen Vergleich nicht Weltspitze. In der Literatur sind spezifische Emissionsfaktoren bei bestverfügbarer Technik mit 0,05 kg CF₄/t Al und weniger zu finden (u.a. bei Harnisch et al. 1998). Allerdings stehen den Verfassern vorliegender Studie zu wenig Informationen über die Bedingungen zur Verfügung, wie solche Emissionsfaktoren auf die inländische Gesamtkapazität zu übertragen wären. Szenario II verzichtet auch darauf, völlig neue Schmelzverfahren wie z.B. "inerte Anoden" aus Metall (Beck 1995), die keine PFC bilden, zu berücksichtigen.

Aus der Umrüstung der letzten 70 000 t/a Produktionskapazität von Seitenbedienung (SWPB) auf Punktdosierung würden ab 2005 niedrigere Werte für die PFC-Emissionen als in Szenario I resultieren (s. Tabelle 72).

Tab. 72: CF₄- und C₂F₆-Emissionen aus der Aluminiumverhüttung 1995-2010 in t/a und Mio. t CO₂-Äquivalente nach Szenario II				
	1995	2000	2005	2010
CF ₄ in t	209	157	131	124
C ₂ F ₆ in t	21	16	13	12
Mio. t CO ₂ -Äquivalente*	1,551	1,165	0,969	0,922

* GWP von CF₄: 6500; GWP von C₂F₆: 9200.

Nach Szenario II sinken die CF_4 -Emissionen zwischen 1995 und 2010 von 209 auf 124 t. Die C_2F_6 -Emissionen gehen von 21 auf 12 t zurück. Das ist ein relativer Rückgang um über 40% gegenüber 1995. (In Szenario I beträgt der Rückgang 32%.)

Der Beitrag zum Treibhauseffekt sinkt von 1,551 auf 0,922 Mio. t CO_2 -Äquivalente.

Bis zum Jahr 2000 unterscheiden sich die Emissionen nicht vom BaU-Szenario I (vgl. Tabelle 71) Die emissionsmindernde Umstellung seitens bedienter auf Pointfeeder-Elektrolysezellen findet gemäß der Annahme für Szenario II erst zwischen 2003 und 2005 statt. Folglich liegen die Emissionswerte nach Szenario II erst im Jahr 2005 und danach unter den Beträgen nach Szenario I (vgl. Tabelle 72).

Der Abstand zwischen Szenario I und II in Bezug auf die PFC-Emissionen beträgt 12,5% im Jahr 2010. Die Minderemissionen belaufen sich auf 18 t CF_4 und 2 t C_2F_6 bzw. 0,132 Mio. t CO_2 -Äquivalente. Daß die Emissionsminderung nicht höher ausfällt, resultiert zum einen daraus, daß die Umrüstung der 70 000 t/a SWPB-Kapazität auf Pointfeeder-Technik nur 11% der Gesamtkapazität betrifft. Zum anderen ist der Unterschied zwischen den Emissionsfaktoren der SWPB- und der PFPB-Technik in Deutschland, anders als in anderen Ländern, nicht sehr groß. Der SWPB-Emissionsfaktor lag 1998 bei 0,51, der PFPB-Emissionsfaktor bei 0,22 kg CF_4 /t Al.

Diagramm 36 zeigt grafisch, ab wann und inwieweit sich die PFC-Emissionen im Vergleich der beiden Szenarien unterscheiden. Es wird deutlich, daß die effektive Emissionsminderung in der Hauptsache zwischen 1995 und 1997 erfolgte und das - nicht sehr große - Minderungspotential erst zwischen 2000 und 2005 wirksam wird.

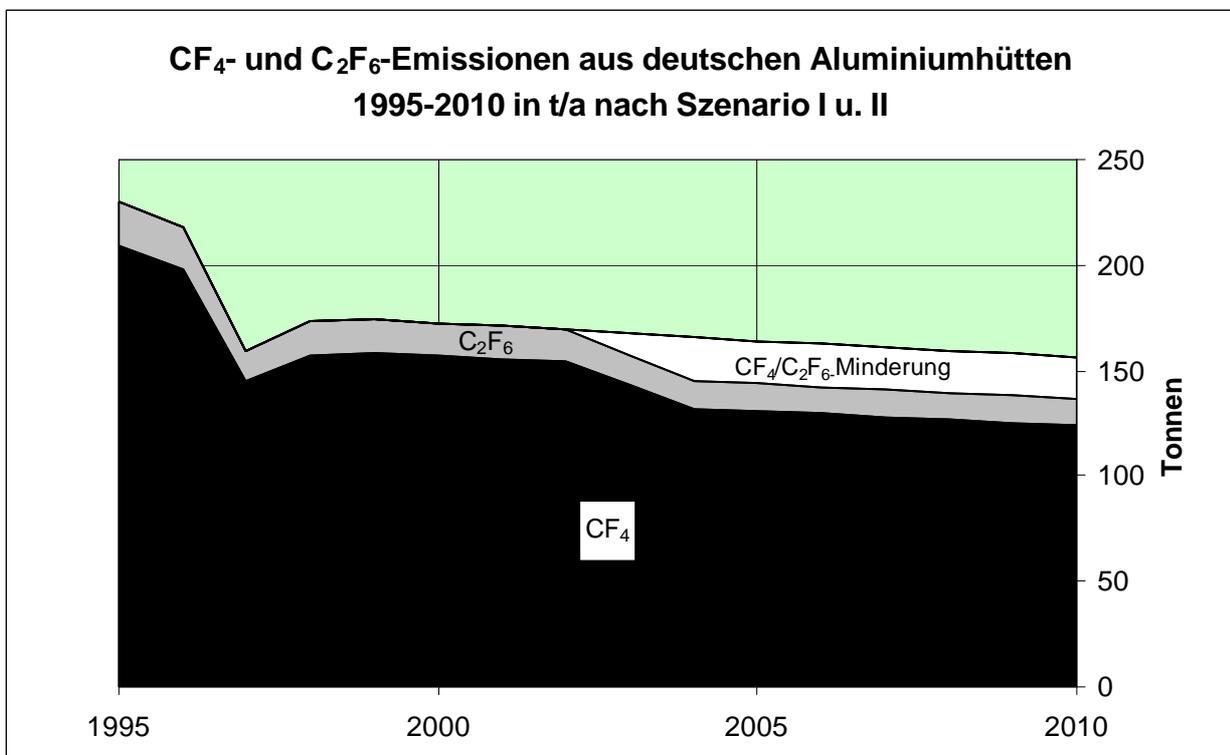


Diagramm 36: CF_4 - und C_2F_6 -Emissionen aus dt. Aluminiumhütten 1995-2010 in t/a nach Szenario I u. II. Zwischen 1995 und 1997 gehen die Emissionen von CF_4 (schwarze Fläche unten) und von C_2F_6 (graue Fläche darüber) dank Punktdosierung stark zurück. Der leichte Anstieg 1998 ist Folge einer Kapazitätserweiterung. Ab 2003 beginnt die mögliche Emissionsminderung nach Szenario II (weiße Fläche) durch Umstellung der Gesamtkapazität auf Punktdosierung.

2 PFC als Halbleiter-Ätzgase

Spezielle Ausführungen über die PFC-Gase und die Bedingungen ihrer Emissionsentwicklung finden sich im abschließenden Teil IV, wo alle treibhauswirksamen fluorierten Gase der Halbleiterindustrie zusammen behandelt werden. Daher wird an dieser Stelle auf eine nähere Untersuchung zugunsten einer Darstellung der Emissionen in Kurzform verzichtet. Die Daten der Tabellen 73, 74 und 75 sind dem Teil IV entnommen.

Perfluorierte Kohlenwasserstoffe werden in relativ großen Mengen gezielt als Ätzgase in der Halbleiterherstellung eingesetzt. Sie dienen hauptsächlich der regelmäßigen Zwischenreinigung von CVD-Plasmakammern (CVD: Chemical Vapor Deposition). Die wichtigsten PFC sind C_2F_6 und CF_4 . Als Ersatzstoff für C_2F_6 wird seit 1997 auch C_3F_8 eingesetzt. Sowohl C_2F_6 als auch C_3F_8 führen bei der Umsetzung im Plasma zur Neubildung von nicht zu vernachlässigenden CF_4 -Mengen als Nebenprodukt.

Bemerkenswert sind die hohen Emissionen von C_2F_6 , die bereits 1996 die aus der Aluminiumelektrolyse stammenden Mengen übertrafen (vgl. Tabelle 73, Zeile 2). Nach der BaU-Emissionsprognose (Tabelle 74) werden sie bis auf 101 t im Jahr 2010 zunehmen. Auch der nach dem BaU-Szenario prognostizierte Anstieg der CF_4 -Emissionen auf 77 t im Jahr 2010 ist beachtlich. Nur die BaU-Szenarien betrachtet, werden die PFC-Emissionen (CF_4 , C_2F_6 und C_3F_8) aus der Halbleiterindustrie diejenigen aus der Aluminiumverhüttung (vgl. Tabelle 71) im Jahr 2010 um fast 0,4 Mio. t CO_2 -Äquivalente übersteigen.

Anders sieht der Emissionsvergleich für 2010 nach den jeweiligen Minderungsszenarien aus: Die PFC-Emissionen aus der Halbleiterherstellung betragen dann nur 0,193 Mio. t CO_2 -Äquivalente (Tabelle 75), während die PFC-Emissionen aus der Aluminiumelektrolyse 4,5-mal so groß sind: 0,922 Mio. t CO_2 -Äquivalente (Tabelle 72).

1 Verbrauch und Emissionen in Deutschland 1995-1997

Tab. 73: Verbrauch und Emissionen von PFC in der Halbleiterindustrie 1995-1997 in t/a						
	1995		1996		1997	
	Verbrauch	Emission	Verbrauch	Emission	Verbrauch	Emission
1. CF_4 in t	15	12*	29	21*	34	23*
2. C_2F_6 in t	20	11	37	19	56	27
3. C_3F_8 in t	0	0	0	0	0,3	0,1
Summe	35	11	66	19	90,3	27,1
Mio. t CO_2 -Äquiv.		0,174		0,307		0,399

* Unzersetztes Originalgas und Neubildung aus der Plasmazersetzung von C_2F_6 und C_3F_8 .

Die Differenz zwischen Verbrauch und Emission resultiert erstens aus der nur partiellen chemischen Umsetzung im Plasmareaktor und zweitens aus der Wirkung nachgeschalteter Abgasreinigungsanlagen.

2 BaU-Emissionsprognose 2010 - Szenario I

Die Annahmen für die Szenarien I und II sind ebenfalls in Teil IV dargestellt. Hier werden nur die Resultate in Bezug auf die Emissionsmengen präsentiert.

Nach BaU-Szenario I ergeben sich bis 2010 die Emissionen der Tabelle 74:

Tab. 74: PFC-Emissionen aus der Halbleiterindustrie 1995-2010 nach BaU-Szenario I in t/a				
	1995	2000	2005	2010
1. CF ₄ *	12	31	50	77
2. C ₂ F ₆	11	36	62	101
3. C ₃ F ₈	0	1	2	3
Summe	23	68	114	181
<i>Mio. t CO₂ Äquivalente</i>	<i>0,174</i>	<i>0,542</i>	<i>0,904</i>	<i>1,445</i>

* Unzersetztes Originalgas und Neubildung aus der Plasmazersetzung von C₂F₆ und C₃F₈.

Die PFC-Emissionen steigen zwischen 1995 und 2010 von 23 auf 181 t.

3 Relative Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II

Nach dem Minderungsszenario ergeben sich ab 2000 die niedrigeren Emissionen lt. Tabelle 75. Sie betragen im Jahre 2010 für alle PFC 25 t bzw. 0,193 Mio. t CO₂-Äquivalente.

Tab. 75: PFC-Emissionen aus der Halbleiterindustrie 1995-2010 nach Minderungsszenario II in t/a				
	1995	2000	2005	2010
1. CF ₄ *	12	27	27	11
2. C ₂ F ₆	11	31	28	11
3. C ₃ F ₈	0	1	2	3
Summe	23	59	57	25
<i>Mio. t CO₂ Äquivalente</i>	<i>0,174</i>	<i>0,468</i>	<i>0,446</i>	<i>0,193</i>

* Unzersetztes Originalgas und Neubildung aus der Plasmazersetzung von C₂F₆ und C₃F₈.

Das Minderungsszenario führt bei den PFC-Emissionen im Jahr 2010 zu einer Entlastung von 156 t oder 86% gegenüber Szenario I.

Der Beitrag zum Treibhauseffekt beträgt dann statt 1,445 Mio. t CO₂-Äquivalente (Szenario I) nur 0,193 Mio. t.

Die Hauptursache der - möglichen - Emissionssenkung ist der Umstieg von PFC auf NF₃ bei der Reinigung der Plasmakammern. NF₃ seinerseits läßt sich durch hocheffektive und preiswerte neue Plasmaverfahren im Unterschied zu PFC chemisch zu 98%-99% zersetzen, ohne daß Rückreaktion (Rekombination) eintritt (Air Products 1999).

Es sei angemerkt, daß die zusätzlichen NF₃-Emissionen, die im Minderungsszenario durch den PFC-Ausstieg ab 2000 entstehen, im Jahr 2005 nur 1 t und im Jahr 2010 rd. 2 t betragen.

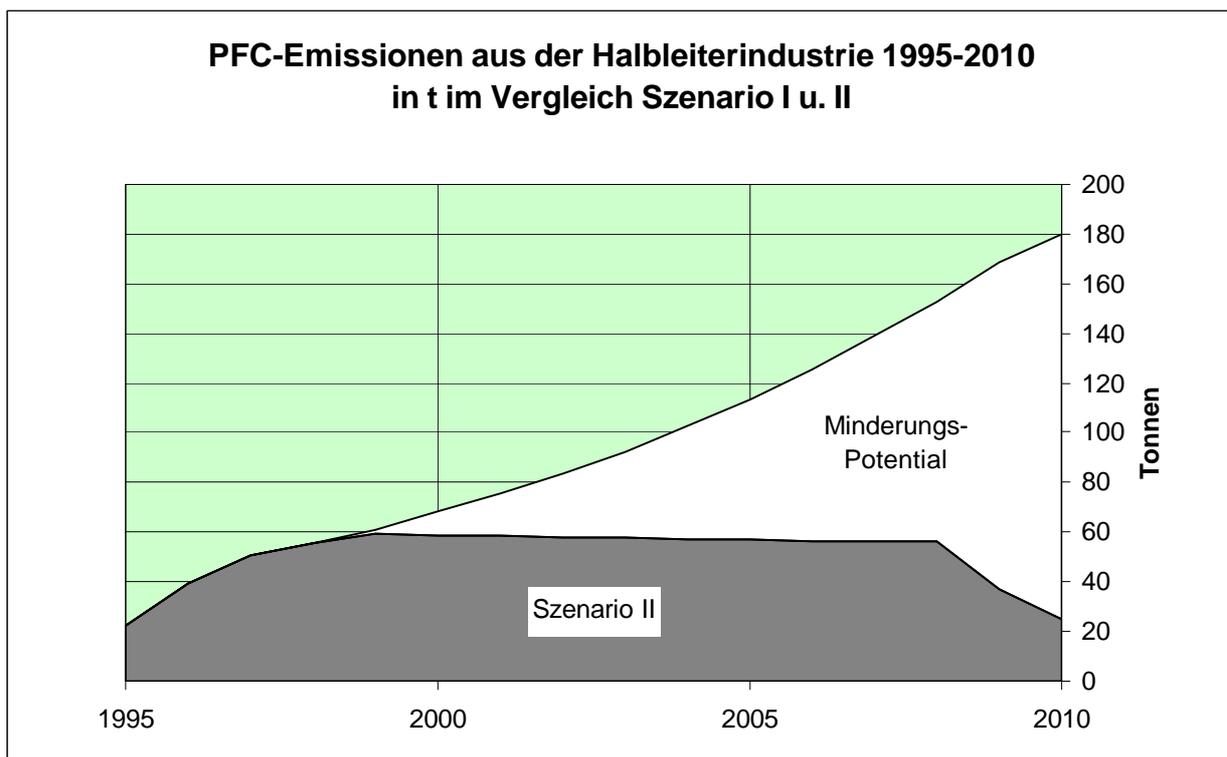


Diagramm 37: PFC-Emissionen aus der Halbleiterindustrie 1995-2010 in t im Vergleich Szenario I u. II. Im Unterschied zum BaU-Szenario, wo die Emissionen bis auf 181 t (2010) ansteigen, bleiben diese im Minderungsszenario ab 2000 konstant und sinken ab 2009. Aus der Differenz entsteht im Jahr 2010 ein Minderungspotential (weiße Fläche) von 156 t.

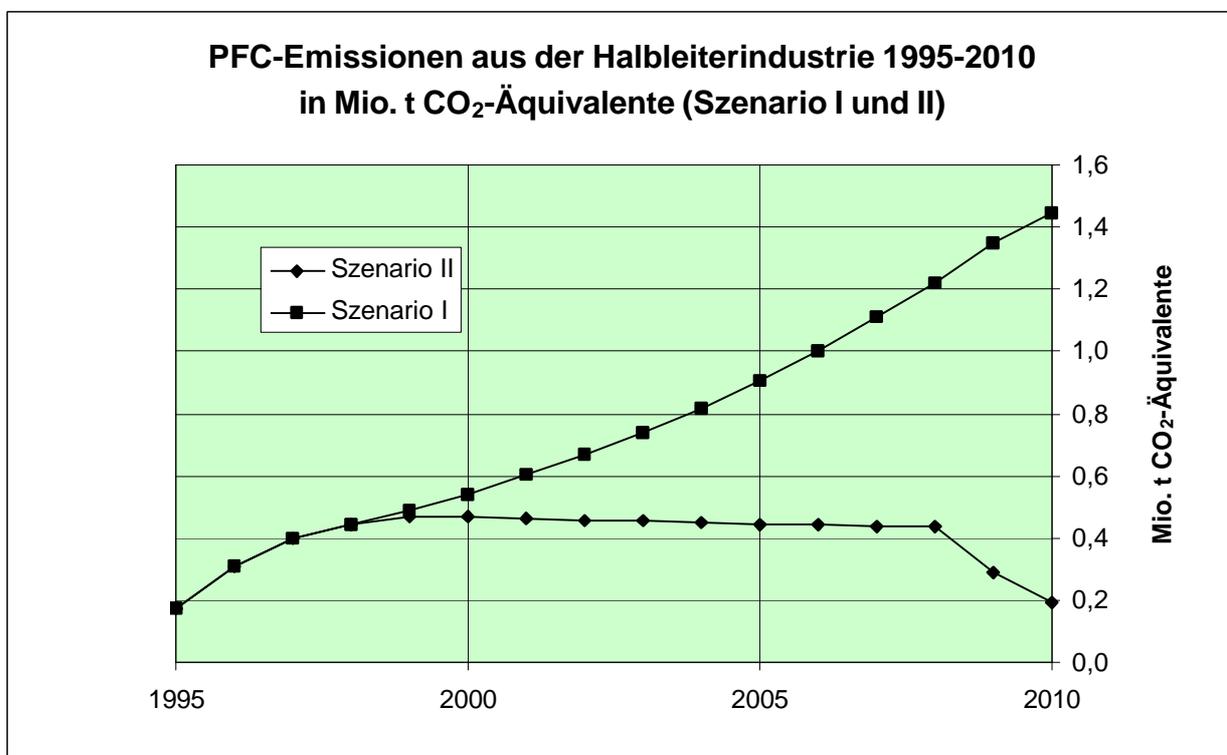


Diagramm 38: PFC-Emissionen aus der Halbleiterindustrie 1995-2010 in Mio. t CO₂-Äquivalente (Szenario I und II). Die Emissionen steigen bis 2010 im BaU-Szenario auf 1,445 Mio. t CO₂-Äquivalente an, im Minderungsszenario betragen sie 2010 nur 0,193 Mio. t.

3 CF₄ in der Leiterplattenfertigung

In der Elektronik findet ein weiterer gezielter Einsatz von CF₄ als Plasmaätzgas statt, nämlich beim sog. Desmearing in der Leiterplattenfertigung.

Unter Desmearing wird die Reinigung von Bohrlöchern in mehrschichtigen Leiterplatten (Multilayer) in Niederdruckplasmakammern verstanden. Dabei werden Kunststoffspäne aus Epoxid- oder Polyimidharzen in den abwechselnd aus Kunststoff- und Kupferschichten bestehenden Leiterplatten weggeätzt, um eine bessere Anbindung des Kupfers bei der anschließende Verdrahtung zu ermöglichen (plasonic 1999).

Dieses Verfahren wird von größeren Leiterplattenherstellern anstelle naßchemischer Prozesse praktiziert. Das Plasmagas besteht in der Regel aus 20-30% CF₄ und 70-80% Sauerstoff (Technics Plasma 1996). Bisher gibt es nur wenige Durchlaufanlagen, die rund um die Uhr in Betrieb sind. In den meisten Fällen handelt es sich um diskontinuierlich betriebene Anlagen ("Batch"-Anlagen) mit Gasdurchsätzen von ca. 100 ml pro Minute, deren Zahl auf ca. 50 geschätzt wird (Buck Plasma Electronic 1996).

Von Experten wird der CF₄-Jahresverbrauch in Deutschland für dieses Verfahren auf 4 Tonnen im Jahr 1995 geschätzt⁶, und zwar ohne absehbare Zuwachs- oder Rückgangstendenzen in der Zukunft (plasonic 1999).

In der Leiterplattenfertigung gibt es zwar alkalische Abgaswäscher zum Auffangen der Reaktionsprodukte, aber keine Anlagen, die das nicht umgesetzte oder rekombinierte CF₄ im Abgas spalten könnten (plasonic 1999). Wird für CF₄ die gleiche Umsetzung im Plasmareaktor wie bei der Halbleiterfertigung unterstellt, nämlich 15% (Air Products 1999), dann emittieren 85% des zugeführten CF₄-Gases unverändert bzw. rekombiniert im Abgas der Prozeßkammer.

Tab. 76: Verbrauch und Emissionen von CF₄ in der Leiterplattenfertigung 1995-2010

	1995 ff.	2010
Verbrauch in t	4	4
Emissionen in t	3,4	3,4
<i>Emiss. in Mio. t CO₂-Äquivalente</i>	<i>0,022</i>	<i>0,022</i>

Quellen: siehe Text.

Von den jährlich verbrauchten 4 t CF₄ emittierten 3,4 t bzw. 0,022 Mio. t CO₂-Äquivalente.

Der Emissionswert wird als mittelfristig (bis 2010) konstant angesehen, so daß keine getrennte Emissionsabschätzung nach einem BaU-Szenario und einem Minderungsszenario durchgeführt wird.

⁶ CF₄ wird außerdem in geringen Mengen für die Plasmareinigung außerhalb der Elektronik eingesetzt, und zwar als Additiv zu Sauerstoff zur Entfettung von Metalloberflächen.

4 C₃F₈ als Kältemittel

Seit 1993 wird C₃F₈ (R-218) im Zuge des FCKW-Ersatzes als Gemischkomponente in Drop-In-Kältemitteln eingesetzt. Drop In bedeutet: Die bestehende Kälte- oder Klimaanlage, die bisher mit FCKW lief, kann mit dem PFC-haltigen Gemisch ohne größere technische Anpassungsmaßnahmen weiterbetrieben werden.

Obwohl Kältemittel mit den PFC R-116 und R-218 von mehreren Herstellern angeboten werden (DuPont, ICI, Elf Atochem)⁷, werden in Deutschland nur die Produkte des Herstellers Rhodia in nicht zu vernachlässigenden Mengen verkauft. R-218 kommt in Anteilen zwischen 9% und 39% in drei Rhodia-Gemischen vor, deren Hauptkomponenten in zwei Fällen HFKW⁸ und in einem Fall HFCKW sind:

- im R-12-Ersatzkältemittel R-413A mit 9% neben R-134a und Isobutan.
- im R-502-Ersatzkältemittel R-403B mit 39% neben R-22 (HFCKW!) und Propan.
- im R-13B1-Ersatzkältemittel "Isceon 89" mit 9% neben R-125 und Propan.

Das Haupteinsatzgebiet von R-413A ist der R-12-Ersatz in der stationären Gewerbekälte und der Fahrzeugklimatisierung (Schwarz/Leisewitz 1998). Isceon 89 dient als Drop In in Tiefkühlanlagen. Das Gemisch R-403B wird als Ersatz für das FCKW-haltige Kältemittel R-502 eingesetzt.

Da die Masse der R-218-haltigen Kältemittel in Deutschland nur von einem einzigen Anbieter stammt (Rhodia), werden die Verbräuche und Emissionen von R-218 zusammengefaßt präsentiert, nicht getrennt nach den drei Kältemischungen.

1 Verbrauch und Emissionen in Deutschland 1995-1997

Tab. 77: Verbrauch und Emissionen von C ₃ F ₈ (R-218) als Kältemittel-Komponente 1995-1997 in t						
	1995		1996		1997	
	Verbrauch	Emission	Verbrauch	Emission	Verbrauch	Emission
C ₃ F ₈ (R-218) in t	11	2	17	5	20	8
Mio. t CO ₂ -Äquiv.		0,015		0,032		0,054

Der Verbrauch von R-218 als Gemischkomponente stieg 1995-1997 von 11 auf 20 t. Die Emissionen, deren Raten für Bestands- und Entsorgungsemissionen die gleichen wie in Teil I (Kapitel 1) dieser Ausarbeitung sind, stiegen im gleichen Zeitraum von 2 auf 8 t. Sie tragen zum Treibhauseffekt 0,015 bis 0,054 Mio. t CO₂-Äquivalente bei.

⁷ Es handelt sich um die R-22-haltigen Kältemischungen 412A und 509A sowie um die R-23-haltigen 508A und 508B. R-22 ist ozonschichtschädigend. R23 hat ein sehr hohes GWP.

⁸ Die HFKW in diesen Gemischen (R-134a und R-125) sind im Teil I dieser Studie berücksichtigt.

2 Emissionsprognose bis 2010

Die drei genannten C_3F_8 -haltigen Kältemittel sind durchweg Ersatzstoffe für vollhalogenierte FCKW zum Weiterbetrieb von Altanlagen. Sie werden nur solange neu eingesetzt, wie der FCKW-Ersatz dauert. Dieser ist gegenwärtig, d.h. im Jahre 1999, bis auf wenige Ausnahmen abgeschlossen. Daher ist der Neuverbrauch auf das Niveau der Nachfüllungen für Betriebsverluste zurückgegangen. Die Emissionen sinken weiter im Zuge der Verschrottung der Kälte- und Klimaanlageanlagen. Da es sich um alte Anlagen handelt, ist nach 2005 mit keinen Emissionen mehr zu rechnen.

Zwar müssen in Zukunft auch die HFCKW in kälte- und climatechnischen Anlagen ersetzt werden, besonders der HFCKW-22. Dieser darf bereits ab dem Jahr 2000 nicht mehr in Neuanlagen gefüllt werden und muß bis 2010 auch aus Altanlagen durch ozonschichtneutrale Kältemittel ersetzt werden. Das Ersatz-Kältemittel für R-22, das der Anbieter Rhodia unter dem Namen Isceon 59 anbietet, ist allerdings ein Gemisch aus den HFKW-125, 134a und Isobutan, somit ohne PFC. (Rhodia 1998) Daher sind im Zuge des HFCKW-Ersatzes keine neuen Verbräuche und Emissionen von R-218 zu erwarten, sofern nicht andere Anbieter mit PFC-haltigen Gemischen in nennenswertem Umfang auf den Markt kommen. Dies wird nachfolgend ausgeschlossen.

Die Emissionen von PFC (R-218) betragen lt. Tabelle 78 im Jahr 2000 noch 15 t. Sie sinken bis 2005 auf 0,03 t ab. Danach finden keine mehr statt.

Tab. 78: Emissionen von C_3F_8 (R-218) als Kältemittel-Komponente 1995-2010 nach BaU-Szenario I in t/a				
	1995	2000	2005	2010
C_3F_8 (R-218) in t	2	15	0,03	0
<i>Emiss. in Mio. t CO₂-Äquiv.</i>	<i>0,015</i>	<i>0,103</i>	<i>0,000</i>	<i>0</i>

Im Spitzen-Emissionsjahr 2000 betragen die treibhauswirksamen Emissionen 0,103 Mio. t CO₂-Äquivalente.

Eine Unterscheidung in zwei Szenarien analog zu den HFKW-Emissionen aus der stationären Kälte- und Klimatechnik ("Business as Usual" und "Emissionsminderung durch eine ab 2002 schrittweise eingeführte Wartungspflicht für Kälte- Klimaanlageanlagen") ist für R-218-haltige Kältemischungen so gut wie bedeutungslos, weil deren Emissionen nach 2002 ohnehin gegen Null tendieren.

Nachweise PFC

- Air Products plc., Walton-on-Thames, pers. Mitt. (J. Stienstra) 17.8.1999;
- Aluminium Essen GmbH, Fachgespräch mit K. Ehrke, B. Josefiak sowie R. Buchholz (Fachverband Primäraluminium), Essen, 28.6.1996;
- Aluminium Essen GmbH, Essen, pers. Mitt. 25.8.1999;
- Aluminium Rheinfelden GmbH, Rheinfelden (Baden), pers. Mitt. 5.12.1996;
- Barber, M. A. (Alcan International Limited), Alcan's PFC Emission Reduction Program. A Case Study, Vortrag auf dem U.S. EPA workshop on PFCs, Washington DC, May 8-9, 1996;
- Beck, T.R.: A non-consumable metal anode for the production of aluminium with low-temperature fluoride melts, *Light Metals* 1995, 355-360;
- Buck Plasma Electronic, Neuenburg, pers. Mitt. 22.4.1996;
- GDA (Gesamtverband der Deutschen Aluminiumindustrie e.V.), Fachverband Primäraluminium, Düsseldorf, pers. Mitt. 16.8.1999;
- Gibbs, M. (ICF Inc.) and Jacobs, C. (US EPA), Reducing PFC Emissions from Primary Aluminium Production in the United States, in: *Light Metal Age*, February, 1996, 26-34;
- Grjothem, K., Kvande, H. (Eds.), *Introduction to Aluminium Electrolysis*, Düsseldorf 1993;
- Harnisch J., Ian Sue Wing, Henry D. Jacoby, Ronald G. Prinn: Primary Aluminium Production: Climate Policy, Emissions and Costs, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report No. 44, December 1998;
- Harnisch, J., Die globalen atmosphärischen Haushalte der Spurengase Tetrafluormethan (CF₄) und Hexafluorethan (C₂F₆), Göttingen 1996;
- Harnisch, J./Eisenhauer, A.: Natural CF₄ and SF₆ on Earth, in: *Geophysical Research Letters*, Vol. 25, No. 13, p. 2401-2404, July 1, 1998;
- IPAI (International Primary Aluminium Institute): Anode effect and PFC emission survey 1990-1993, London 1996;
- Metallstatistik 1983-1993 der Metallgesellschaft AG, 81. Jahrgang, Frankfurt am Main 1994;
- plasonic Oberflächen GmbH, Gerlingen, pers. Mitt. 20.5.1999;
- Primary Aluminium Smelters and Producers of the World (Directory), compiled by R. Pawlek, basic work updated by supplements several times a year, Düsseldorf 1999, update 12;
- Rhodia GmbH, Frankfurt am Main, pers. Mitt. 3.7.1998;
- Schwarz, W./Leisewitz, A. (Öko-Recherche): R12-Ersatz bei Altanlagen von 1996 bis Mitte 1998, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin, August 1998;
- Tabereaux, A.T. (Reynold Metals), Relationship Between Operating Parameters and Emissions, Vortrag auf dem U.S. EPA workshop on PFCs, Washington DC, May 8-9, 1996;
- Technics Plasma GmbH, Kirchheim bei München, pers. Mitt. 22.4.1996;
- Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie, 5. Aufl., Vo. A 1, 459-481, Weinheim 1985;
- Umweltbundesamt, Berlin, pers. Mitt. 28.7.1999;
- VAW aluminium AG, Bonn, Geschäftsberichte für 1989, 1990, 1991, 1992, 1993;
- VAW aluminium AG, Bonn, pers. Mitt. 2.7.1996;

IV. Fluorierte Gase der Halbleiterfertigung

Vorbemerkung

Von den wichtigsten fluorierten Gasen der Halbleiterindustrie wird NF_3 hier erstmalig diskutiert. Die anderen Gase kamen in vorhergehenden Kapiteln vor: CF_4 , C_2F_6 bei der Aluminiumelektrolyse, CHF_3 und C_3F_8 bei Kältemitteln und SF_6 in einer Vielzahl von Anwendungen. Die gesonderte Behandlung aller genannten Gase zusammen in diesem Teil IV liefert keine neuen Zahlenwerte gegenüber den vorhergehenden Teilen I bis III. Sie holt vielmehr die Begründungen nach für die dort nur als Resultate dargestellten Verbrauchs- und Emissionsmengen fluorierte Gase in der Halbleiterfertigung. Als Sammelbegriff für die chemisch unterschiedlichen fluorierten Gase wird hier - nach IPCC 99 - der Terminus "fluorinated compounds" bzw. abgekürzt "FC" verwendet.

1 Plasmaätzen mit fluorierten Gasen

Die Gase CHF_3 , CF_4 , C_2F_6 , SF_6 , NF_3 und - bislang in geringem Umfang - C_3F_8 werden entweder zum Ätzen oder zum Reinigen eingesetzt¹. Beim Ätzen werden feine Strukturen auf Oberflächen von Wafern erzeugt: enge Bahnen in Sub-Mikron-Breite ($< 0,5 \mu\text{m}$) auf dünnen Schichten aus Siliziumoxid, Siliziumnitrid oder Wolfram. Beim Reinigen werden von den Wänden der Reaktionskammern silizium- und wolframhaltige Schichten entfernt, die im CVD-Prozeß (Chemical Vapour Deposition) auf einen Wafer abgeschieden wurden, aber sich zum Teil auf der Kammerwand niederschlagen.

Sowohl Ätzen als auch Reinigen finden in Niederdruck-Reaktionskammern statt, in welchen die eingeleiteten FC durch Hochfrequenzwellen in den Plasmazustand überführt werden. Dabei bilden sich u.a. hochreaktive Fluor-Radikale (molekulare Bruchstücke mit freien Bindungen). Diese sollen chemisch mit siliziumhaltigem oder wolframhaltigem Material reagieren und die Feststoffe (z.B. SiO_2) in flüchtige Fluoride (z.B. SiF_4) umwandeln, die aus der Kammer als Abgase abgepumpt werden.

Strukturätzen und CVD-Reinigen sind chemisch gesehen beides Ätzprozesse. In der Praxis wird nur das Strukturätzen als "Ätzen" bezeichnet und das Kammerätzen als "Reinigen". Die verschiedenen FCs sind ausschließlich als Quelle von Fluor relevant und grundsätzlich gegenseitig austauschbar. Allerdings eignen sich SF_6 und CHF_3 besser zum Ätzen und C_2F_6 , NF_3 und C_3F_8 besser zum Reinigen. Lediglich CF_4 wird für beides eingesetzt. Die Plasmakammern sind durch Bauart, Volumen, Gasfluß, Druck, Frequenz usw. auf bestimmte Ätz- bzw. Reinigungs-FC eingestellt, so daß eine Substitution des benutzten Ätzgases durch ein anderes Ätzgas in bereits installierten Anlagen nicht oft vorkommt.

2 Inlandsverbrauch 1995-1997

Von 1995 bis 1997 nahm der inländische FC-Verbrauch für die Halbleiterindustrie kräftig zu (Befragung Elektronikgase). Er stieg in der Summe von 50 auf 110 t oder um

¹ Die sonst noch zum Ätzen eingesetzten FC mit nur geringen Mengen wie C_4F_8 , C_3HF_5 oder BF_3 werden hier vernachlässigt, ebenso das zur Metall-Deposition benutzte WF_6 , das kein Treibhausgas ist.

120%. Tabelle 79 zeigt, daß für diesen Anstieg im wesentlichen zwei Gase verantwortlich waren: C_2F_6 und CF_4 . Der Verbrauch von C_2F_6 stieg überproportional von 20 auf 56 t. Mit 50% Anteil am gesamten FC-Verbrauch von 1997 ist C_2F_6 der meistbenutzte FC. Knapp ein Drittel der FC-Einsatzmenge entfiel 1997 auf CF_4 , den zweitwichtigsten FC, der gegenüber 1995 ebenfalls überproportional zunahm. Die anderen FC waren 1997 mit zusammen 20 t von weit geringerer Bedeutung.

Tab. 79: Verbrauch fluorierter Ätzgase (FC) in der Halbleiterindustrie 1995-1997 in t/a				
	<i>GWP</i>	<i>1995</i>	<i>1996</i>	<i>1997</i>
SF_6	23900	7	9	10
CHF_3	11700	5	6	7
CF_4	6500	15	29	34
C_2F_6	9200	20	37	56
NF_3	8000	3	3	3
C_3F_8	7000	0	0	0,3
Summe		2122	2157	2184,3

Quelle: Befragung Elektronikgase.

C_2F_6 wird nahezu ausschließlich und CF_4 wird überwiegend zum CVD-Reinigen eingesetzt. Das überproportionale Wachstum beider FC, zu denen NF_3 und C_3F_8 in Konkurrenz stehen, hat die Miniaturisierung der Halbleiter, welche erhöhte Reinheitsanforderungen an die Prozeßkammern stellt, zum Hintergrund. Die zeitlichen Intervalle zwischen den Reinigungen werden sich mit dem als Technologiesprung geltenden Übergang vom Wafer des Durchmessers 200 mm auf 300 mm weiter verkürzen, so daß der Bedarf an Gasen zur Kammerreinigung weiter überdurchschnittlich wachsen dürfte.

Zur Kammerreinigung wurden 1997 rd. 75% der FC eingesetzt. Zum Strukturätzen dienen 25%², nämlich SF_6 , CHF_3 und CF_4 , das zu einem Drittel zum Strukturätzen eingesetzt wird (Zörner 1999; Hollenbach 1999).

3 Emissionen 1995-1997 in Deutschland

Wieviel vom eingesetzten FC unverändert und treibhauswirksam in die Atmosphäre entweicht, hängt von zwei Faktoren ab. Erstens vom Ausmaß seiner Umsetzung in der Plasmakammer und zweitens von Existenz und Wirkungsgrad nachgeschalteter Abgasanlagen zur Zerstörung der im Plasma unzersetzt gebliebenen FC-Teilmenge.

3.1 FC-Umsetzungsraten im Plasma

Die Umsetzungsraten (engl.: Utilisation Removal Efficiency - URE) der einzelnen FC sind verschieden. Es gibt keine festen Werte, jedoch für jedes Gas immerhin einen gewissen Größenbereich, in dem sich die Umsetzung je nach konkreten Anwendungsbedingungen bewegt. Generell läßt sich sagen, daß die Umsetzung von der molekularen Stabilität abhängt bzw. - in Bezug auf perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC) - mit der Zahl der Fluoratome zunimmt. Die Hierarchie lautet für die PFC-Raten:

² Die Zahlen decken sich mit internationalen Erfahrungen: "Currently about 60-80% of PFCs consumed in the semiconductor industry are for cleaning process chambers". (Ridgeway et al. 1998)

$C_3F_8 > C_2F_6 > CF_4$ (Theirich 1996). Die Umsetzung von CHF_3 (17%) liegt im Bereich derjenigen von CF_4 (15%), diejenige von SF_6 (27%) in der Nähe der Umsetzungsrate von C_2F_6 (32%). Die höchste Rate haben NF_3 und C_3F_8 mit 62% bzw. 60%. Tabelle 80 gibt aus der Literatur mittlere Umsetzungsdaten für FC unter typischen Anwendungen wieder:

FC	SF_6	CF_4	CHF_3	C_2F_6	NF_3	C_3F_8
Umsetzungsrate	27%	15%	17%	32%	62%	60%
CF_4 -Nebenproduktion				10%		25%

Quellen: Air Products 1996; Zazzera/Reagan 1997; Conners/Raoux 1998.

Niedrige Umsetzungsdaten - etwa 15% für CF_4 - bedeuten, daß sich der größte Teil des eingeleiteten Ätzgases im Kammerabgas wiederfindet. Hohe Umsetzung - etwa 62% für NF_3 - bedeutet: Das ursprüngliche Gas ist weitgehend zersetzt und nur zu einem kleineren Teil noch im Abgas vorhanden. Ein hoher Anteil ursprünglichen Gases im Abgas heißt nicht immer, daß im Plasma wenig Zersetzung stattgefunden hat. Es verbinden sich nämlich schon im Plasma die molekularen Bruchstücke teilweise wieder miteinander, statt etwa mit Silizium zu reagieren ($CF_4 \rightarrow CF_3 + F$). Die hohe Umsetzungsrate von 62% für NF_3 gründet u.a. darin, daß es bei diesem FC nach der Spaltung in Stickstoff und Fluor-Radikale keine Rekombination mehr gibt.

Rekombination ist auch der Grund, daß C_2F_6 und C_3F_8 zwar Umsetzungsdaten von 32% bzw. 60% aufweisen, aber aus ihren Zersetzungsprodukten teilweise wieder ein FC, nämlich CF_4 entsteht. Von C_2F_6 werden ca. 10% der Einsatzmenge in CF_4 umgewandelt, von C_3F_8 sogar 25% (s. Tabelle 80). Zum Treibhauseffekt tragen C_2F_6 und C_3F_8 nicht nur durch ihre nicht umgesetzten Bestandteile bei, sondern zusätzlich durch erst in der Umsetzung entstandenes CF_4 .³

Die in der Kammer nicht umgesetzten bzw. rekombinierten FC bilden potentielle Emissionen. Zur Abschätzung der effektiven Emissionen sind die zur Zerstörung der überschüssigen FC installierten Abgassysteme zu berücksichtigen.

3.2 FC-Abgasreinigung

Die Abgasbehandlung vor 1993 bestand nur aus Naßwäschern für Reaktionsprodukte. Sie halten die wasserlöslichen Abgase SiF_4 , SiH_4 , $SiOF_2$, COF_2 , SO_2 usw. in wäßrig-alkalischer Lösung weitgehend zurück. Doch lassen sie die im Reaktor nicht umgesetzten - durchweg wasserunlöslichen - fluorierten Gase ungehindert passieren.

Abgassysteme für FC beruhen bisher fast alle auf Hochtemperatur-Spaltung. Das Abgas wird aus der Vakuumpumpe nicht sofort in den Naßwäscher, sondern zunächst in eine Brennkammer geleitet. Als Brennstoff in sauerstoffreichem Milieu dient Wasserstoff oder - wegen seines Wasserstoffgehalts - Erdgas. Bei Temperaturen um 1500 °C zersetzen sich die FC, deren Komponenten sich mit H_2 oder O_2 verbinden. Im Idealfall werden sie vollständig zu HF einerseits und CO_2 (bei CF_4 , CHF_3 , C_2F_6 , C_3F_8), SO_2 (bei SF_6) oder N_2 (bei NF_3) andererseits umgewandelt. Der alkalische Naßwäscher neutrali-

³ Es sei darauf verwiesen, daß aus organischen fluorierten Ätzgasen in geringen Mengen weitere perfluororganische Nebenprodukte entstehen können wie C_3F_6 , C_4F_6 oder unter bestimmten Bedingungen aus CHF_3 das toxische $i-C_4F_8$ (vgl. Tiller u.a. 1992).

siert HF und das von der SF₆-Spaltung stammende SO₂. Zu entsorgen bleibt Abwasser. Das Abgas der Brennkammer enthält CO₂, H₂O und Stickstoff. Den Brenner-Abgasanlagen wird hohe Effektivität (engl. DRE = Destruction Removal Efficiency) gegenüber FC bescheinigt, die unter realen Einsatzbedingungen bei 98% bis 99% liegt (Infineon 1999). Nur CF₄ ist wegen seiner hohen molekularen Stabilität für die Abgassysteme ein Problemgas mit nur 95% DRE (Sematech 1995).

Die aktuelle Verbreitung von Abgasreinigungssystemen reicht nicht zur Zerstörung aller FC-Kammeremissionen aus. 1997 waren Abgasanlagen (Brennersysteme) im wesentlichen auf neue Fabriken begrenzt, die seit 1995 in Betrieb waren. Die befragten Hersteller von Abgasanlagen nehmen, bezogen auf alle potentiellen FC-Emissionen, für 1997 eine Ausrüstungsquote von 30% an. 1995 lag die Quote bei 20%, 1996 bei 25%. (Centrotherm 1999; Edwards 1999; DAS 1999, CS 1999)

3.3 Emissionen

Aus den jährlichen Verbrauchsmengen der FC lassen sich ihre effektiven jährlichen Emissionen abzuschätzen. Dazu sind pro FC zwei Hauptschritte erforderlich:

- Zunächst werden auf die jährlichen Verbräuche lt. Tabelle 79 die spezifischen Umsatzraten (URE) lt. Tabelle 80 angewendet. Das ergibt die zersetzten FC, deren anorganische Spalt- und Reaktionsprodukte in den Wäscher gelangen. Die im Plasma unzersetzten und neugebildeten FC sind potentielle Emissionen.
- Auf die potentiellen Emissionen werden im zweiten Schritt die Ausstattungsquoten mit Abgassystemen und ihr Wirkungsgrad von 98% bzw. 95% bezogen. Aus den potentiellen Emissionen entstehen einerseits Zersetzungsprodukte für den Wäscher und andererseits die effektiven FC-Jahresemissionen⁴. Sie sind in Tabelle 81 für 1995-1997 für die einzelnen FC eingetragen.

Tab. 81: FC-Emissionen aus der Halbleiterindustrie 1995 - 1997 in t			
	1995	1996	1997
SF ₆	4	5	5
CHF ₃	3	4	4
CF ₄ *	12	20	23
C ₂ F ₆	11	19	27
NF ₃	0,9	0,9	0,8
C ₃ F ₈	0	0	0,1
Summe in t	31	49	60

* Unzersetztes Originalgas und Neubildung aus der Plasmazersetzung von C₂F₆ und C₃F₈.

In der Summe sind die FC-Emissionen aus der Halbleiterindustrie zwischen 1995 und 1997 von knapp 31 t auf knapp 60 t gestiegen. Der Emissionsanstieg ist aufgrund erhöhter Ausstattung mit FC-Abgasreinigungsanlagen (zwischen 1995 und 1997 von 20% auf 30%) geringer als der Verbrauchsanstieg (50 t auf 110 t).

⁴ Die Werte für einzelne FC-Emissionen gelten nur unter der Annahme einer gleichmäßigen, für alle Gase im betreffenden Jahr gleich hohen Abgasanlagen-Ausstattung. Die Annahme dürfte annähernd zutreffen.

Nach einzelnen FC betrachtet, entfielen 1997 auf die perfluorierten Kohlenwasserstoffe (PFC) C_2F_6 und CF_4 mit 50 t über 80% aller Emissionen: auf C_2F_6 entfielen 45%, auf CF_4 entfielen 38%. Der Abstand von CF_4 zu C_2F_6 ist bei den Emissionen geringer als beim Verbrauch. Dies liegt erstens an der geringeren Zerstörung von CF_4 in den Abgassystemen und zweitens daran, daß außer dem ursprünglich zum Struktur- und Kammerätzen benutzten primären CF_4 sekundäres CF_4 emittiert, das erst bei der Plasmasersetzung aus C_2F_6 und C_3F_8 entsteht.

Der Beitrag zum Treibhauseffekt betrug für alle FC zusammen 0,316 Mio. t CO_2 -Äquivalente in 1995, 0,473 Mio. t in 1996 und 0,577 Mio. t in 1997 (vgl. Tabelle 81). Der Hauptbeitrag kam in allen drei Jahren vom C_2F_6 (GWP: 9200).

3.4 Schematische Darstellung des FC-Stoffstroms 1997

In nachfolgender Abbildung wird versucht, den Weg der 1997 insgesamt eingesetzten FC bis zur effektiven Emission bzw. Spaltproduktentsorgung grafisch zu verdeutlichen.

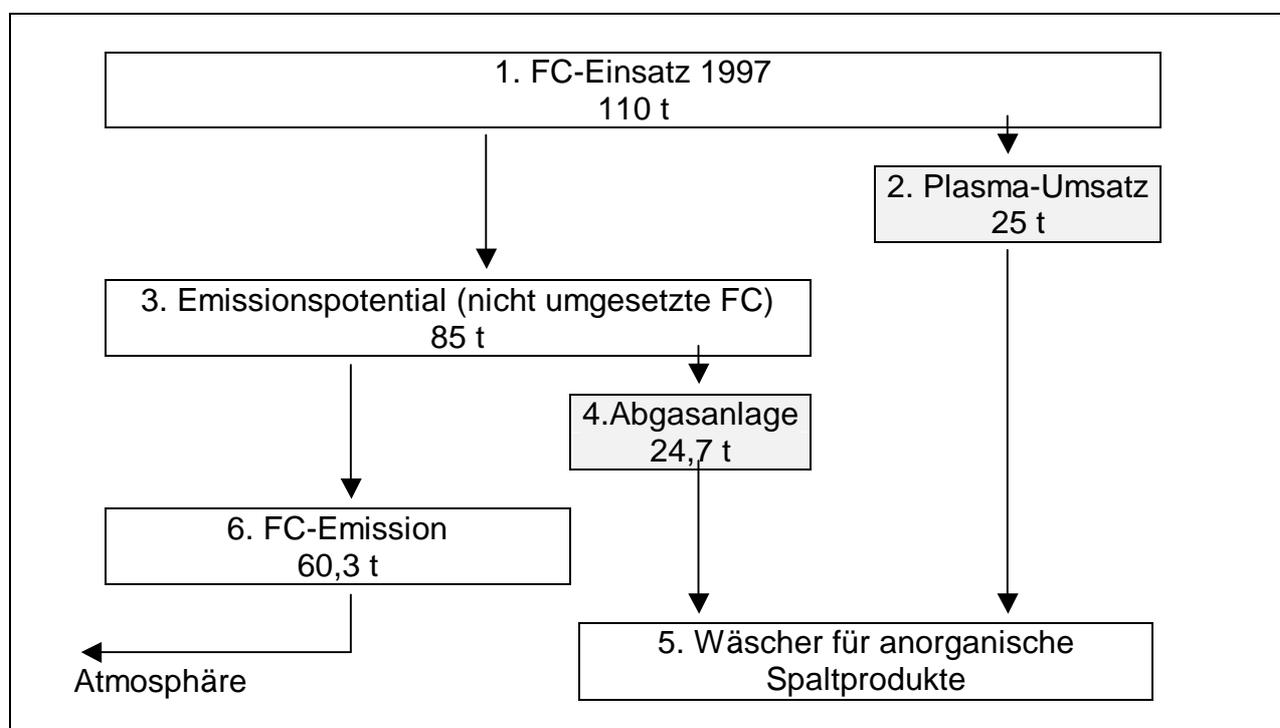


Abb. 3: Stoffstrom der 1997 in der deutschen Halbleiterindustrie insgesamt eingesetzten FC. Von den 110 t FC (1) werden in Plasmakammern 25 t (2) in Nicht-FC zersetzt, die in den Wäscher für anorganische Spaltprodukte (5) gelangen. Im Plasma nicht umgesetzte sowie neugebildete FC betragen 85 t und stellen das Emissionspotential (3) dar. Davon gelangen 30% in FC-Abgasanlagen (4), wo sie zu 95 bzw. 98% zerstört werden: Die Spaltprodukte von 24,7 t FC gelangen ebenfalls in den Wäscher (5). Die restlichen 60,3 t FC (6) entweichen in die Atmosphäre. Das sind von den ursprünglich eingesetzten 110 t FC noch knapp 55%.

4 BaU-Emissionsprognose bis 2010 - Szenario I

In einer so dynamischen Branche wie der Halbleiterindustrie ist jede Prognose über die nächsten zwei oder drei Jahre hinaus riskant. Erst recht stehen Voraussagen für einen Zeitraum von zwölf Jahren auf unsicherem Boden. Nachfolgende BaU-Prognose bis

2010 stellt nur eine von mehreren Entwicklungswegen dar. Sie gilt nur unter den nachfolgend angeführten fünf vereinfachenden Randbedingungen.

1. Entsprechend dem hohen Wachstum der inländischen Halbleiterfertigung nimmt der FC-Einsatz in der Summe um jährlich 10% zu - von 110 t (1997) um 245% auf 380 t.
2. Ätz- und Reinigungsgase wachsen unterschiedlich stark:
 - Die Ätzgase SF₆, CHF₃ und CF₄ (teilw.) nehmen alle gleichmäßig, aber unterproportional zu, nämlich ab 1998 jährlich um 6%.
 - C₂F₆, NF₃ und CF₄ (teilw.) nehmen aufgrund erhöhter Reinheitsanforderungen der Kammern überproportional zu: ab 1998 jeweils um 11% jährlich.
3. Das 1997 neueingeführte C₃F₈ steigt bis 2010 im Verbrauch auf 14 t. Diese Menge geht auf Kosten von C₂F₆ und - zum Teil - CF₄.⁵
4. Die spezifischen FC-Umsetzungsraten (URE) im Plasma von 1995-1997 bleiben bis 2010 konstant.
5. Die Ausrüstungsquote mit FC-Abgassystemen bleibt - entsprechend den gegenwärtigen Investitionsplänen - bei 30%, der 1997er Quote. Das bedeutet keine Festbeschreibung des 1997er Bestands, sondern ein Jahreswachstum neuinstallierter FC-Abgasanlagen um 10%, da der FC-Einsatz jährlich um 10% steigt (s. Annahme 1).

Unter diesen Annahmen, die außer unterschiedlichen Wachstumsraten von Ätz- und Reinigungsgasen weitgehend gleichmäßige Entwicklungen bei FC-Einsatz und FC-Emissionen beinhalten, ergeben sich nachfolgende effektiven Emissionen nach BaU-Szenario I für die Stichjahre 1995, 2000, 2005 und 2010 (s. Tabelle 82).

Tab. 82: Effektive FC-Emissionen aus der Halbleiterindustrie 1995-2010 in t/a nach BaU-Szenario I				
	1995	2000	2005	2010
SF ₆	4	6	8	11
CHF ₃	3	5	6	8
CF ₄ *	12	37	50	77
C ₂ F ₆	11	36	62	101
NF ₃	1	1	2	3
C ₃ F ₈	0	0,6	2	3
Summe in t	2093	80	130	2280
<i>Emiss. in Mio. t CO₂ Äquiv.</i>	<i>0,316</i>	<i>0,756</i>	<i>1,193</i>	<i>1,836</i>

* Unzersetztes Originalgas und Neubildung aus der Plasmazersetzung von C₂F₆ und C₃F₈.

Bis 2010 steigen die Emissionen aller FC auf 203 t an. Der größte Teil davon entfällt auf die vorwiegend zur Kammerreinigung eingesetzten Gase C₂F₆ und CF₄ mit 101 t (50%) bzw. 77 t (38%). Die 77 t CF₄ stammen zu 15 t vom Strukturätzen und zu 62 t aus der Kammerreinigung: 51 t primäres Gas und 11 t sekundäres Gas aus der Plasmaumsetzung von C₂F₆ und C₃F₈.

⁵ Der für Altanlagen als Drop In taugliche FC ermöglicht unter bestimmten Prozeßbedingungen einen bis zu 60% niedrigeren Beitrag zum Treibhauseffekt als C₂F₆. (SEMATECH 1998; 3M 1999)

Von den zum Strukturätzen eingesetzten Gasen SF₆, CHF₃ und CF₄ (teilw.) emittieren nur 34 t. Die Relation Ätz- zu Kammerreinigungsgase beträgt 2010 bei den gesamten effektiven FC-Emissionen ca. 16% zu 84%. 1995 lag sie noch bei 35% zu 65%.

Die PFC (CF₄, C₂F₆, C₃F₈) haben im Jahr 2010 einen Anteil an den gesamten FC-Emissionen von 181 t, von denen 166 t aus der Kammerreinigung stammen.

Der Beitrag zum Treibhauseffekt steigt bis 2010 auf 1,836 Mio. t CO₂-Äquivalente. 0,928 Mio. t (50%) stammen von nicht zersetztem C₂F₆. Weitere 0,066 Mio. t gehen auf CF₄ aus der C₂F₆-Umsetzung zurück. C₂F₆ ist daher mit fast 1 Mio. t CO₂-Äquivalente am Beitrag der Halbleiterindustrie zum Treibhauseffekt durch FC beteiligt.

5 Emissionsminderung bis 2010 - Szenario II

Leitlinie für Szenario II ist der im April 1999 gefaßte Beschluß des World Semiconductor Council (WSC), der Vereinigung aller bedeutenden Halbleiterhersteller der Welt, die aggregierten absoluten FC-Emissionen aus der Halbleiterfabrikation global "um 10% oder mehr bis zum Jahr 2010" zu senken. Für die europäischen Hersteller gilt als Bezugsjahr 1995. (WSC 1999) Angesichts des Anstiegs der FC-Emissionen nach BaU-Szenario I von 0,316 auf 1,836 Mio. t CO₂-Äquivalente bis 2010 erscheint dieses Ziel, angewendet auf Deutschland, als sehr ehrgeizig. Denn die treibhauswirksamen FC-Emissionen müßten auf ca. 0,3 Mio. t CO₂-Äquivalente zurückgeführt werden. Der WSC-Beschluß ist vor dem Hintergrund eines sich abzeichnenden technologischen Umbruchs der Kammerreinigung und der Abgasbehandlung von Ätzgasen jedoch keineswegs aus der Luft gegriffen. Diese neuen Bedingungen werden kurz skizziert.

5.1 Technologische Umbrüche beim FC-Einsatz

NF₃ unterscheidet sich von den anderen FC dadurch, daß seine im Plasma erzeugten Zersetzungsprodukte nicht rückreagieren. Fluor, das vom Stickstoff abgespalten wurde, setzt sich entweder bestimmungsgemäß mit dem Beschichtungsmaterial in der Kammer um oder gelangt als elementares Gas (F₂) nach außen. Allerdings wird NF₃ nicht völlig, sondern nur zu etwa 62% zersetzt. Nicht umgesetztes NF₃ wird in Abgasanlagen zerstört. Dies geschieht deshalb, weil NF₃ giftig ist. Für NF₃ gilt der US-Expositionsgrenzwert (Threshold Limit Value - TLV) von nur 10 ppm.

Anders als im herkömmlichen RF-Plasma (Radio Frequenz Plasma) wird NF₃ in einem Mikrowellen-Plasma hoher Dichte zu 98%-99% zersetzt, wenn es unvermischt zugeführt wird. Die darauf gründende neue Technologie besteht darin, am Einlaß der eigentlichen Prozeßkammer eine Mikrowellen-Plasma-Quelle anzubringen, die dafür sorgt, daß NF₃ zu ca. 98% gespalten wird, so daß zu 98% freies Fluor in die Hauptkammer gelangt (Raoux et al. 1999). Da es dort nicht mit Stickstoff rekombiniert, bestehen Kammerabgase nur aus den Fluor-geätzten Depositionsrückständen sowie elementarem Stickstoff und Fluor.

Bei diesem Verfahren ist NF₃ im Abgas in so geringer Konzentration enthalten, daß zur Unterschreitung des Expositionsgrenzwerts von 10 ppm eine gesonderte FC-Behandlung - etwa durch Verbrennung - nicht immer erforderlich ist (Kopatzki/Guerin 1999). Auf Hochtemperaturverbrennung kann sogar bei der Behandlung des

aggressiven elementaren Fluors verzichtet werden, wenn ein Trockenbett-Absorber eingesetzt wird. Diese Kartuschen mit katalytisch aktiven Granulaten nehmen bei Raumtemperatur sowohl das Fluor als auch die fluorhaltigen Reaktionsprodukte aus der CVD-Kammerreinigung auf. Solche Systeme sind deutlich preiswerter in Anschaffung und Betrieb als die Kombination von Brenner und Naßwäscher (dies. 1999).

Die weltweit führenden Hersteller plasmagestützter CVD-Kammer-Anlagen Applied Materials und Novellus haben beide die Reinigung mit vorgespaltenelem NF_3 zur Serienreife entwickelt und sind dabei, sie unter den Namen "Remote Plasma Clean" bzw. "Microcleans" in den Markt einzuführen (Applied Materials 1999; Novellus 1999)⁶. Das neue Verfahren hat gegenüber dem Einsatz kohlenstoffhaltiger FC (CF_4 , C_2F_6 und C_3F_8) zwei Vorzüge. Erstens: Die ohne wesentliche Mehrkosten vorgenommene Verlagerung der FC-Spaltung an den Anfang des Prozesses ersetzt die FC-Abgasnachreinigung und erleichtert die Behandlung anorganischer Abgasstoffe. Zweitens: Die Reinigungszeit ist gegenüber dem C_2F_6 -Prozeß um bis zu 60% kürzer, der Waferdurchsatz in gleicher Zeit um bis zu 20% höher (Conners/Raoux 1998).

Die höhere Produktivität in der Halbleiterherstellung (mehr Wafer in gleicher Zeit) mithilfe der neuen NF_3 -Technologie wiegt den Kostennachteil des Prozeßgases NF_3 , das pro Kilogramm z.Zt. das Vierfache von C_2F_6 kostet, um ein Vielfaches auf.

Im Bereich des Strukturätzens, für den NF_3 untauglich ist, kann die Nachbehandlung FC-haltigen Abgases zwar nicht weggelassen, aber deutlich vereinfacht und verbilligt werden. Statt durch Verbrennung bei hoher Temperatur kann die FC-Zerstörung in einer kleinen Kammer durch ein Plasma hoher Dichte (High Density Plasma - HDP) erfolgen. Sofern den eingeleiteten Abgasen Wasserdampf zugesetzt wird, werden FC-Umsetzungsraten von ca. 99% erzielt (SEMATECH 1999). Das kleine Gerät (30x30x15 cm) wird direkt hinter die Ätzkammer montiert. Es kostet etwa 75% weniger als FC-Nachverbrenner, und seine Betriebskosten sind um ein Mehrfaches geringer⁷. Die aus der nachgeschalteten Plasmakammer abgepumpten Abgase können in unbeheizten Trockenbettabsorbern aufgefangen und entsorgt werden (Kopatzki/Guerin 1999). (Für CVD-Kammerabgase ist das HDP-Gerät nicht geeignet, da es die beim Reinigen in viel größeren Mengen als beim Ätzen anfallenden Reaktionsprodukte nicht bewältigt.)

5.2 Die Annahmen für eine Emissionsminderung 2010 gegenüber 1995

Zur Bestimmung der unteren Grenze der FC-Emissionen bis zum Jahr 2010 dient Szenario II. Es beruht auf der Annahme eines raschen Übergangs zur NF_3 -Technik und beinhaltet im einzelnen je fünf Annahmen zur Kammerreinigung bzw. zum Strukturätzen.

1. Kammerreinigung

1. In der Summe steigt die FC-Einsatzmenge zur Kammerreinigung pro Jahr wie in Szenario I, nämlich um 11% jährlich. Der Gesamtverbrauch ist 2010 genauso

⁶ Applied Materials gab im Juli 1998 die Zahl von bis zu diesem Zeitpunkt mit "Remote Plasma Clean" weltweit ausgerüsteten Kammern mit 151 an. (Conners/Raoux 1998)

⁷ Nach Herstellerangaben kostet die Anschaffung eines Geräts 15 000 USD und sein jährlicher Betrieb etwa 5000 USD (SEMATECH 1999).

hoch wie in Szenario I. Allerdings ändert sich seine Zusammensetzung bis 2010 auf 70% NF_3 und 30% PFC (C_2F_6 , CF_4 und C_3F_8).

2. Ab dem Jahr 2000 wird in neuen Anlagen statt C_2F_6 und anderer PFC nur noch NF_3 mit vorgeschalteter Spaltung im Mikrowellenplasma eingesetzt. Die Umsetzung in der Plasmavorspaltung beträgt 98%. Das ist so viel mehr als im Plasma der Prozeß-Hauptkammer (62%), so daß auf eine nachgeschaltete Abgasbehandlung (Brenner) verzichtet werden kann.
3. In den vor dem Jahr 2000 installierten Anlagen (Altanlagen) werden weiterhin PFC eingesetzt. Eine Nachrüstung der Altanlagen auf die neue NF_3 -Technologie (Plasmavorspaltung) findet nicht statt.
4. Alle vor 2000 installierten Anlagen bleiben bis 2008 auf der Ausrüstungsquote des Jahres 1998 mit nachgeschalteter FC-Abgasreinigung (Brenner), nämlich 32,5%.
5. Von 2009 bis 2010 werden 100% der vor 1996 und 75% der in 1996 in Betrieb genommenen Systeme (Altanlagen) ausgemustert und durch Anlagen mit NF_3 -Plasmavorspaltung ersetzt.

2. Strukturätzen

1. Die eingesetzten FC sind die gleichen wie in Szenario I, nämlich SF_6 , CHF_3 und CF_4 (teilw). Ihre Einsatzmengen entwickeln sich wie dort mit einer jährlichen Wachstumsrate von 6% ab 1998. Ihr Gesamtverbrauch ist 2010 genauso hoch wie in Szenario I.
2. Ab dem Jahr 2000 werden neue Anlagen nur noch mit FC-Nachspaltung des Abgases ausgerüstet, sei es Nachspaltung im wasserdampfgestütztes HD-Plasma oder ein vergleichbar effektives System.
3. In den vor dem Jahr 2000 installierten Anlagen (Altanlagen) werden die gleichen FC wie bisher eingesetzt (SF_6 , CHF_3 und CF_4 teilw.).
- 4 Die vor 2000 installierten Anlagen bleiben bis 2008 auf der Ausrüstungsquote des Jahres 1998 mit nachgeschalteter FC-Abgasreinigung (Brenner), nämlich 32,5%. Eine Nachrüstung der Anlagen ohne FC-Abgasreinigung auf die für Neuanlagen obligatorische plasmagestützte FC-Nachspaltung findet nicht statt.
5. Von 2009 bis 2010 werden 100% der vor 1996 und 75% der in 1996 in Betrieb genommenen Systeme (Altanlagen) ausgemustert und durch Anlagen mit plasmagestützte FC-Nachspaltung des Abgases ersetzt.

Unter diesen Bedingungen ist im Jahr 2010 das Reduktionsziel "10% weniger FC-Emissionen als 1995" erreichbar.

5.3 Minderungsszenario bis 2010

Nach Szenario II sinken bis 2010 vor allem dank des ab dem Jahr 2000 erfolgten Umstiegs auf die neue NF_3 -basierte Technologie der Kammerreinigung die treibhauswirksamen FC-Emissionen auf unter 0,3 Mio. t CO_2 -Äquivalente. Werden die zehn Annahmen des Minderungsszenarios eingehalten, steigen die FC-Emissionen in den 15 Jahren zwischen 1995 bis 2010 nur bis 1999 an. Sie bleiben dann bis 2008 trotz jährlich um 10% wachsender FC-Einsatzmengen auf relativ konstanten 70 t. Von 2009 an gehen sie um über die Hälfte zurück, weil die emissionsträchtigen Altanlagen aus der Zeit vor 1997 durch neue Anlagen ersetzt werden. Tabelle 83 zeigt die Emissionen der einzelnen FC für die Stichjahre 1995, 2000, 2005 und 2010.

**Tab. 83: FC-Emissionen aus der Halbleiterindustrie 1995-2010
in t/a nach Minderungsszenario II**

	1995	2000	2005	2010
SF ₆	4	6	6	2
CHF ₃	3	4	4	1
CF ₄ *	12	27	27	11
C ₂ F ₆	11	31	28	11
NF ₃	1	1	3	5
C ₃ F ₈	0	1	2	3
Summe	2094	70	70	33
<i>Emiss. in Mio. t CO₂ Äquiv.</i>	<i>0,316</i>	<i>0,664</i>	<i>0,658</i>	<i>0,295</i>

* Unzersetztes Originalgas und Neubildung aus der Plasmazersetzung von C₂F₆ und C₃F₈.

In Minderungsszenario werden in der Summe zwar genauso viele FC eingesetzt wie im BaU-Szenario: 60 t zum Strukturätzen und 320 t zum Kammerreinigen. Die Emissionen betragen im Minderungsszenario im Jahr 2010 aber nur 33 t statt 203 t (s. Tabelle 83). Der Hauptgrund sind die von 166 auf 22 t gesunkenen C₂F₆- und CF₄-Emissionen aus der Kammerreinigung als Folge des Umstiegs auf NF₃, von dem infolge der hocheffektiven Plasmavorspaltung nur 5 t emittieren - nur 2 t mehr als nach Szenario I.

Die meisten Emissionen werden auch im Minderungsszenario noch durch die PFC C₂F₆ und CF₄ verursacht. Mit jeweils 11 t im Jahr 2010 entfallen auf sie zwei Drittel der Gesamtemissionen (3 t CF₄-Emissionen stammen vom Strukturätzen). Gemessen am BaU-Szenario sind die absoluten Emissionen der beiden Gase allerdings gering.

Im Szenario I ist C₂F₆ das Hauptgas der Kammerreinigung mit 210 t Einsatz (2010). Davon emittieren 101 t direkt, zusätzlich indirekt 10 t CF₄.

Im Szenario II werden im Jahr 2010 für die Kammerreinigung 267 t NF₃ verbraucht. Dank hocheffektiver Plasmavorspaltung emittieren davon nur 5 t.

Auch die Ätzgase SF₆, CHF₃ und CF₄ (teilw.), von denen im BaU-Szenario I im Jahr 2010 noch 34 t emittieren, sinken im Szenario II - vor allem dank Abgaszersetzung im nachgeschalteten HD-Plasma - bei den Emissionen auf 6 t.

Die meisten FC-Emissionen in Szenario II, ca. 20 t, stammen aus Altanlagen der Baujahre 1996 bis 1999. Die Altanlagen eröffnen einen Spielraum für eventuell größere Emissionsminderungen als in vorliegender Studie. Denn die Annahme, daß bis 2010 nur Anlagen verschrottet und durch neue ersetzt werden, die vor 1997 in Betrieb gingen, ist sehr konservativ. Eine Lebensdauer von 15 Jahren ist für Plasmaanlagen zur Halbleiterfertigung eine sehr lange Zeit. Ihre Hersteller bezeichnen Lebenszyklen von acht Jahren als üblich (Applied Materials 1999). Bei vorzeitigem Ersatz von Alt- durch Neuanlagen könnten die gesamten FC-Emissionen bis 2010 auf unter 10 t sinken.

Der Beitrag zum Treibhauseffekt beträgt im Jahr 2010 nach Szenario II 0,295 Mio. t CO₂-Äquivalente. Das sind 6,5% weniger als im Basisjahr 1995 (0,316 Mio. t).

Diagramm 39 zeigt die unterschiedliche Entwicklung in beiden Szenarien für die FC-Emissionen in t, Diagramm 40 zeigt die Emissionsverläufe in Mio. t CO₂-Äquivalente.

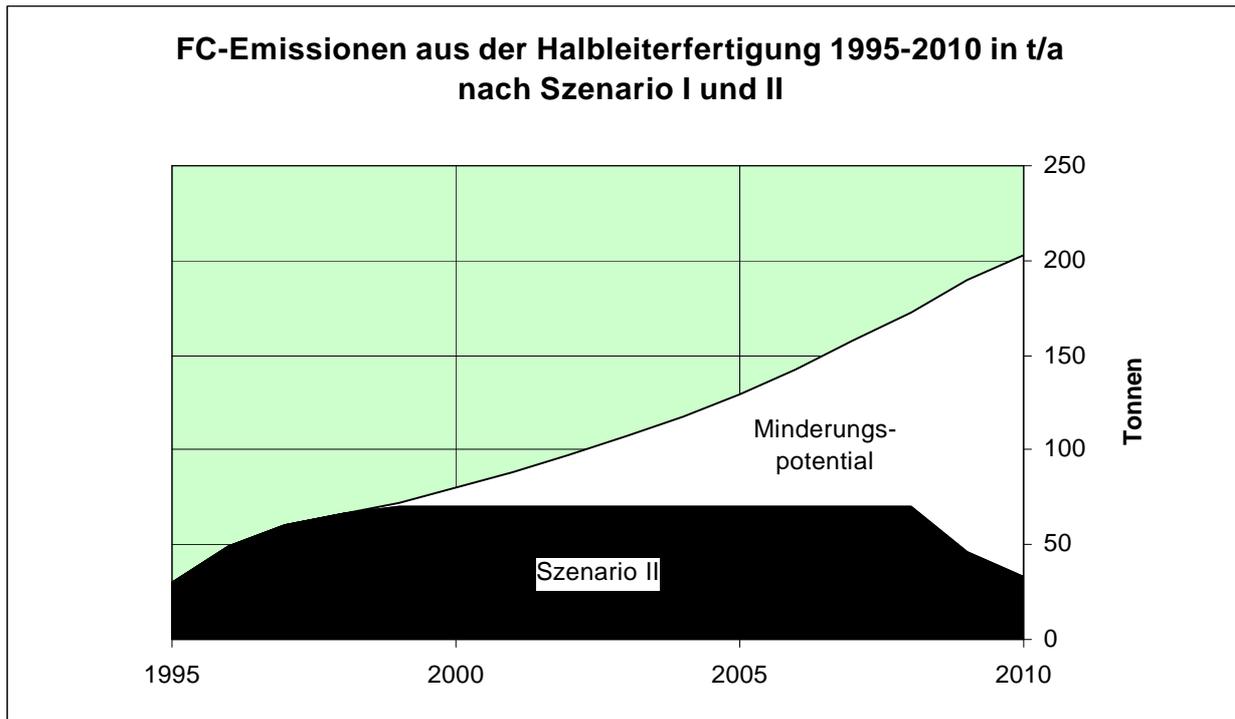


Diagramm 39: FC-Emissionen aus der Halbleiterfertigung 1995-2010 in t/a nach Szenario I und II. Werden entsprechend den Annahmen des Minderungsszenarios ab 2000 hocheffektive Plasmaverfahren eingesetzt, steigen im Unterschied zu Szenario I die Emissionen nicht mehr an, sondern sinken ab 2009 (Altanlagenersatz) sogar auf das Ausgangsniveau von 1995.

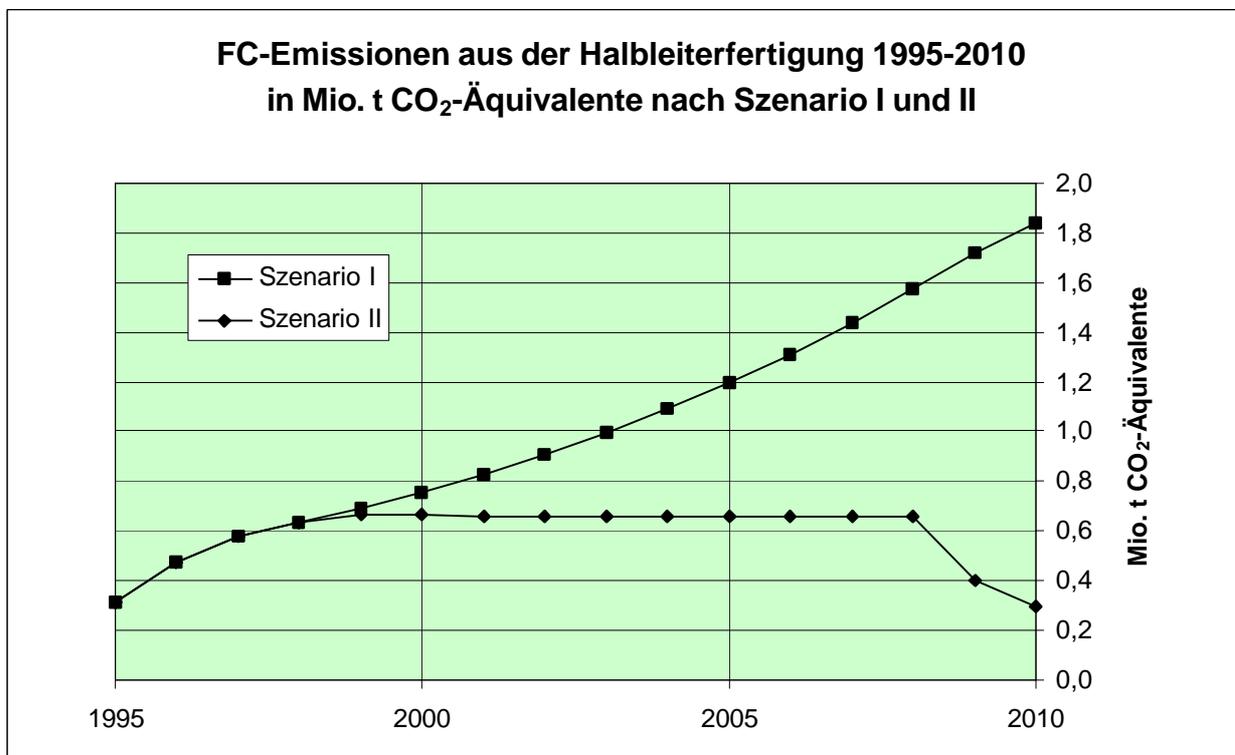


Diagramm 40: FC-Emissionen aus der Halbleiterfertigung 1995-2010 in Mio. t CO₂-Äquivalente nach Szenario I und II. Nach BaU-Szenario I steigen die Emissionen bis 2010 auf über 1,8 Mio. t CO₂-Äquivalente an. Unter den Bedingungen des Minderungsszenarios dagegen bleiben sie ab 2000 konstant und sinken bis 2010 auf 0,295 Mio. t - unter den Ausgangswert von 1995.

Nachweise FC-Halbleitergase

- 3M Performance Materials: PECVD Chamber Cleaning with 3M PFG-3218 - C₃F₈ (R218, Octafluoropropane), St. Paul, MN, 1999;
- Air Products plc., Schreiben an Öko-Recherche, Walton-on-Thames 8.7.1996; Anhang: PFC Consumption Efficiencies for Processes Monitored;
- Applied Materials GmbH, Ismaning, pers. Mitt. 20.7.1999;
- Befragung Elektronikgase: Schriftliche Erhebung der FC-Verkäufe 1995-1997 an die inländische Halbleiterindustrie: Air Liquide, Düsseldorf, 17.3.1999; Air Products GmbH, Hattingen, 28.7.1999; BOC Gase GmbH, Bopfingen, 19.3.1999; Linde AG, Unterschleißheim, 15.3.1999; Messer-Nippon-Sanso GmbH, Krefeld, 21.3.1999; Praxair GmbH, Biebesheim, 18.8.1999;
- Centrotherm Elektrische Anlagen GmbH & Co, Blaubeuren, pers. Mitt. 19.3.1999;
- Connors, A./Raoux, S. (Applied Materials, Inc.): Emission Reduction Using Remote Plasma Clean, SEMICON West ETS Technical Seminar, San Francisco, CA, July 1998;
- CS Clean Systems, Ismaning, pers. Mitt. 23.3.1999;
- DAS-Dünnschicht Anlagen Systeme GmbH, Dresden, pers. Mitt. 25.3.1999;
- Edwards Hochvakuum GmbH, Neu-Ulm, pers. Mitt. 18.3.1999;
- Hollenbach, Ralf (Linde AG) Unterschleißheim, pers. Mitt. 19.7.1999;
- Infineon Technologies AG, München, pers. Mitt. (Bloch, Wolfgang) 21.7.1999;
- IPCC 1999 = IPCC/OECD/IEA Programme for National Greenhouse Gas Inventories, Good Practice in Inventory Preparation for Industrial Processes and the New Gases, Draft Meeting Report Washington DC, 26-28 January 1999;
- Kopatzki/Guerin (CS Clean Systems) Ismaning, pers. Mitt. 5.8.1999;
- Novellus Systems GmbH, Dresden, pers. Mitt. 29.7.1999;
- Raoux, Sebastian et al.: Remote microwave plasma source for cleaning CVD chambers, Journal of Vacuum Science and Technology B. March/April 1999;
- Ridgeway, Robert G. et al.: Recent Update on the Status of Perfluorocompound (PFC) Emissions Reduction Strategies for the Semiconductor Industry (1999), überreicht von Air Products GmbH, Hattingen, 28.7.1999;
- SEMATECH 1998 = Cheng, Albert H-B/Daniels Michael J., Texas Instruments: Evaluation of C₃F₈ and TFAA as Chamber Cleaning Gases in an Applied Materials 5200 TEOS Deposition Tool, Technology Transfer # 98063537A-ENG, International SEMATECH, July 31, 1998;
- SEMATECH 1999 = Evaluation of a Litmas "Blue" Point-of-Use (POU) Plasma Abatement Device for Perfluorocompound (PFC) Destruction, SEMATECH DOC ID #: 98123605A-ENG, 1999;
- SEMATECH: S69 Evaluation of an Edwards/Alzeta Thermal Processing Unit (TPU) Designed to Abate Perfluorocompounds (PFCs), Austin, TX, 1995;
- Theirich, D. (Forschungszentrum für Mikrostrukturtechnik an der Bergischen Universität-GH Wuppertal), Schreiben vom 7.8.1996;
- Tiller, H.-J., Meyer, J., Berg, D., Bürger, H.-D., Abprodukte und Abgasentsorgung von Fluor- und Chlorverbindungen aus plasmatechischen Prozessen, in: Vakuum in der Praxis (1992) Nr.1, 43-54;
- WSC = World Semiconductor Council: Position Paper Regarding PFC Emissions Reduction Goal, April 23, 1999, Fiuggi, Italy (<http://www.eeca.org>);
- Zazzera, L./Reagan, W. (3M): Process Emissions Monitoring During C₃F₈ PECVD Chamber Cleaning Using FTIR, 3M Performance Chemicals and Fluids Division, St. Paul, MN, 7/97;
- Zörmer, Manfred (Messer-Nippon-Sanso GmbH) Krefeld, pers. Mitt. 18.8.1999.

Tabellen

Tab. I:	Emissionen der drei fluorierten Treibhausgase 1995-2010 nach BaU-Szenario in Mio. t CO ₂ -Äquivalente	VI
Tab. II:	Emissionen der drei fluorierten Treibhausgase 1995-2010 nach Minderungsszenario in Mio. t CO ₂ -Äquivalente	VIII
Tab. III:	Anwendungssektoren fluoriertem Treibhausgas nach Größe der 2010-Emissionen in Mio. t CO ₂ -Äquivalente nach beiden Szenarien	IX
Tab. IV:	Emissionen der drei fluorierten Treibhausgase 1995-2010 nach BaU-Szenario in t pro Jahr	XII
Tab. V:	Emissionen der drei fluorierten Treibhausgase 1995-2010 nach Minderungsszenario in t pro Jahr	XII
Tab. VI:	Emissionen der drei fluorierten Treibhausgase 1995-1997 in t/a	XII
Tab. VII:	Emissionen der drei fluorierten Treibhausgase 1995-1997 in Mio. t CO ₂ -Äquivalente	XII
Tab. 1:	HFKW-Emissionen nach Sektoren nach BaU-Szenario I 1995-2010 in t pro Jahr	2
Tab. 2:	HFKW-Emissionen nach Sektoren 1995-2010 nach BaU-Szenario I in Mio. t CO ₂ -Äquivalente	3
Tab. 3:	HFKW-Emissionen nach Sektoren nach Minderungsszenario II 1995-2010 in t pro Jahr	4
Tab. 4:	HFKW-Emissionen nach Sektoren nach Minderungsszenario II 1995-2010 in Mio. t CO ₂ -Äquivalente	4
Tab. 5:	Emissionen von HFKW nach Sektoren 1995-1997 in t/a	6
Tab. 6:	Emissionen von HFKW nach Sektoren 1995-1997 in Mio. t CO ₂ -Äquivalente	6
Tab. 7:	Inl. Verbrauch und lfd. Emissionen von HFKW-Kältemitteln aus Kälte- und stationären Klimaanlage 1995-1997 in t und Mio. t CO ₂ -Äquiv.	9
Tab. 8:	Eckdaten zur Bestimmung der HFKW-Emissionen aus Kühlanlagen und stationären Klimaanlage 1997 und 2010	11
Tab. 9:	Emissionen von HFKW-Kältemitteln aus Kühl- und stationären Klimaanlage 1995-2010 nach BaU-Szenario I	12
Tab. 10:	Emissionen von HFKW-Kältemitteln aus Kühl- und stationären Klimaanlage 1995-2010 nach Szenario II	15
Tab. 11:	Inl. Verbrauch und lfd. Emissionen von HFKW-Kältemitteln (134a) bei Pkw-Klimaanlagen 1995-1997 in t und Mio. t CO ₂ -Äquivalente	18
Tab. 12:	Inl. Verbrauch und lfd. Emissionen von HFKW-Kältemitteln bei Pkw- und sonstigen Mobilklimaanlagen 1995-1997 in t und Mio. t CO ₂ -Äquivalente	20
Tab. 13:	Emissionen von HFKW-134a aus Pkw-Klimaanlagen 1995-2010 in t und Mio. t CO ₂ -Äquivalente nach Szenario I	21
Tab. 14:	Parameter zur Entwicklung sonstiger mobiler Klimaanlage (ohne Pkw) 1995 bis 2010	22
Tab. 15:	Emissionen von HFKW aus sonstigen Mobilklimaanlagen 1995-2010 in t und Mio. t CO ₂ -Äquivalente nach Szenario I	23
Tab. 16:	HFKW-134a-Emissionen aus sonstigen Mobilklimaanlagen 2000 - 2010 im Vergleich der Szenarien I und II	26
Tab. 17:	Emissionen von HFKW aus allen Mobilklimaanlagen 1995-2010 in t und Mio. t CO ₂ -Äquivalente nach Szenario I und II	28
Tab. 18:	Emissionen von HFKW-Treibmitteln für PU-Montageschaum 1995-1997 in t und Mio. t CO ₂ -Äquivalente	29
Tab. 19:	Beitrag zum Treibhauseffekt durch Treibmittel für PU-Montageschaum 1995-2010 in Mio. t CO ₂ -Äquivalente	32
Tab. 20:	HFKW-Verbrauch bzw. -Emissionen bei Integralschaum 1995-1997 in t und Mio. t CO ₂ -Äquivalente	33
Tab. 21:	Emissionsprofil von PU-Hartschaum	35
Tab. 22:	HFKW-Emissionen aus PU-Schaumprodukten 2000 bis 2010 im Vergleich der Szenarien I und II	38

Tab. 23:	Emissionsprofil für XPS-Hartschaum	41
Tab. 24:	Die HFKW-Emissionen vom XPS-Schaum 2000-2010 nach Szenario I und II in Tonnen	43
Tab. 25:	HFKW-Emissionen aus Asthma-Dosieraerosolen 1995 bis 1998 in t und Mio. t CO ₂ -Äquivalente	44
Tab. 26:	HFKW-Emissionen aus Dosieraerosolen 2000, 2005 und 2010 im Vergleich der Szenarien I und II	46
Tab. 27:	Verbrauch und Emissionen von HFKW-23 in der Halbleiterindustrie 1995-1997 in t/a	48
Tab. 28:	Jahresemissionen von HFKW-23 aus der Halbleiterfertigung 1995-2010 nach BaU-Szenario I	48
Tab. 29:	Jahresemissionen von HFKW-23 aus der Halbleiterfertigung 1995-2010 nach Minderungsszenario II	48
Tab. 30:	Inl. Verbrauch und Emissionen von sonstigen HFKW 1995-1997 in t/a und Mio. t CO ₂ -Äquivalente	49
Tab. 31:	Sonstige HFKW-Emissionen 1995-2010 in t und Mio. t CO ₂ -Äquivalente	51
Tab. 32:	SF ₆ -Emissionen nach Sektoren 1995-2010 in t/a nach BaU-Szenario I	60
Tab. 33:	SF ₆ -Emissionen nach Sektoren 1995-2010 nach BaU-Szenario I in Mio. t CO ₂ -Äquivalente	61
Tab. 34:	SF ₆ -Emissionen nach Sektoren 1995-2010 in t/a nach Szenario II	62
Tab. 35:	SF ₆ -Emissionen nach Sektoren 1995-2010 nach Szenario II in Mio. t CO ₂ -Äquivalente	62
Tab. 36:	Emissionen von SF ₆ nach Sektoren 1995-1997 in t/a	64
Tab. 37:	Emissionen von SF ₆ nach Sektoren 1995-1997 in Mio. t CO ₂ -Äquivalente	64
Tab. 38:	Inländischer SF ₆ -Verbrauch der Hersteller elektrischer Betriebsmittel 1995-1997 in t/a	66
Tab. 39:	Inländische SF ₆ -Emissionen von Herstellern und Betreibern elektrischer Betriebsmittel 1995-1997 in t/a	67
Tab. 40:	SF ₆ -Emissionen bei Betreibern elektrischer Betriebsmittel 1995-2010 in t/a nach Anlagenalter (Prognose)	70
Tab. 41:	Gesamte Jahresemissionen von SF ₆ bei Betriebsmitteln zur Stromversorgung 1995-2010 (Prognose)	71
Tab. 42:	SF ₆ -Verbrauch für Schallschutzscheiben in Tonnen 1995-1998	74
Tab. 43:	SF ₆ -Emissionen aus Schallschutzscheiben in t/a und nach Beitrag zum Treibhauseffekt 1995-1998	76
Tab. 44:	SF ₆ -Emissionen aus Schallschutzscheiben 1995-2010 in t/a nach BAU-Szenario I	77
Tab. 45:	SF ₆ -Emissionen aus Schallschutzscheiben 1995-2010 in t nach Szenario II	79
Tab. 46:	SF ₆ -Emissionen aus Schallschutzscheiben 1995-2010 - Szenario I und II in Mio. t CO ₂ -Äquivalente	80
Tab. 47:	SF ₆ -Emissionen aus Autoreifen 1995-2010 in t und in Mio. t CO ₂ -Äquivalente	85
Tab. 48:	SF ₆ -Emissionen vom Magnesiumguß 1995 bis 2010 im Vergleich der Szenarien I und II	90
Tab. 49:	Verbrauch und Emissionen von SF ₆ in der Halbleiterindustrie 1995-1997 in t/a	91
Tab. 50:	Jahresemissionen von SF ₆ aus der Halbleiterfertigung 1995-2010 nach BaU-Szenario I	91
Tab. 51:	Jahresemissionen von SF ₆ aus der Halbleiterfertigung 1995-2010 nach Minderungsszenario II	91
Tab. 52:	SF ₆ -Inlands-Emissionen in sonstigen Anwendungen 1995-1997 in t/a	92
Tab. 53:	SF ₆ -Emissionen aus Teilchenbeschleunigern 1995-1997 in t/a	93
Tab. 54:	SF ₆ -Emissionen bei HS-Elektronenmikroskopen 1995-1997 in kg/a	93
Tab. 55:	Emissionen aus Röntgen-Materialuntersuchungsgeräten 1995-1997 in kg/a	94
Tab. 56:	SF ₆ -Emissionen von Röntgen-Therapiegeräten 1995-1997 in kg/a	95
Tab. 57:	Emissionen von SF ₆ als Tracergas 1995-1997 in kg/a	95
Tab. 58:	SF ₆ -Emissionen vom AWACS-Radar 1995-1997 in kg/a	96
Tab. 59:	SF ₆ -Reinigungsgas von Aluminiumschmelzen 1995-1997 in kg/a	96

Tab. 60:	SF ₆ -Emissionen aus Sondergebieten einschl. Sportschuhen 1995-1997 in t/a	97
Tab. 61:	SF ₆ -Emissionen sonstiger Bereiche in t und Mio. t CO ₂ -Äquivalente	98
Tab. 62:	Inländische SF ₆ -Emissionen aus sonstigen Anwendungen 1995-2010 in t/a und Mio. t CO ₂ -Äquivalente	98
Tab. 63:	PFC-Emissionen 1995-2010 nach Herkunft nach BaU-Szenario I in t/a	104
Tab. 64:	PFC-Emissionen 1995-2010 nach Herkunft nach BaU-Szenario I in Mio. t CO ₂ -Äquivalente	104
Tab. 65:	PFC-Emissionen 1995-2010 nach Herkunft nach Minderungsszenario II in t/a	105
Tab. 66:	PFC-Emissionen 1995-2010 nach Herkunft nach Minderungsszenario II in Mio. t CO ₂ -Äquivalente	106
Tab. 67:	PFC-Emissionen nach Sektoren 1995-1997 in t/a	108
Tab. 68:	PFC-Emissionen nach Sektoren 1995-1997 in Mio. t CO ₂ -Äquivalente	108
Tab. 69:	PFC-Emissionen der inländischen Aluminiumhütten 1995-1997 in t/a	112
Tab. 70:	CF ₄ -Emissionskoeffizienten der inländischen Aluminiumhütten in kg/t Al nach Verfahren der Oxidzufuhr	113
Tab. 71:	CF ₄ - und C ₂ F ₆ -Emissionen aus der Aluminiumverhüttung 1995-2010 in t/a und Mio. t CO ₂ -Äquivalente nach BaU-Szenario I	114
Tab. 72:	CF ₄ - und C ₂ F ₆ -Emissionen aus der Aluminiumverhüttung 1995-2010 in t/a und Mio. t CO ₂ -Äquivalente nach Szenario II	115
Tab. 73:	Verbrauch und Emissionen von PFC in der Halbleiterindustrie 1995-1997 in t/a	117
Tab. 74:	PFC-Emissionen aus der Halbleiterindustrie 1995-2010 nach BaU-Szenario I in t/a	118
Tab. 75:	PFC-Emissionen aus der Halbleiterindustrie 1995-2010 nach Minderungsszenario II in t/a	118
Tab. 76:	Verbrauch und Emissionen von CF ₄ in der Leiterplattenfertigung 1995-2010	120
Tab. 77:	Verbrauch und Emissionen von C ₃ F ₈ (R-218) als Kältemittel-Komponente 1995-1997 in t	121
Tab. 78:	Emissionen von C ₃ F ₈ (R-218) als Kältemittel-Komponente 1995-2010 nach BaU-Szenario I in t/a	122
Tab. 79:	Verbrauch fluorierter Ätze (FC) in der Halbleiterindustrie 1995-1997 in t/a	126
Tab. 80:	Typische FC-Umsetzungsraten im Plasma in % der Einsatzmenge	127
Tab. 81:	FC-Emissionen aus der Halbleiterindustrie 1995 - 1997 in t	128
Tab. 82:	Effektive FC-Emissionen aus der Halbleiterindustrie 1995-2010 in t/a nach BaU-Szenario I	130
Tab. 83:	FC-Emissionen aus der Halbleiterindustrie 1995-2010 in t/a nach Minderungsszenario II	134

Diagramme und Abbildungen

Diagramm I:	Emissionen der drei fluorierten Treibhausgase 1995-2010 nach BaU-Szenario in Mio. t CO ₂ -Äquivalente.	X
Diagramm II:	Emissionen der drei fluorierten Treibhausgase 1995-2010 nach Minderungsszenario in Mio. t CO ₂ -Äquivalente.	X
Diagramm 1:	Inländische HFKW-Emissionen bis 2010 nach Szenario I und II in Tsd. Tonnen.	5
Diagramm 2:	HFKW-Emissionen 1995-2010 im Vergleich Szenario I und II in Mio. t CO ₂ -Äquivalente.	5
Diagramm 3:	HFKW-Emissionen aus Kälte- und stationären Klimaanlageanlagen 1993-1998 in t und Mio. t CO ₂ -Äquivalente.	10
Diagramm 4:	Lfd. und Entsorgungs-Emissionen von HFKW aus Kälte- und stationären Klimaanlageanlagen 1995-2010 in t (Szenario I).	13
Diagramm 5:	Lfd. und Entsorgungsemissionen von HFKW aus Kälte- und stationären Klimaanlageanlagen 1995-2010 in t - Szenario I u. II.	16
Diagramm 6:	HFKW-Emissionen aus Kälte- und stationären Klimaanlageanlagen in Mio. t CO ₂ -Äquivalente (Szenario I und II).	16
Diagramm 7:	HFKW-134a-Emissionen aus Pkw-Klimaanlagen 1993-1998 in t und in Mio. t CO ₂ -Äquivalente.	19
Diagramm 8:	Lfd. und Entsorgungs-Emissionen von R134a aus Pkw-Klimaanlagen 1995-2020 in t (Szenario I - BaU).	21
Diagramm 9:	Lfd. und Entsorgungs-Emissionen von R134a aus Pkw-Klimaanlagen 1995-2010 in t - Vergleich Szenario II mit I.	24
Diagramm 10:	HFKW-Emissionen aus Mobilklimaanlagen in t. Vergleich Szenario II mit I.	27
Diagramm 11:	HFKW-Emissionen aus mobilen Klimaanlageanlagen in Mio. t CO ₂ -Äquivalente Szenario I und II.	28
Diagramm 12:	HFKW-Emissionen aus PU-Schaum-Dosen 1995-2010 in Tonnen.	30
Diagramm 13:	HFKW-Emissionen aus PU-Schaum-Dosen 1995-2010 in Mio. t CO ₂ -Äquivalente - Szenario I und II.	32
Diagramm 14:	HFKW-134a-Emissionen aus PU-Hartschaum 1998-2010 in t Szenario I und II.	37
Diagramm 15:	Emissionen von HFKW 245fa/365mfc aus PU-Hartschaum 2002-2010 in t Szenario I und II.	38
Diagramm 16:	HFKW-Emissionen aus PU-Schaumprodukten 1995-2010 in Mio. t. CO ₂ -Äquivalente.	39
Diagramm 17:	HFKW 152a/134a-Emissionen aus XPS-Schaum 1999-2010 in t Szenario I und II.	42
Diagramm 18:	HFKW-Emissionen aus XPS-Hartschaum 1995-2010 in Mio. t CO ₂ -Äquivalente (Szenario I und II).	43
Diagramm 19:	HFKW-Emissionen aus Asthma-Dosieraerosolen 1995 bis 1998 in t/a.	44
Diagramm 20:	HFKW-Emissionen aus Dosieraerosolen 1996-2010 in t - Szenario I und II.	47
Diagramm 21:	HFKW-Emissionen aus Dosieraerosolen in Mio. t CO ₂ -Äquivalente.	47
Diagramm 22:	SF ₆ -Emissionen in Deutschland bis 2010 nach Szenario I und II in Tonnen.	63
Diagramm 23:	SF ₆ -Emissionen 1995-2010 im Vergleich Szenario I und II in Mio. t CO ₂ -Äquivalente.	63
Diagramm 24:	Jahresemissionen von SF ₆ bei elektrischen Betriebsmitteln 1995-2010 in t (Prognose).	71
Diagramm 25:	SF ₆ -Emissionen aus Schallschutzscheiben 1995-2010 nach Szenario I.	77
Diagramm 26:	SF ₆ -Emissionen aus Schallschutzscheiben 1995-2010 in t/a nach Szenario II.	79
Diagramm 27:	SF ₆ -Emissionen aus Schallschutzscheiben nach Beitrag zum Treibhauseffekt - Szenario I und II.	80
Diagramm 28:	Autoreifen: Verbrauch und Emissionen von SF ₆ 1995-1998 in Tonnen.	82

Diagramm 29: Emissionen von SF ₆ als Reifenfüllgas 1995-2010 im Vergleich der Szenario I und II in Tonnen.	84
Diagramm 30: SF ₆ -Einsatz für Magnesiumguß 1995-1998 in t/a und kg pro Tonne Mg.	87
Diagramm 31: SF ₆ -Emissionen vom Magnesiumguß 1995-2010 in Tonnen pro Jahr nach Szenario I und II.	89
Diagramm 32: SF ₆ -Emissionen vom Magnesiumguß nach Beitrag zum Treibhauseffek Szenario I und II.	90
Diagramm 33: PFC-Emissionen 1995-2010 im Vergleich Szenario I und II in Mio. t CO ₂ -Äquivalente.	106
Diagramm 34: PFC-Emissionen 1995-2010 nach Herkunft in BaU-Szenario I in Tonnen pro Jahr.	107
Diagramm 35: PFC-Emissionen 1995-2010 nach Herkunft in Szenario II in Tonnen pro Jahr.	107
Diagramm 36: CF ₄ - und C ₂ F ₆ -Emissionen aus dt. Aluminiumhütten 1995-2010 in t/a nach Szenario I u. II.	116
Diagramm 37: PFC-Emissionen aus der Halbleiterindustrie 1995-2010 in t im Vergleich Szenario I u. II.	119
Diagramm 38: PFC-Emissionen aus der Halbleiterindustrie 1995-2010 in Mio. t CO ₂ -Äquivalente (Szenario I und II).	119
Diagramm 39: FC-Emissionen aus der Halbleiterfertigung 1995-2010 in t/a nach Szenario I und II.	135
Diagramm 40: FC-Emissionen aus der Halbleiterfertigung 1995-2010 in Mio. t CO ₂ -Äquivalente nach Szenario I und II.	135

Abbildungen

Abb. 1: Emissionen von HFKW, SF ₆ und PFC im Jahr 2010 nach einzelnen Quellen - ohne Minderungsmaßnahmen	III
Abb. 2: Randverbund von Mehrscheiben-Isolierglas mit SF ₆ -Füllung zum erhöhten Schallschutz.	73
Abb. 3: Stoffstrom der 1997 in der deutschen Halbleiterindustrie insgesamt eingesetzten FC.	129

Kenndaten fluorierter Verbindungen

Substanz	Summenformel bzw. Zusammensetzung	Name	GWP 100
FKW			
	CF ₄	14	6500
	C ₂ F ₆	116	9200
	C ₃ F ₈	218	7000
HFKW			
	CHF ₃	23	11700
	CH ₂ F ₂	32	650
	C ₂ HF ₅	125	2800
	C ₂ H ₂ F ₄	134a	1300
	C ₂ H ₃ F ₃	143a	3800
	C ₂ H ₄ F ₂	152a	140
	C ₃ HF ₇	227	2900
	C ₃ H ₂ F ₆	236fa	6300
	C ₃ H ₃ F ₅	245fa	820
	C ₄ H ₅ F ₅	365mfc	810
	C ₅ H ₂ F ₁₀	43-10mee	1300
HFKW-Mischungen			
	143a/125/134a (52/44/4)	404A	3260
	32/125/134a (23/25/52)	407C	1525,5
	32/125 (50/50)	410A	1725
	125/143a (50/50)	507	3300
	404A/507 (80/20)	404A/507	3268
Sonstige			
	SF ₆		23900
	NF ₃		8000
	C ₄ F ₉ OCH ₃	HFE 7100	500

Erläuterung

In der vorliegenden Studie ist "Minderungspotential" immer als "relatives Minderungspotential" zu sehen. Relatives Minderungspotential charakterisiert dabei nicht das technisch mögliche, sondern ein in einem ersten Schritt kurzfristig umsetzbares Potential.