

Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und
Reaktorsicherheit

Forschungsbericht 106 01 074/01

**Aktuelle und künftige Emissionen treibhauswirksamer fluorierter
Verbindungen in Deutschland**

von

Dr. Winfried Schwarz
Dr. André Leisewitz

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

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Dezember 1996

Berichts - Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB	2.	3.
4. Titel des Berichts Aktuelle und künftige Emissionen treibhauswirksamer fluoriierter Verbindungen in Deutschland		
5. Autoren, Namen, Vornamen Dr. Winfried Schwarz, Dr. André Leisewitz		8. Abschlußdatum 15.12.1996
		9. Veröffentlichungsdatum 7.3.1997
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Öko-Recherche, Büro für Umweltforschung und -beratung GmbH, Münchener Str. 33, 60329 Frankfurt am Main		10. UFOPLAN - Nr. 106 01 074/01
		11. Seitenzahl IV + 148
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt, Bismarckplatz 1, 14193 Berlin		12. Literaturangaben 232
		13. Tabellen und Diagramme 64 + 45
		14. Abbildungen 1
15. Zusätzliche Angaben		
16. Kurzfassung Die fluorierten Verbindungen Schwefelhexafluorid (SF ₆), perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe (CF ₄ , C ₂ F ₆) und wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW) zählen zu den atmosphärischen Spurengasen mit extrem hohen Treibhauspotentialen. Die Studie untersucht für Deutschland ihre realen Emissionen für 1990-1995 und stellt Prognosen für die Jahre bis 2020 auf. Diesen Prognosen zufolge vermindern sich die jährlichen Freisetzungen von CF ₄ /C ₂ F ₆ von 1990 bis 2000 von 335 t/34 t auf 100 t/10 t infolge Automatisierungsmaßnahmen an der Hauptquelle (Aluminiumhütten). Die Emissionen von SF ₆ bleiben dagegen bis 2020 im Schwankungsbereich zwischen 200 und 300 t jährlich. Hauptemittenten sind nicht elektrische Schaltanlagen, da diese relativ dicht sind und über ein Entsorgungs- und Wiederaufarbeitungskonzept für gebrauchtes Gas verfügen, sondern mit großem Abstand Autoreifen und Schallschutzscheiben. Bei den erst seit 1990 gezielt als FCKW-Nachfolger eingesetzten H-FKW ist mit fortschreitender FCKW-Substitution in der stationären und mobilen Kälte- und Klimatechnik, bei PU-Montageschaum und Asthasprays mit einer sprunghaften Zunahme der Emissionen bis auf über 9700 t/a ab dem Jahr 2007 zu rechnen, sofern sich nicht halogenfreie Alternativen stärker durchsetzen. Im Jahr 2020 werden bei Annahme dieser Trends die kumulierten Emissionen der genannten fluorierten Verbindungen der Treibhauswirkung von 25 Mio. t CO ₂ entsprechen (GWP-Betrachtungszeitraum: 100 Jahre).		
17. Schlagwörter Treibhauseffekt; Schwefelhexafluorid (SF ₆); Wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW); FCKW-Ersatz; R134a; Kältemittel; Treibmittel; Tetrafluormethan (CF ₄); Hexafluorethan (C ₂ F ₆); Perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe (PFC); Emissionen fluoriierter Verbindungen in Deutschland		
18. Preis	19.	20.

Report Cover Sheet

1. Report No. UBA-FB	2.	3.
4. Report Title Current and Future Emissions of Fluorinated Compounds with Global Warming Impact in Germany		
5. Authors, Family Names, First Names Dr. Winfried Schwarz, Dr. André Leisewitz	8. Report Date 15.12.1996	
	9. Publication Date 7.3.1997	
6. Performing Organisation (Name, Adress) Öko-Recherche, Büro für Umweltforschung und -beratung GmbH, Münchener Str. 33, 60329 Frankfurt am Main	10. UFOPLAN - Ref. No. 106 01 074/01	
	11. No. of Pages IV + 148	
7. Sponsoring Agency (Name, Adress) Umweltbundesamt, Bismarckplatz 1, 14193 Berlin	12. No. of References 232	
	13. No. of Tables, Diagrams 64 + 45	
	14. No. of Figures 1	
15. Supplementary Notes		
16. Abstract <p>The fluorinated compounds sulphur hexafluoride (SF₆), perfluorocarbons (CF₄, C₂F₆) and hydrofluorocarbons (HFCs) are atmospheric trace gases with extremely high global warming potentials (GWP). The study examines for Germany the real emissions of these compounds in 1990-1995, and develops projections for the years up to 2020. These projections indicate that annual perfluorocarbon releases will drop between the years 1990 and 2000 from 335 t/34 t to 100 t/10 t due to automation measures at the main source (aluminium smelting). Sulphur hexafluoride emissions, however, will remain in the range between 200 and 300 t per annum until the year 2020. By far the largest emitters are car tyres and sound-insulation glazing, not electrical swithgear, the latter being relatively well sealed and linked to management and reprocessing concepts for used gas. As concerns hydrofluorocarbons, which have only been used since 1990 with the specific intention of substituting chlorofluorocarbons (CFCs), an increasing degree of CFC substitution in stationary and mobile refrigeration technology, in canned PUR foams and in asthma sprays must be expected to lead to steeply rising emissions to levels exceeding 9,700 t/a from the year 2007 onwards, if halogen-free alternatives are not used more strongly. Assuming these trends, the cumulative emissions of the stated fluorinated compounds will by the year 2020 correspond to a global warming impact of 25 million t CO₂ (GWP time horizon: 100 years).</p>		
17. Keywords <p>Global Warming Impact; Greenhouse Gases; Sulphur hexafluoride (SF₆); Hydrofluorocarbons (HFC); CFC Replacement; R134a; Refrigerants; Propellants; Tetrafluormethane (CF₄); Hexafluorethane (C₂F₆); Perfluorocarbons (PFC); Emissions of Fluorinated Compounds in Germany</p>		
18. Price	19.	20.

Inhalt

Inhalt	I
Zusammenfassung	1
1. Inländische Emissionen der drei Stoffgruppen - Trends	2
2. Treibhauswirksamkeit der Emissionen	5
3. Zur Klimarelevanz der inländischen Emissionen fluoriertes Verbindungen	6
I. Schwefelhexafluorid - SF₆	7
Überblick	7
Die sechs inländischen Verbrauchergruppen	7
Emissionen	8
Künftige Emissionsentwicklung	10
Beitrag zum Treibhauseffekt	11
Anhang. Die Jahre 1990 bis 1995	12
1. Anlagen der Stromversorgung	13
1.1 SF ₆ -befüllte Betriebsmittel zur Stromversorgung: Schaltanlagen und Wandler	13
1.1.1 Hochspannungsschaltanlagen (110-380 kV)	13
1.1.2 Hochspannungs-Meßwandler	15
1.1.3 Mittelspannungsschaltanlagen (10-30 kV)	15
1.2 Verbrauch von SF ₆ für elektrische Betriebsmittel	16
1.2.1 Schaltanlagen und -geräte	17
1.2.2 Meßwandler	18
1.2.3 Transformatoren	18
1.2.4 Künftige SF ₆ -Verbräuche der inländischen Hersteller	18
1.3 Inländische Emissionen 1990 und 1995	19
1.3.1 Befüllungsemissionen	19
1.3.2 Bestandsemissionen	19
1.3.3 Empirische Erhebung der Bestandsemissionen durch den VDEW für 1995	20
1.4 Emissionsentwicklung 1990 bis 2020	22
2. Schallschutzscheiben	25
2.1 SF ₆ als Schalldämmgas	25
2.2 Markt und Verbrauch	26
2.3 Die drei Formen von Emissionen	28
2.3.1 Befüllungsverluste	28
2.3.2 Bestandsemissionen	29
2.3.3 Entsorgungsverluste	30
2.3.4 Menge und Zusammensetzung der Emissionen 1990 bis 2030	30
2.4 Der Beitrag zum Treibhauseffekt durch SF ₆ -Emissionen von 1975 bis 2030	32
2.5 Alternativen zu SF ₆	33
3. Autoreifen	34
3.1 Erhöhte Druckstabilität dank SF ₆	34
3.2 Verbrauch und Emission	34
3.3 Bedenken gegen SF ₆ im Reifen	35
3.4 Künftige Emissionsentwicklung: Halbierung zu erwarten	37
3.5 Alternativen	37

3.6 Beitrag zum Treibhauseffekt durch SF ₆ -Emissionen aus Autoreifen	38
4. Magnesiumgießen	39
4.1 SF ₆ als Schutzgas der Magnesiumschmelze	39
4.2 Verbrauch und Emissionen von SF ₆	40
4.2.1 Oxidationsschutz der inländischen Gießereien	40
4.2.2 Die SF ₆ -Emissionen pro Tonne Magnesiumguß	41
4.3 Künftige Verbrauchs- und Emissionsentwicklung	42
4.3.1 Steigende Magnesiumnachfrage der Autoindustrie	42
4.3.2 Bedenken der Magnesiumlieferanten gegen SF ₆ -Emissionen	43
4.3.3 Vervierfachung der Magnesiumgußproduktion gegenüber 1990 ohne Steigerung der SF ₆ -Emissionen (Szenario)	43
5. Halbleiterfertigung	45
6. Sonstige Bereiche	46
6.1 Tandem-Teilchenbeschleuniger mit Van-de-Graaff-Generatoren	46
6.2 Hochspannungs-Elektronenmikroskope	47
6.3 Röntgen-Materialuntersuchungsgeräte	48
6.4 Röntgen-Therapiegeräte (Linearbeschleuniger)	49
6.5 SF ₆ als Tracergas für die Untersuchung bodennaher und atmosphärischer Luftströmungen	49
6.6 Flugzeugradar	50
6.7 Reinigungsgas für Sekundäraluminiumguß	50
6.8 Sondergebiete einschl. Füllgas in Sportschuhen	51
6.9 Vermutete, aber nicht verifizierte SF ₆ -Anwendungen	51
6.10 Beitrag zum Treibhauseffekt	52
Nachweise zu SF₆	53
II. Perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe CF₄ und C₂F₆	57
Überblick	57
Rückgang der inländischen Emissionen	57
Sinkender Beitrag zum Treibhauseffekt	58
Anhang. Die Jahre 1990 bis 1995	60
1. CF₄ und C₂F₆ aus der Aluminiumelektrolyse	61
1.1 Die Aluminium-Elektrolyse	61
1.2 Der Anodeneffekt	62
1.3 Umgang mit dem Anodeneffekt früher und heute	62
1.4 Oxidzufuhr - Schlüssel zur Verminderung der Anodeneffekt-Häufigkeit	63
1.4.1 Oxidzufuhr von der Seite (SWPB)	63
1.4.2 Zufuhr durch die Mitte (CWPB)	64
1.4.3 Punktdosierung (PFPB)	65
1.5 Kapazitätsabbau und Ofen-Modernisierung 1990 bis 2000	65
1.6 Empirische Messung der CF ₄ -Emissionen: Daten für 1990 und 1996	66
1.7 Abschätzung der zukünftigen CF ₄ -Emissionen	67
1.8 Ergänzung zum Ausgangsjahr 1990: DDR-Elektrolysen	69
1.9 Die Emissionen aus deutschen Aluminiumhütten von 1990 bis 2000 ff.	70
1.10 Beitrag zum Treibhauseffekt durch PFC-Emissionen der Aluminiumhütten	72
2. CF₄ und C₂F₆ als Halbleiter-Ätzgase	73
3. CF₄ in der Leiterplattenfertigung	74

4. CF₄ als Nebenprodukt der FCKW-Produktion	75
Nachweise für CF₄ und C₂F₆	76
III. Wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe - H-FKW	79
Überblick: H-FKW als FCKW-Nachfolger	79
Verlust vieler FCKW-Anwendungen an halogenfreie Alternativen	79
Zwei Emissionsprognosen für die vier H-FKW-Bereiche	80
Emissionsmodell "Voller H-FKW-Umstieg": Zusammenfassung	81
Beitrag zum Treibhauseffekt	82
Emissionsmodell "Teilweiser H-FKW-Umstieg": Zusammenfassung	83
Verminderte Emissionsmengen	84
Geringerer Beitrag zum Treibhauseffekt	85
Anhang. Die Jahre 1990 bis 1995	86
1. Kältemittel für stationäre Anlagen	87
Aktueller und künftiger Kältemittelbestand	87
Exkurs: Kältemischungen aus einzelnen H-FKW	88
A: Modell Voller H-FKW-Umstieg	90
1.1 Die Zusammensetzung der Kältemittel im H-FKW-Zielbestand	90
1.2 Neuverbräuche von Kältemitteln bei vollem H-FKW-Umstieg	91
1.3 H-FKW-Kältemittlemissionen bei vollem H-FKW-Umstieg	93
B: Modell Partieller H-FKW-Umstieg	95
1.4 Trend zu Ammoniak und Kohlenwasserstoffen	95
1.5 Emissionen von Kältemitteln bei partiellem H-FKW-Umstieg	96
C: Beitrag zum Treibhauseffekt im Vergleich	98
2. Kältemittel in mobilen Anwendungen	99
A: Modell Voller H-FKW-Umstieg	99
2.1 Bestands- und Verbrauchsentwicklung in der Mobilkälte	99
2.1.1 Pkw-Klimaanlagen	99
<i>Anhaltend hohe Wachstumsraten</i>	100
<i>Anstieg des Neuverbrauchs bis 2005 auf 3500 Tonnen</i>	100
2.1.2 Sonstige Mobilkälte	101
<i>Verbrauchsentwicklung bei sonstiger Mobilkälte</i>	102
2.2 Emissionen aus der Mobilkälte	104
2.2.1 Emissionen aus Pkw-Klimaanlagen bis fast 2400 Tonnen	104
2.2.2 Emissionen aus der sonstigen Mobilkälte	105
2.2.3 Die Emissionen aus der gesamten Mobilkälte	105
B: Modell Partieller H-FKW-Umstieg	107
2.3 Kältemittel CO ₂	107
2.4 Rückgang von R134a-Verbrauch und -Emissionen ab 2005	107
2.5 Weniger H-FKW-Emissionen in der gesamten Mobilkälte	109
C: Beitrag zum Treibhauseffekt im Vergleich	110
3. Treibmittel für PU-Montageschaum	112
3.1 Die Funktion der fluorierten Treibmittel	112
3.2 Markt und Außenhandel	112

3.3 Übereinstimmung von Verbrauch und Emission	113
A: Emissionsmodell 50 zu 50	114
B: Emissionsmodell 0 zu 100	115
C: Beitrag zum Treibhauseffekt im Vergleich	116
4. Asthmasprays	117
4.1 Die Vorzüge der Inhalationstherapie und das Sprayverfahren	117
4.2 Pulverinhalation begrenzt das Marktpotential für Sprays	118
4.2.1 Mehrfach dosierbare Pulverinhalatoren seit 1990	118
4.3 Medizinisches Pro und Contra Pulverinhalation	119
4.4 Aktuelle FCKW-Mengen im Bereich der gesamten Inhalationstherapie	120
A: Modell Voller H-FKW-Umstieg	122
B: Modell Partieller H-FKW-Umstieg	123
C: Beitrag zum Treibhauseffekt im Vergleich	124
5. Sonstige H-FKW	125
5.1 H-FKW als unerwünschtes Nebenprodukt	125
5.2 H-FKW als Halbleiter-Ätzgas	126
5.3 H-FKW als Feuerlöschmittel	126
5.4 H-FKW als Reinigungs-Lösemittel	127
5.5 Beitrag zum Treibhauseffekt	127
Nachweise zu H-FKW	128
IV. Fluorierte Gase in der Halbleiterfertigung	133
Vorbemerkung	133
1. Plasmaätzen mit fluorierten Gasen	133
1.1 Der Plasmaprozeß	133
1.2 Strukturätzen	133
1.3 Kammerreinigung nach CVD-Beschichtung	134
2. Der Markt	134
2.1 Produktion und Außenhandel	136
3. Emissionen	136
3.1 Das Bezugsjahr 1990	136
3.2 Emissionen 1995 und danach	137
3.3 Einführung der PFC-Abgasreinigung	138
3.4 Verfahren zur Behandlung der nicht umgesetzten PFC	138
3.5 Verbreitungsgrad und Wirksamkeit der PFC-Abgasreinigung	139
3.6 Emissionsszenario für fluorierte Ätzgase 1990 bis 2020	140
3.7 Fazit zu den Emissionen	140
4. Der abnehmende Beitrag zum Treibhauseffekt ab 1995	141
Nachweise zur Halbleiterindustrie	143
Verzeichnis der Diagramme	145

Aktuelle und künftige Emissionen treibhauswirksamer fluoriierter Verbindungen in Deutschland

Zusammenfassung

Fluorierte Verbindungen wurden erst in den letzten Jahren auf ihre Klimarelevanz hin intensiver untersucht. Sie sind wegen ihres außerordentlich hohen spezifischen Beitrags zum Treibhauspotential u.a. Gegenstand politischer Verhandlungen mit dem Ziel einer Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre.

Es handelt sich vor allem um das vollfluorierte Schwefelhexafluorid (SF_6) und perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe wie Perfluormethan (CF_4) und Perfluorethan (C_2F_6). Dazu kommen wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW) wie R134a, R125 und R143a.

Die Klimawirksamkeit dieser Verbindungen resultiert aus ihren z.T. extrem langen, bis in den Bereich von Jahrtausenden reichenden, atmosphärischen Verweilzeiten, verbunden mit hoher spezifischer Absorption der einzelnen Moleküle im treibhausrelevanten infraroten Spektralbereich. Diese fluorierten Verbindungen stellen daher die mit Abstand treibhauswirksamsten Stoffe in der Atmosphäre dar. Die als Maßzahlen zum Vergleich mit CO_2 als Referenzsubstanz herangezogenen Global Warming Potentials (GWPs) erreichen bei Betrachtung eines Zeithorizontes von 100 Jahren für SF_6 Werte von 23900, für C_2F_6 9200, für CF_4 6500 und für die technisch wichtigsten H-FKW Werte zwischen 1000 und 2000 (GWP von $\text{CO}_2 = 1$). (IPCC 1995)

In der Bundesrepublik Deutschland werden jährlich nicht zu vernachlässigende Mengen aller drei genannten Gruppen von fluorierten Verbindungen frei. Die Hauptemissionsquellen für $\text{CF}_4/\text{C}_2\text{F}_6$ sind Aluminiumhütten, für SF_6 die Verwendung als Füllgas von Autoreifen und Schallschutzscheiben, für H-FKW die Kälte- und Klimatechnik.

Vorliegende Studie untersucht die Realentwicklung von Verbrauch und Emissionen der genannten Stoffe zwischen 1990 und 1995 und stellt auf der Grundlage der von Herstellern und Anwendern gegenwärtig verfolgten Trends Prognosen für die Jahre bis 2020 auf. Es versteht sich, daß die prognostizierten Emissionswerte zwar Plausibilität, aber nicht Verbindlichkeit beanspruchen können. Die Prognoseszenarien basieren auf eher konservativen Schätzungen. Dies impliziert, daß z.B. durch technisch/technologische Optimierung in vielen Fällen niedrigere Emissionsraten erreichbar sind.

1. Inländische Emissionen der drei Stoffgruppen - Trends

Die Emissionen von $\text{CF}_4/\text{C}_2\text{F}_6$, SF_6 und H-FKW entwickeln sich seit 1990 mit unterschiedlicher Richtung und Dynamik. Es ergeben sich folgende Prognosen bis 2020.

1.1 Emissionsrückgang bei $\text{CF}_4/\text{C}_2\text{F}_6$. Die jährlichen Freisetzungen vermindern sich bis zum Jahr 2000 auf 30% der Ausgangsmenge des Bezugsjahres 1990: von 355 t/42 t (1990) über 218 t/27 t (1995) auf langfristig stabile 106 t/12 t (vgl. Tabelle 1 u. Diagramm 1).

Hauptgrund dafür sind Kapazitätsabbau und - in stärkerem Maße - Modernisierungsmaßnahmen in der Aluminiumindustrie, die zu 95% jene Emissionen verursacht. Sie entstehen ungewollt als Nebeneffekt der elektrolytischen Reduktion von Tonerde zu Aluminium, und zwar umso weniger, je exakter und kontinuierlicher die Zufuhr der Tonerde in das Elektrolysebad erfolgt. Da das Modernisierungspotential der inländischen Aluminiumelektrolysen aus gegenwärtiger Sicht ab dem Jahr 2000 weitgehend ausgeschöpft sein wird, ist davon auszugehen, daß sich der Trend der Emissionsverringerung nicht bis ins nächste Jahrtausend fortsetzen wird.

Tab. 1: CF_4 -, C_2F_6 - und SF_6 -Emissionen 1990-2020 in Tonnen pro Jahr							
	1990	1995	2000	2005	2010	2020	Entwicklung 1990-2020
1. CF_4	355	218	106	105	105	105	- 70,4%
2. C_2F_6	42	27	12,5	11	11	11	- 73,8%
3. SF_6	163	251	208	186	226	292	+ 79,1%
4. H-FKW teilw.*	200	2202	4002	6160	6728	5033	+ 2426,5%
5. H-FKW vollst.*	200	2214	4873	7991	9700	9504	+ 4652,0%

"H-FKW teilw." und "H-FKW vollst." stellen zwei verschiedene Modelle zur Abschätzung der künftigen H-FKW-Emissionen dar. Wird angenommen, daß der Ersatz der FCKW und H-FCKW ganz durch H-FKW geschieht, ergibt sich der in Zeile 5 angegebene Trend; wird nur ein teilweiser Umstieg von FCKW/H-FCKW auf H-FKW angenommen, gilt Zeile 4.

1.2 Leichter Anstieg der Emissionen von SF_6 . Zwischen 1990 und 1995 sind die Inlandsemissionen von 163 t auf 251 t gestiegen. Halten die gegenwärtigen Nutzungstrends an, werden die Freisetzungen nach einem vorübergehenden Rückgang zwischen 1997 und 2000 erneut zunehmen und ihr Maximum im Jahr 2020 bei knapp 300 t erreichen (vgl. Tabelle 1 und Diagramm 1).

Die Zunahme der SF_6 -Emissionen von 1990 bis 1997 beruht auf einer Ausweitung der beiden mit jeweils 40-44% an den Gesamtemissionen beteiligten Anwendungen Füllgas für Autoreifen und für Schallschutz-Isolierglasscheiben. Ab 1997 ist zwar mit einem Rückgang der umstrittenen SF_6 -Verwendung zur Reifenfüllung zu rechnen; drei Jahre später (2000) auch mit einem entsprechenden Emissionsrückgang. Ab 2000 steigen allerdings die Emissionen aus dem Sektor Schallschutzscheiben kräftig an. Denn dann beginnt der Rückbau der seit 1975 genutzten und nach 20-30 Jahren Lebensdauer unbrauchbar gewordenen Fenstergläser. Da es im Unterschied zu SF_6 -isolierten

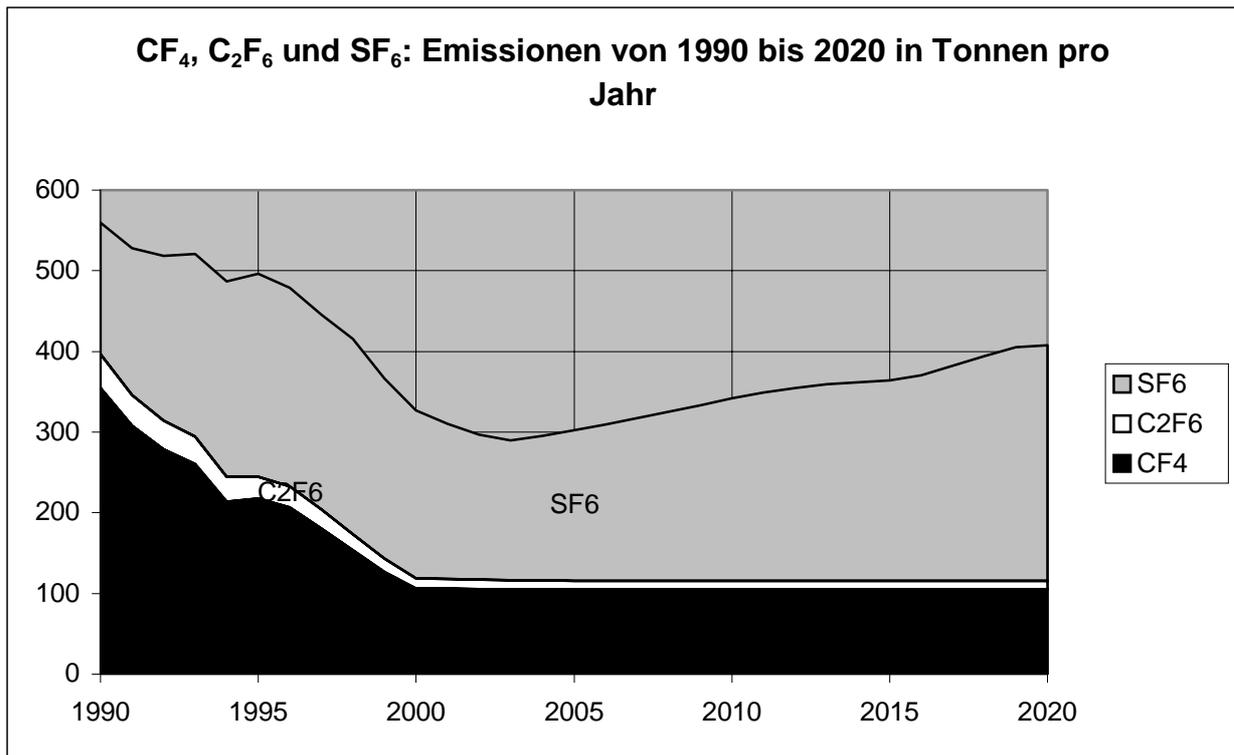


Diagramm 1: Emissionen vollfluorierter Verbindungen von 1990 bis 2020 in t/a (Realentwicklung und Prognose). Während die Emissionen der perfluorierten FKW CF₄ und C₂F₆ bis zum Jahr 2000 deutlich zurückgehen, nehmen die vor allem aus Autoreifen- und Schallschutzscheibenfüllung stammenden SF₆-Emissionen noch bis zum Jahr 2020 zu.

elektrischen Schaltanlagen bei der Ausmusterung kein Entsorgungs- oder Wiederaufarbeitungskonzept gibt, werden im Jahr 2020 fast 200 t SF₆ aus dem Sektor Schallschutzscheiben in die Atmosphäre entweichen. Gegenüber den Emissionsquellen Autoreifen und Schallschutzscheiben sind Hochspannungsschaltanlagen, Magnesiumgießereien und sonstige Anwendungsbereiche des Gases von untergeordneter Bedeutung. Die Gasisolierung von Hochspannungsschaltanlagen verbraucht zwar über die Hälfte der jährlich in Deutschland verkauften SF₆-Menge. Da diese Anlagen aber erstens sehr dicht sind und zweitens für ihre Entsorgung ein Wiederaufarbeitungskonzept des SF₆-Gases vorhanden ist, liegen die jährlichen Emissionen bei ca. 10 t.

1.3 Sprunghafte Zunahme bei H-FKW.

Die erst ab 1990 gezielt als FCKW/H-FCKW-Nachfolgestoffe hergestellten H-FKW emittieren in nennenswertem Umfang seit 1993 in die Atmosphäre. Im Jahre 1995 wurden rd. 2000 t des hauptsächlich Verwendung findenden-H-FKW Tetrahydrofluorethan (R 134a) freigesetzt. Die wegen des Verwendungsverbots notwendige FCKW-Substitution kann teilweise sowohl durch fluorierte Gase als auch durch halogenfreie Alternativen erfolgen. Diese Studie geht daher von zwei Szenarien (vollständiger FCKW-Ersatz durch H-FKW und teilweiser Umstieg auf H-FKW) aus.

Im Zuge der bis nach 2000 währenden FCKW-Substitution wird unter der Annahme eines vollständigen FCKW-Umstiegs auf H-FKW um das Jahr 2007 ein langfristig stabiliertes Emissionsniveau von ca. 9700 t/a erreicht werden (Tabelle 1, Z. 5; Diagramm 2). Wahrscheinlicher ist jedoch nur ein partieller Umstieg von FCKW auf H-FKW zu-

gunsten eines höheren Anteils halogenfreier Alternativen. In diesem Fall ist nach einem Maximum der H-FKW-Emissionen von ca. 7000 t im Jahr 2007 mit einem Emissionsrückgang auf 5 000 t/a bis 2020 zu rechnen (Tabelle 1, Z. 4; Diagramm 2).

Die seit 1990 für H-FKW infrage kommenden FCKW-Anwendungen sind Kältemittel in stationären und mobilen Anlagen sowie Treibgase für Polyurethan-Montage-Schaum und Asthmasprays. Bei vollständigem Umstieg auf H-FKW würden ab 2007 aus der stationären Kältetechnik (Gewerbe, Industrie, Gebäudeklima) jährlich knapp 5000 t und aus der mobilen Kältetechnik (zu 90% Pkw-Klimaanlagen) ca. 2600 t H-FKW frei. Dazu kämen 1700 t H-FKW-Treibgase aus PU-Schaumdosen und 400 t aus Asthmasprays.

Ein nur teilweiser H-FKW-Umstieg, der im Jahr 2020 mit nur etwa halb so viel Emissionen verbunden wäre, gründet sich auf die verstärkte Hinwendung zu Ammoniak und einfachen Kohlenwasserstoffen in der stationären Kältetechnik und zu Kohlendioxid bei Pkw-Klimaanlagen. In der inhalativen Asthmabehandlung werden als Alternative zu treibgasbasierten Dosiersprays bereits neuentwickelte dosiergenaue Pulverinhalatoren eingesetzt.

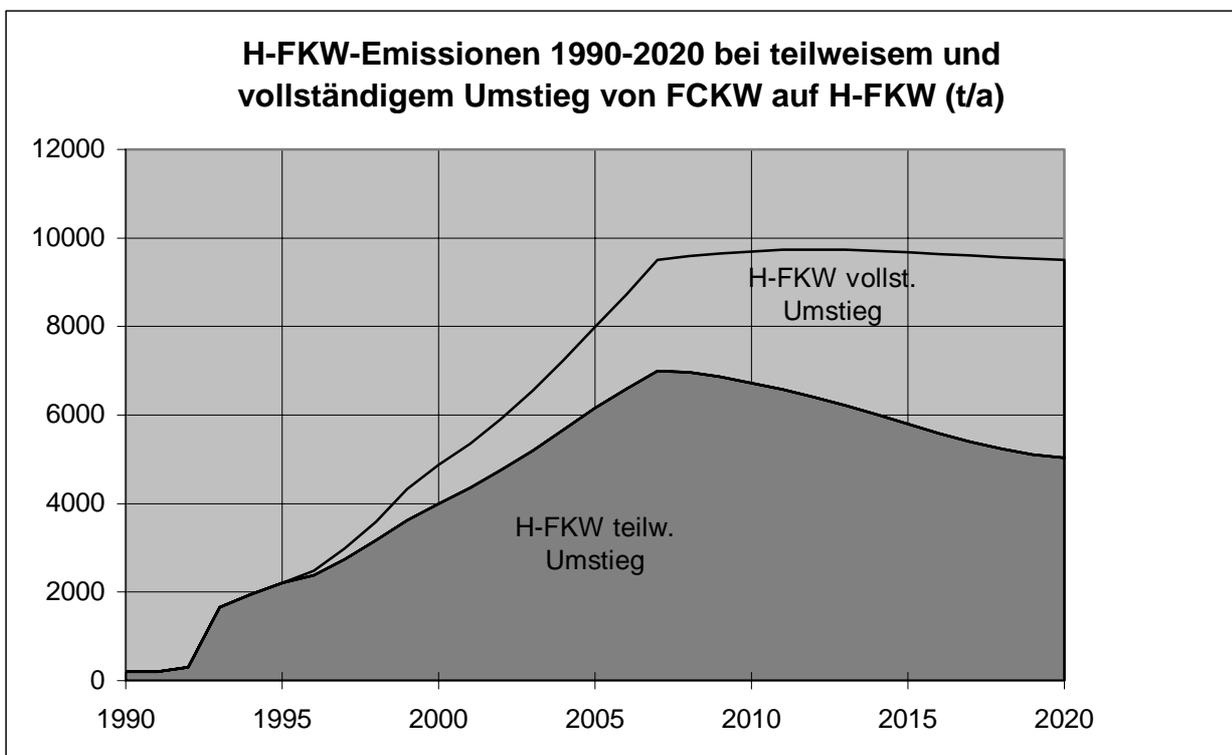


Diagramm 2: H-FKW-Emissionen 1990-2020 in Tonnen pro Jahr bei teilweisem und bei vollständigem FCKW-Umstieg auf H-FKW (Realentwicklung und Prognosen). Werden nicht alle gegenwärtigen FCKW/H-FCKW-Anwendungen durch H-FKW, sondern zum Teil durch halogenfreie Alternativen ersetzt (Ammoniak und brennbare Kohlenwasserstoffe in der stationären, CO₂ in der mobilen Kältetechnik), steigen die Emissionen nicht bis auf 9700 t/a, sondern nur bis auf 7000 t/a - mit rückläufiger Tendenz auf 5000 t/a im Jahr 2020.

2. Treibhauswirksamkeit der Emissionen

Tabelle 2 und Diagramm 3 geben den aus den Verbrauchs- und Emissionsprognosen abgeleiteten, kumulierten Beitrag der fluorierten Verbindungen zum Treibhauseffekt zwischen 1990 und 2020 wieder, gemessen in Mio. t CO₂-Äquivalente.

Tab. 2: Emissionen fluoriertes Verbindungen in Mio. t CO₂-Äquivalente 1990-2020						
	1990	1995	2000	2005	2010	2020
1. CF ₄	2,31	1,41	0,69	0,68	0,68	0,68
2. C ₂ F ₆	0,39	0,25	0,12	0,10	0,10	0,10
3. SF ₆	3,90	6,01	4,98	4,45	5,40	6,97
4. H-FKW teilw.	2,34	3,20	5,03	9,23	10,64	8,14
5. H-FKW vollst.	2,34	3,21	6,88	13,90	17,79	17,54

Berechnung: Tonnage der Emissionen aus Tabelle 1 - multipliziert mit den spezifischen GWP-Werten für einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren (IPCC 1995).

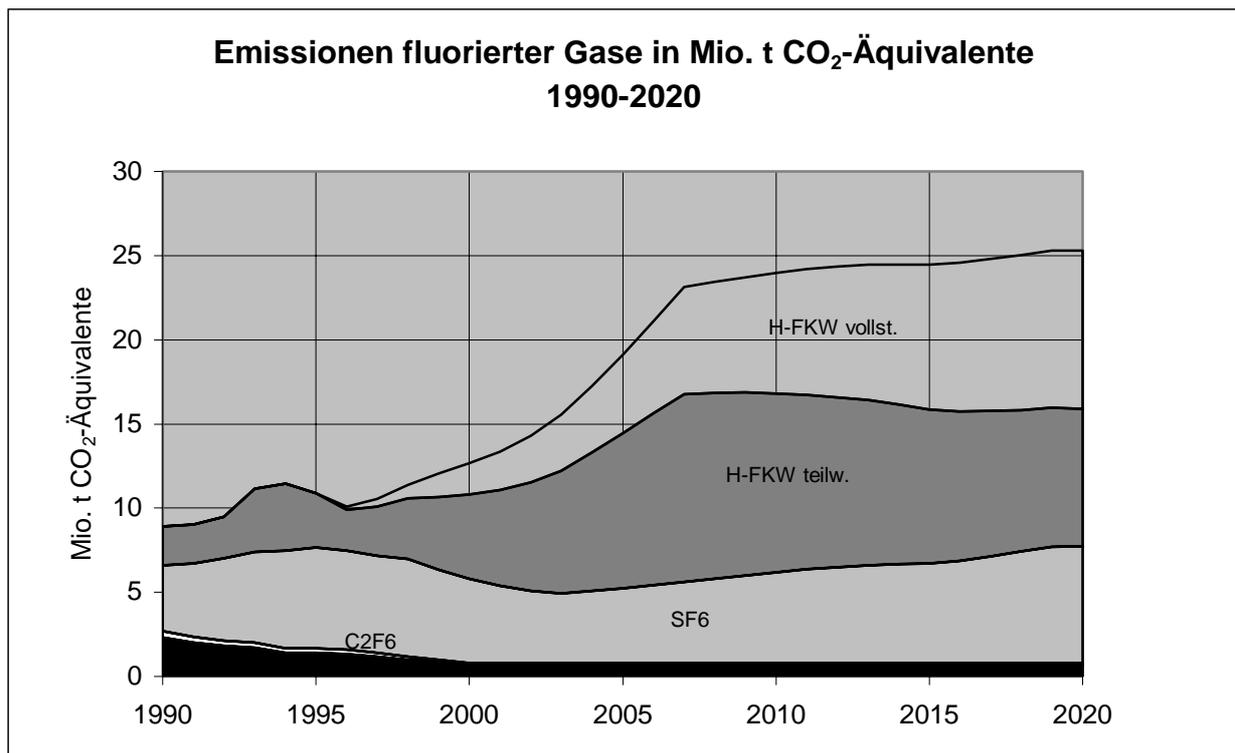


Diagramm 3: Emissionen fluoriertes Verbindungen in Mio. t CO₂-Äquivalente 1990-2020 (Realentwicklung und Prognosen). Die kumulierten Beiträge zum Treibhauseffekt entsprechen im Jahr 2020 im Falle vollständigen H-FKW-Umstiegs der Wirkung von 25 Mio. t CO₂. Die wichtigsten Stoffe sind SF₆ und H-FKW, während perfluorierte Alkane nach 2000 von geringerer Bedeutung sind. Sollte der Ersatz von FCKW nur teilweise durch H-FKW erfolgen ("H-FKW teilweise"), beträgt das Treibhauspotential der emittierten fluorierten Verbindungen fast 10 Mio. t CO₂-Äquivalente weniger.

Wie eingangs bemerkt, sind die spezifischen GWP-Werte der einzelnen fluorierten Verbindungen sehr verschieden. Das GWP von SF₆ beträgt mit 23900 mehr als das 18-fache des GWPs von H-FKW 134a, das 1300 CO₂-Äquivalenten entspricht. Darum ist, über einen 100-jährigen Zeitraum betrachtet, die Strahlungswirkung von 300 t SF₆ mit jener von 5000 t H-FKW vergleichbar, mit anderen Worten: Der Beitrag beider Stoffmengen zur Erwärmung der Erdatmosphäre ist in etwa gleich groß.

Von den betrachteten fluorierten Verbindungen kommt im Zeitraum 1990 bis 2000 dem SF₆ der größte Anteil am anthropogenen Treibhauseffekt zu. Dieses Verhältnis verschiebt sich zu Beginn des nächsten Jahrhunderts, ausgelöst durch verstärkte FCKW-Substitution in Richtung H-FKW.

Aus Tabelle 2 und Diagramm 3 wird nicht nur die große Klimarelevanz der SF₆- und H-FKW-Emissionen deutlich, sondern auch die entlastende Wirkung eines nur teilweisen H-FKW-Umstiegs gegenüber einem vollständigen. Die kumulierten Beiträge zum Treibhauseffekt entsprechen im Jahr 2020 im Falle eines vollständigen FCKW-Ersatzes durch H-FKW der Wirkung von 25 Mio. t CO₂. Sollte der Ersatz von FCKW nur partiell durch H-FKW erfolgen ("H-FKW teilweise"), beträgt das Treibhauspotential der emittierten fluorierten Verbindungen immerhin fast 10 Mio. t CO₂-Äquivalente weniger.

3. Zur Klimarelevanz der inländischen Emissionen fluoriierter Verbindungen

Die Bedeutung der Emissionen der fluorierten Verbindungen H-FKW, SF₆ und CF₄, C₂F₆ erscheint, gemessen an den inländischen Gesamtemissionen treibhauswirksamer Spurengase, relativ gering. Aus Tabelle 3 geht hervor, daß ihr zusammengefaßter Anteil an den Gesamtemissionen - ausgedrückt als CO₂-Äquivalente - im Jahr 1990 ca. 0,7 Prozent betrug. Dennoch wäre es aus ökologischer Sicht nicht angebracht, die genannten fluorierten Verbindungen zu vernachlässigen. Denn erstens wird im Jahr 2020 ihr Anteil voraussichtlich auf 2,6 Prozent angestiegen sein. Zweitens sind H-FKW und SF₆ die einzigen treibhauswirksamen Spurengase, deren Emissionsmengen bis zum Jahr 2020 nicht ab-, sondern zunehmen.

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 angehalten sind, ihren entsprechenden Reduktionsbeitrag zu leisten.

**Tab. 3: Inländische Emissionen der treibhauswirksamen Spurengase
Vergleich zwischen 1990 und 2020**

	Emissionen 1990			Emissionen 2020		
	absolut in Tsd. Tonnen	CO ₂ -Äquivalente in Tsd. t	% der Gesamtemission	absolut in Tsd. Tonnen	CO ₂ -Äquivalente in Tsd. t	% der Gesamtemission
CO ₂	1014155	1014155	83,2	850000	850000	86,3
CH ₄	5682	119322	9,8	2614	54894	5,6
N ₂ O	249	77190	6,3	175	54250	5,5
H-FKW	0,200	2340	0,2	9504	17540	1,8
SF ₆	0,163	3900	0,3	0,292	6979	0,7
CF ₄	0,355	2310	0,2	0,105	682	0,1
C ₂ F ₆	0,042	390	0,0	0,011	101	0,0
Summe	1020086,76	1219607	100	862293,408	984446	100

Quelle: Klimaschutz in Deutschland. Zweiter Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland nach dem Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen. Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bonn 1997 (in Vorbereitung).

I. Schwefelhexafluorid - SF₆

Überblick

SF₆ ist das Gas mit dem höchsten bekannten 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 - durchweg anthropogenen - Quellen erhöhte Aufmerksamkeit.

Es ist bekannt, daß der größte Teil der weltweiten SF₆-Produktion in elektrischen Betriebsmitteln, insbesondere Schaltanlagen, genutzt wird. Deren hohe Dichte und das bei ihnen praktizierte Gas-Recycling wirken stark emissionsmindernd. Darum können die gemessenen atmosphärischen SF₆-Konzentrationen durch diese Anwendungsform allein nicht hinreichend erklärt werden (Ko et al. 1993, 10500).

Diese Ausarbeitung über SF₆ in der Bundesrepublik Deutschland bestätigt in der Tat die elektrischen Betriebsmittel zur Stromversorgung als den größten Einzelverbraucher, kommt aber zu dem Resultat, daß die Strukturen bei den Emissionen ganz andere sind als beim Verbrauch.

Zunächst zum Erfassungsgrad der SF₆-Anwendungen: Der inländische Handelsabsatz aus deutscher und ausländischer Produktion betrug 1995 ca. 800 t (Solvay 1996a; Ausimont 1996; Befragung Gasehandel). Das sind rd. 11,5% der auf 7 000 t geschätzten weltweiten SF₆-Produktion (Solvay 1996a; Ausimont 1996). Auf der anderen Seite ergab eine Befragung der Anwender als Summe der Einzelverbräuche die Menge von 792 t (s. nachf. Abschnitte). Aus dieser sehr weitgehenden Übereinstimmung zwischen Angebot und Nachfrage läßt sich schließen, daß die SF₆-Anwendungen offensichtlich annähernd vollständig erfaßt wurden.

Die sechs inländischen Verbrauchergruppen

Die inländischen Verbräuche sind in Tabelle 3 und Diagramm 4 mit ihren sechs Hauptverwendungsgruppen quantitativ dargestellt - für 1990 und 1995 auf empirischer Grundlage, für 2000 ff. als Prognosen. Diese Prognosen ihrerseits sind keine linearen Fortschreibungen der Verbrauchsentwicklung von 1990 bis 1995, sondern sie legen die gegenwärtig spürbare und wirksame Verbrauchsdynamik zugrunde, die auf einen Rückgang um ca. 200 Jahrestonnen (minus 25%) gegenüber 1995 schließen läßt.

Tab. 3: Gesamter SF₆-Verbrauch nach Anwendungen 1990-2020 in t/a							
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
1. Elektrotechnik	264,5	367,5	369,2	370,8	372,5	370	367,5
2. Schallschutz	180	275	146	110	110	110	110
3. Reifen	100	130	65	65	65	65	65
4. Magnesiumguß	7,4	7,8	7	4,9	6,2	6,2	6,2
5. Halbleiter	5	6	7,5	9,5	9,5	9,5	9,5
6. Sonstiges	5,1	5,7	5,9	6	6	6	6
Summe	562	792	600,6	566,2	569,2	566,7	564,2

Die Verwendung von SF₆ gliedert sich lt. Tabelle 3 und Diagramm 4 drei große Anwendungsbereiche und drei weniger bedeutsame.

1. Größter Einzelverbraucher sind mit 46/47% (1990/95) elektrische Betriebsmittel, insbesondere Schaltgeräte und -anlagen, die es seit 1964 mit SF₆-Füllung gibt.
2. An zweiter Stelle des SF₆-Verbrauchs folgen Schallschutzscheiben mit einem Drittel (32/34,5%) des inländischen Jahresverbrauchs von 1990/95. Diese Anwendung gibt es seit 1975.
3. Drittgrößter Verbraucher sind Autoreifen, die beim Reifenfachhandel zur Erhöhung der Druckkonstanz anstelle von Luft mit SF₆ befüllt werden. Auf diese Nutzung, die Mitte der 80er Jahre einsetzte, entfielen 1990 etwa 18% und 1995 rd. 16,5% des SF₆-Inlandsabsatzes.

Gegenüber diesen drei Verbrauchergruppen entfallen auf die drei kleinen Anwendungen "Schutzgas beim Magnesiumgießen" (1/1,3%), "Ätzgas in der Halbleiterfertigung" (0,7/0,9%) und "Sonstiges" (0,9%) insgesamt nur ca. 3% des Gesamtverbrauches. Aufmerksamkeit verdienen daher sowohl beim Verbrauch als auch bei den Emissionen in erster Linie die Bereiche "Elektrotechnik", "Schallschutzscheiben" und "Autoreifen".

Emissionen

Vom Standpunkt des Umweltschutzes sind nicht die Verbräuche für sich genommen von Belang, sondern, wieviel davon in die Atmosphäre entweicht.

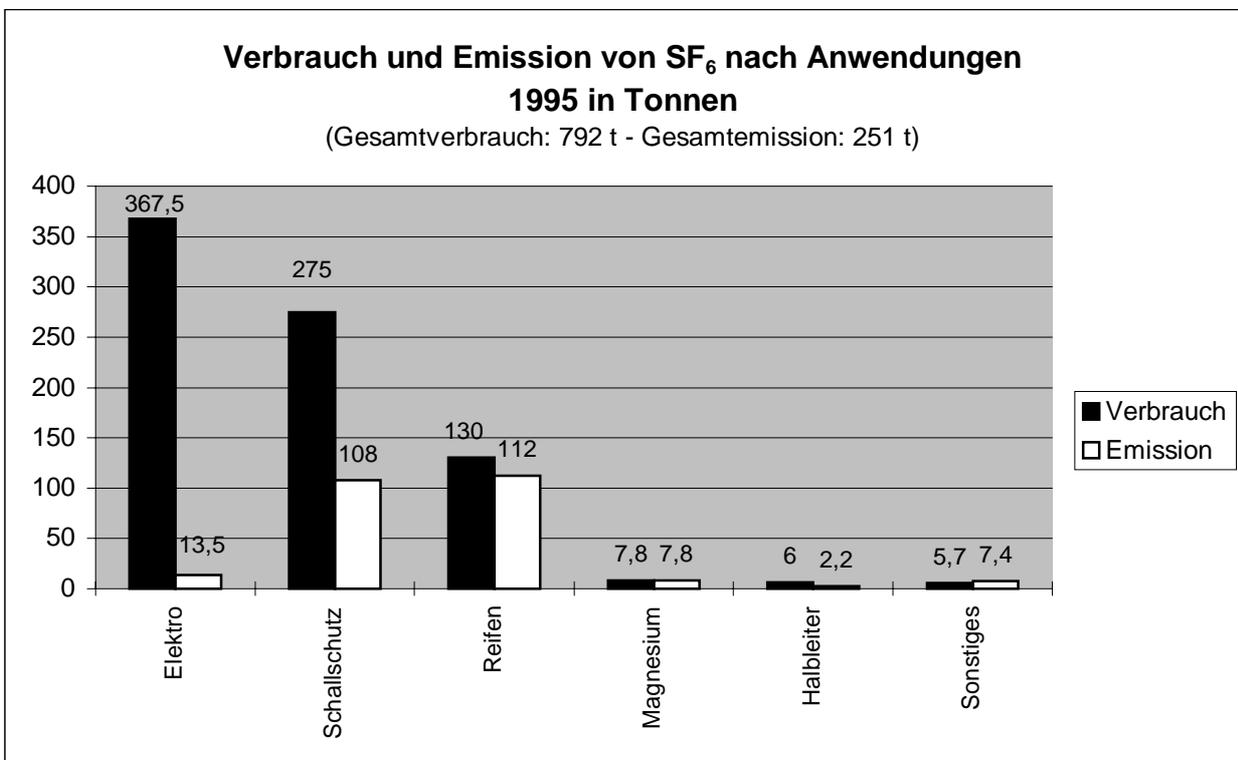


Diagramm 4: Verbrauch und Emission von SF₆ nach Anwendungen 1995 in Tonnen. Deutlich ist das Auseinanderfallen der Strukturen beim Verbrauch mit dem Elektrobereich an der Spitze und bei den Emissionen mit dem Reifenbereich als größter Einzelquelle. Bei elektrischen Betriebsmitteln handelt es sich um geschlossene, relativ dichte Systeme. Aus Autoreifen wird das Füllgas nach einer mittleren Nutzungsdauer von drei Jahren vollständig freigesetzt.

Die inländischen Gesamtemissionen liegen mit 251 t weit unterhalb des inländischen Jahresverbrauchs von 792 t. Dieser Umstand ist erklärungsbedürftig:

1. Ein Grund dafür sind Exporte von SF₆ zusammen mit im Inland gebauten Anlagen. Dieses Gas wird im Inland nicht emissionswirksam. Das betrifft nur die Branche der elektrotechnischen Betriebsmittel, insbesondere Schaltgeräte- und anlagen, allerdings in einer Größenordnung von über 200 t pro Jahr.
2. Entscheidender für die Differenz zwischen Verbrauch und Emission ist der Umstand, daß es sich bei allen drei SF₆-Hauptanwendungen um geschlossene Systeme handelt, bei denen die jährliche Zufuhr zunächst nur den angehäuften Gasbestand vermehrt, aber nicht emittiert. Da Leckagen aus dem Bestand mit ca. 1% überall sehr gering sind, kommt es erst am Ende der Lebensdauer des Systems zu relevanten Emissionen, wenn bei der Entsorgung das Gas nicht aufgefangen wird.

Die Nutzungsdauer der ältesten Schallschutzscheiben endet erst nach dem Jahr 2000, die der ersten Schaltanlagen sogar erst nach dem Jahr 2010. Bis dahin "verbrauchen" diese Anwendungen grundsätzlich mehr SF₆ als aus ihnen entweicht. Anders bei Autoreifen, deren mittlere Lebensdauer nur drei Jahre beträgt. Die Entsorgungsemissionen aus dieser Quelle fallen bereits jetzt an. Bei der Demontage verbrauchter Reifen von den Felgen entweicht das Füllgas ungehindert in die Atmosphäre.

Auch für Schallschutzscheiben liegt kein Entsorgungskonzept für das Füllgas vor. Dieser Mangel ist der Grund für die Prognose, daß nach dem Jahr 2000, wenn die ersten Scheiben unbrauchbar werden, die Emissionen aus diesem Sektor von Jahr zu Jahr anwachsen (Tab. 4, Zeile 2) und ab 2005 mit Abstand die wichtigsten sein werden.

Tab. 4: Gesamte SF₆-Emissionen nach Anwendungen 1990-2020 in t/a							
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
1.Elektrotechnik	10,5	13,5	15,2	16,8	18,5	16	13,5
2.Schallschutz	69	108	74	91	128	153	199
3.Reifen	65	112	104	65	65	65	65
4.Magnesiumguß	7,4	7,8	7	4,9	6,2	6,2	6,2
5.Halbleiter	3,7	2,2	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2
6.Sonstiges	7	7,4	7,9	8	8	8	8
Summe	163	251	208	186	226	248	292

Umgekehrt ist das bereits vorliegende Entsorgungskonzept für elektrische Betriebsmittel der Stromversorgung (Solvay 1996b) der Grund für die Annahme, daß Emissionen aus diesem Sektor auch künftig im wesentlichen auf Leckagen begrenzt bleiben. (Tabelle 4, Zeile 1; vgl. Diagramm 5).

Zu klären bleiben die Emissionen aus dem Sektor Schallschutzscheiben, die bereits 1995, d.h. vor der Entsorgung des "ersten Jahrgangs", sehr hoch sind. Hier kommt eine dritte Emissionskategorie, der Befüllungsverlust, zum Tragen. Anders als bei elektrotechnischen Anlagen, die vor dem Befüllen evakuiert werden, oder bei Autorreifen, wo SF₆ der geringen Luftmenge im leeren Reifen zugefügt wird, geschieht bei Scheiben die Gasbefüllung nach dem Prinzip der Luftverdrängung. Der Füllvorgang, der keinen Überdruck erzeugen darf, wird technisch so wenig beherrscht, daß ca. 50% SF₆-Gas, bezogen auf die effektive Füllmenge, als sog. Überfüllung direkt entweichen.

Bei den Emissionsmengen ist die Reihenfolge der drei Hauptanwendungen umgekehrt wie bei den Verbrauchsmengen (vgl. Diagramm 4).

1. Der Elektrobereich, mit 46,5% Anteil am Verbrauch, ist nur mit 5,5% an den Emissionen beteiligt, die im wesentlichen Leckageverluste aus dem laufenden Betrieb sind.
2. Schallschutzscheiben, auf die 34,5% des Verbrauchs entfallen, erzeugen 43% der Emissionen, z. Zt. vor allem Befüllungsemissionen, in späteren Jahren außerdem Entsorgungsemissionen.
3. Autoreifen, die 16,5% des SF₆-Jahresverbrauchs benötigen, machen 44,5% aller Emissionen aus, vor allem Entsorgungsverluste.
4. Auf die übrigen Anwendungen entfielen 1995 rd. 7% der Emissionen.

Künftige Emissionsentwicklung

Die inländischen Emissionen von SF₆ sind im Zeitraum 1990-1995 von 163 auf 251 t gestiegen. Halten die gegenwärtigen Nutzungstrends an, werden die Emissionen nach einem vorübergehenden Rückgang kurz nach dem Jahr 2000 erneut zunehmen und ihr Maximum im Jahr 2020 bei knapp 300 t erreichen (Diagramm 5).

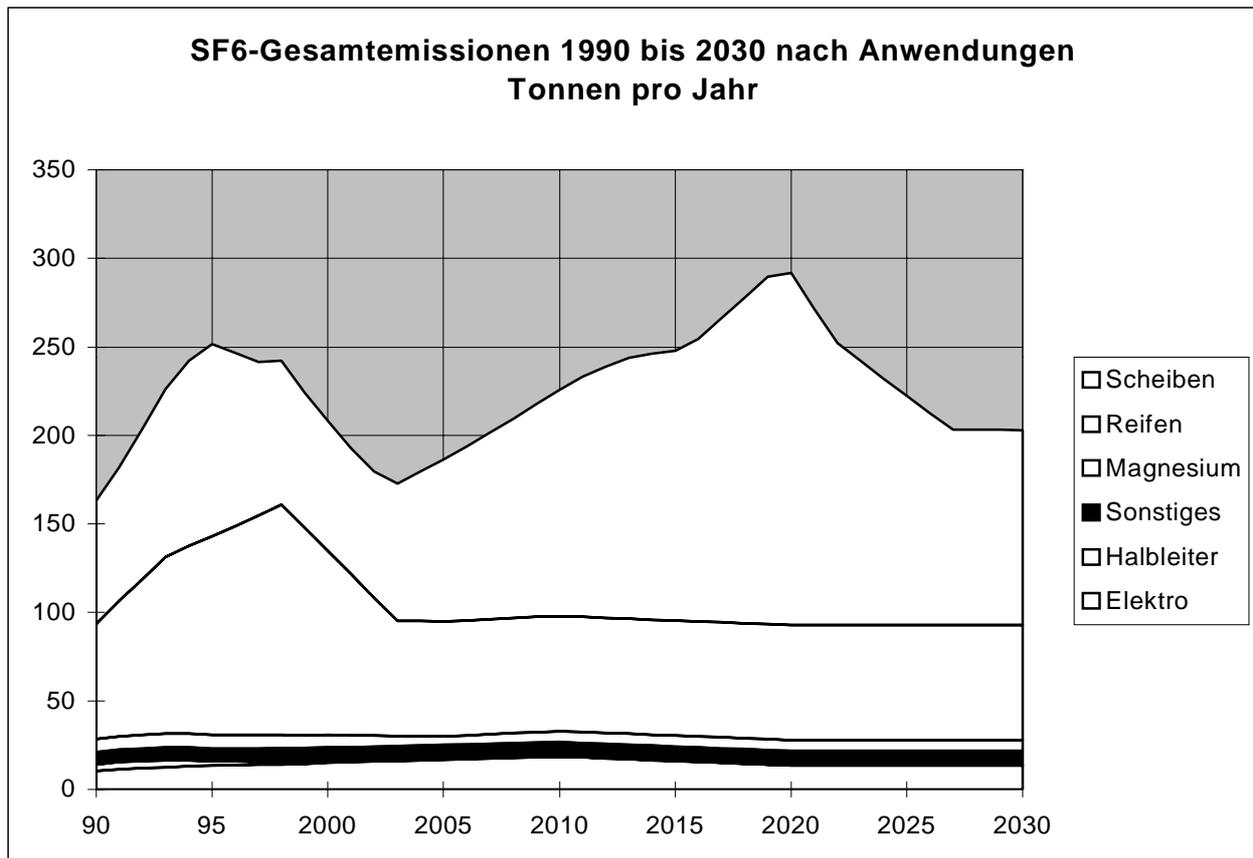


Diagramm 5: SF₆-Gesamtemissionen 1990-2030 nach Anwendungen in Tonnen. Die Entwicklung wird von Schallschutzscheiben und Autoreifen bestimmt. Während bei Reifenfüllgas ab 1998 mit einem Rückgang und bis 2003 mit einer Halbierung zu rechnen ist, legen nach 2000 die Emissionen aus Schallschutzscheiben kräftig zu, weil zu den Befüllungsemissionen die Entsorgungsverluste dazukommen, die ihr Maximum 2020 erreichen werden. Dann ist auch das Maximum der Gesamtemissionen erreicht, die ab 2027 bei ca. 200 t bleiben werden.

1. Schallschutzscheiben. Obwohl verschärfte Anforderungen an den Wärmeschutz den Neuverbrauch von nur schalldämmendem SF₆-Füllgas in Isolierglasscheiben von 1996 an drastisch reduzieren, steigen die Emissionen aus dieser Anwendung nach

dem Jahr 2000 wieder stetig und kräftig an. Denn zu diesem Zeitpunkt beginnt die Entfernung der seit 1975 eingebauten und nach 20-30 Jahren Lebensdauer unbrauchbar gewordenen Fenstergläser. Für ihre Gasfüllung gibt es im Unterschied zu den auszumusternden gasisolierten elektrischen Schaltanlagen kein Entsorgungs- oder Wiederaufarbeitungskonzept, so daß im Jahr 2020 mit über 100 Tonnen Emissionen allein aus dem Scheiben-Rückbau zu rechnen ist, die zu den hohen Emissionen bei der Scheiben-Neubefüllung des gleichen Jahres hinzukommen.

SF₆-freie Schallschutzgläser mit dickeren oder mit Gießharz gefüllten Scheiben werden gegenwärtig schon eingesetzt. Einen spürbaren Beitrag zur Senkung der SF₆-Emissionen werden sie aber erst nach 2020 leisten können.

2. Autoreifen. SF₆, das zur Stabilisierung des Reifendrucks häufig bei Fahrzeugen der oberen Klassen statt Luft eingesetzt wird, entweicht vollständig bei dem im Durchschnitt nach drei Jahren Betriebszeit fälligen Reifenwechsel. Der Fachhandel rechnet mit einer Verbrauchshalbierung in den nächsten fünf Jahren - von 130 Tonnen (1995) auf 65 Tonnen (2000) und danach mit einer Stabilisierung. Das bedeutet eine Emissionsmenge aus dieser Quelle von konstanten 65 Tonnen ab 2003, sofern nicht ein Totalverzicht auf diese umstrittene Nutzung die Emissionen ganz beendet.
3. Elektrische Betriebsmittel. Bei Hochspannungs-Schaltern und -Schaltanlagen ist mit einem Anstieg der Emissionen (Nachfüllkäufe der Energieversorger) von 13 auf 16 t bis 2010 zu rechnen. Nach dem Ersatz der vor 1980 gebauten, weniger dichten Anlagen sinken die Emissionen bis 2020 wieder auf das 1995er Niveau.
4. Die Emissionen aus Magnesiumgießereien und aus sonstigen Anwendungen können auf lange Sicht unter 14 Tonnen (ca. 5-7% der Gesamtemissionen) bleiben. Hervorzuheben sind die Bemühungen der Halbleiterindustrie, die durch Abgasanlagen ihre SF₆-Emissionen ab 2000 gegen Null abgesenkt haben wird.

Beitrag zum Treibhauseffekt

SF₆ hat, wie eingangs bemerkt, das höchste Treibhauspotential aller bekannten Gase. In Tabelle 5 sind die Emissionen, wie sie in Tabelle 4 dargestellt sind, in ihre Treibhauswirksamkeit (CO₂-Äquivalente) umgerechnet. Die Zahlenwerte in Tabelle 5 sind denen der Tabelle 4 proportional, ebenso wie der Kurvenverlauf des Diagramms 6 demjenigen im Diagramm 5 entspricht. Ihr Maximum erreichen die CO₂-Äquivalente im Jahr 2020 bei 6,97 Mio. t, um danach auf ca. 4,85 Mio. t zurückzugehen.

Tab. 5: Beitrag zum Treibhauseffekt durch SF₆-Emissionen in Mio. t CO₂-Äquivalente - 1990-2020							
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Mio. t CO ₂ -Äquiv.	3,896	6,008	4,981	4,450	5,398	5,927	6,970

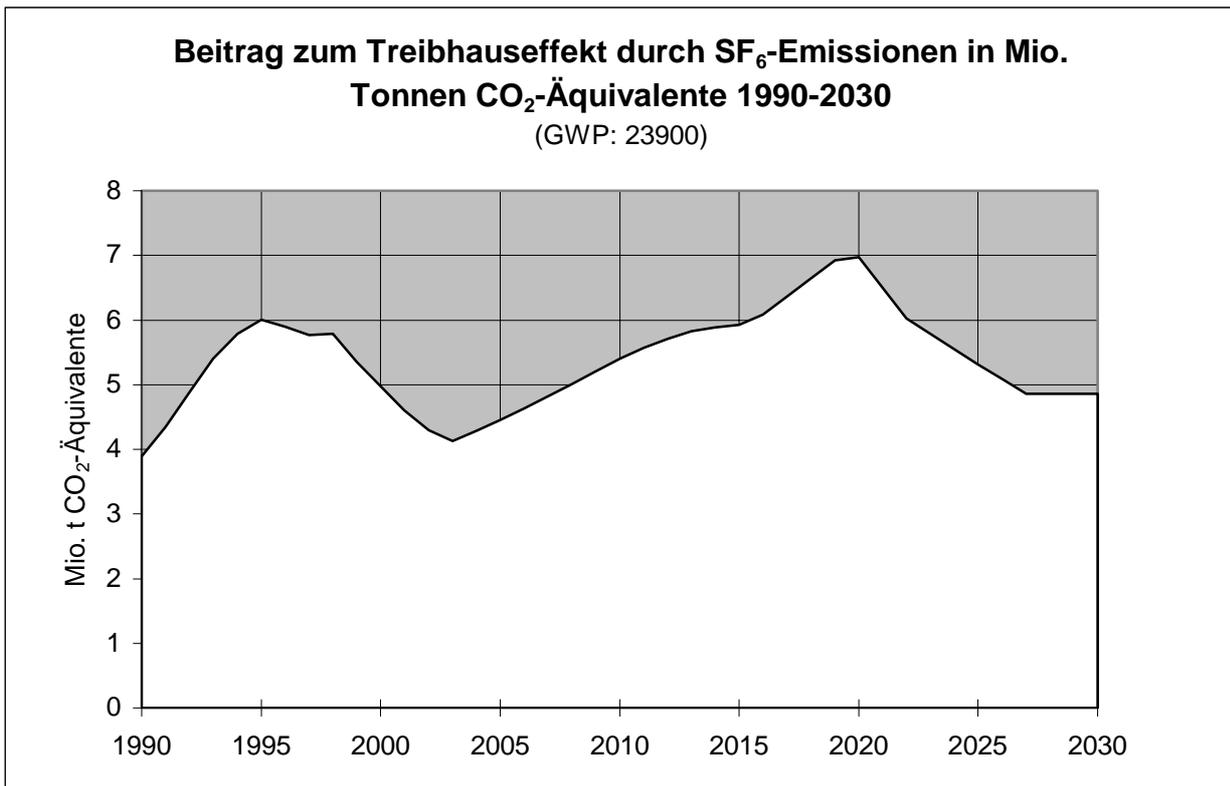


Diagramm 6: Beitrag zum Treibhauseffekt durch SF₆-Emissionen in Mio. t CO₂-Äquivalente 1990-2030. Nach einem vorläufigen Maximum 1995 erreicht die Treibhauswirksamkeit der SF₆-Emissionen ihren absoluten Höhepunkt im Jahr 2020 bei fast 7 Mio. t. Danach sinkt der Treibhausbeitrag wieder, um ab 2027 konstant bei ca. 4,85 Mio. t CO₂-Äquivalenten zu bleiben.

Anhang

Die Jahre 1990 bis 1995

Die Tabellen 5a und 5b dienen der Vervollständigung der umweltrelevanten SF₆-Emissionsdaten für die einzelnen Jahre zwischen 1990 und 1995.

Emissionen 1990-1995

Tab. 5a: Gesamte SF ₆ -Emissionen nach Anwendungen 1990-1995 in t/a						
	1990	1991	1992	1993	1994	1995
1.Elektrotechnik	10,5	11,4	12	12,5	13	13,5
2.Schallschutz	69	75	85	95	105	108
3.Reifen	65	77	88	100	106	112
4.Magnesiumguß	7,4	7,48	7,56	7,64	7,72	7,8
5.Halbleiter	3,7	3,9	4	4	3,5	2,2
6.Sonstiges	7	7,08	7,16	7,24	7,32	7,4
Summe	163	182	204	226	242	251

Beitrag zum Treibhauseffekt 1990-1995

Tab. 5b: SF ₆ -Emissionen in Mio. t CO ₂ -Äquivalente Schätzungen 1990-1995						
	1990	1991	1992	1993	1994	1995
Mio. t CO ₂ -Äquiv.	3,896	4,347	4,876	5,404	5,788	6,008

1. Anlagen der Stromversorgung

Betriebsmittel für die Stromversorgung bilden den größten Einzelposten beim SF₆-Verbrauch in Deutschland: 1990: 265 t, 1995: 368 t. Für die Befüllung neuproduzierter Schaltanlagen und -geräte, Wandler und Transformatoren werden 46-47% des Inlandsabsatzes von SF₆ verwendet. Anders bei den Emissionen dieser Anlagen. Wegen ihrer Dichtheit sind sie nur zu ca. 5,5-6,5% an den inländischen SF₆-Emissionen beteiligt.

1.1 SF₆-befüllte Betriebsmittel zur Stromversorgung: Schaltanlagen und Wandler

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

Die Hauptbetreiber der SF₆-Betriebsmittel, zu 90% öffentliche Energieversorgungsunternehmen (EVU), haben z. Zt. eine Bestandsmenge von 1000 t SF₆. "Davon entfallen 89% auf Hochspannungsgeräte und -anlagen, wobei konventionelle Geräte (Leistungsschalter, Wandler) mit einem Drittel und gasisolierte Schaltanlagen mit zwei Dritteln am SF₆-Bestand beteiligt sind. Nur etwa 11% der in der elektrischen Energieversorgung befindlichen SF₆-Mengen kommen in Mittelspannungsanlagen zur Anwendung. Hierbei bilden die Lastschaltanlagen mit knapp 9% der Gesamtmenge eindeutig einen Anwendungsschwerpunkt. In Leistungsschaltern und Leistungsschalteranlagen werden dagegen vergleichsweise geringe Mengen eingesetzt." (VDEW 1996b, 2-3).

Zu den Anlagen und Geräten im einzelnen:

Schaltanlagen und die ihnen meist zugeordneten Meßwandler befinden sich an Knotenpunkten der Stromversorgungsnetze, d.h. dort, 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.

1.1.1 Hochspannungsschaltanlagen (110-380 kV)

Eine Schaltanlage der Hochspannung (HS) ist oft an den Einspeisepunkten lokaler Mittelspannungsnetze von der regionalen oder überregionalen Hochspannungsleitung lokalisiert. Sie ist meist einem Transformator vorgelagert, der die Abspannung vornimmt. Auf der Abgangs- oder Mittelspannungsseite des Transformators befindet sich eine Schaltanlage im Bereich 10-30 kV zum Ein- und Ausschalten des Stromnetzes der niedrigeren Spannungsebene. Der Zusammenhang zwischen Hochspannungsschaltanlage, Transformator und Mittelspannungsschaltanlage ist der Grund dafür, daß diese drei elektrischen Betriebsmittel oft eine bauliche Einheit, ein sog. Umspannwerk, bilden.

Die herkömmliche und zahlenmäßig überwiegende Hochspannungsschaltanlage ist eine Freiluftanlage, bei der die Umgebungsluft die spannungsführenden Teile gegeneinander isoliert. Ihre Kernstücke sind die Leistungsschalter. Diese Geräte schalten

nicht nur die Ströme des Normalbetriebs, sondern unterbrechen auch im Kurzschlußfall die auf ein Vielfaches des Nennstroms (über 50 kA) ansteigenden Ströme, indem sie den stromstarken Lichtbogen zwischen den Schaltkontakten löschen. Für die Löschung reicht bloße Luft bei atmosphärischem Druck nicht aus. SF₆ dagegen ist dafür sehr gut geeignet, insbesondere wenn damit der Lichtbogen beblasen wird. Mit SF₆-Löschtechnik arbeitet mittlerweile über die Hälfte aller Leistungsschalter in Freiluft-Anlagen; die restlichen wurden vor 1980 installiert und verwenden Mineralöl oder Druckluft. (VDEW 1996a, 33).

**Tab. 6: SF₆-haltige Betriebsmittel der deutschen Energieversorger 1995/96
Anzahl und Füllmengen**

Gerät/Anlage	Installationen	SF ₆ pro Stück/Schaltfeld	ges. SF ₆ -Füllmenge
Freiluft-HS-Leistungsschalter	8000 Stück	5-50 kg	220 t
Metallgekapselte HS-Schaltanlagen (GIS)	2300 Schaltfelder	100-400 kg	610 t
HS-Freiluft-Wandler	7500 Stück	5-50 kg	60 t
MS-Leistungs- und Lastschaltanlagen (GIS)	50000 Schaltfelder	0,5-3 kg	110 t
MS-Transformatoren*	300 Stück	20 kg	6 t

Quellen: Für Installationszahlen in der Hochspannung als Ausgangswerte die Daten der VDEW Störungs- und Schadensstatistik 1992 und 1993 (VDEW 1996a); für Mittelspannungsschaltanlagen als Ausgangswerte Heiß u.a. 1991 für 1989. Die Zahlen wurden für diese Studie bis 1996 linear extrapoliert. Die SF₆-Füllmengen stammen aus der 1996er VDEW-Umfrage zu SF₆ (VDEW 1996b). Transformatorendaten: Befragung Wandler und Trafos 1996.

* SF₆-gefüllte Mittelspannungs-Transformatoren werden fast nur in der Industrie eingesetzt.

Auf Freiluft-Leistungsschalter im Hochspannungsbetrieb entfallen lt. Tabelle 6 über zwanzig Prozent des SF₆-Bestands der Energieversorgungsunternehmen (EVU). Den Haupteinsatz von SF₆ mit über 60 Prozent des Gasbestands bilden jedoch metallgekapselte Hochspannungs-Innenraumanlagen. Der Grund dafür liegt weniger in der Eigenschaft von SF₆ als Löschmedium, sondern vor allem in der Eigenschaft als Isoliermittel. SF₆ isoliert unter Normaldruck 2-3 mal besser als Luft; bei Drücken von 3-4 bar sogar zehn Mal besser. Darum können in einer SF₆-gasisolierten Schaltanlage (GIS) die Abstände zwischen den spannungsführenden Bauteilen und damit die Gesamtabmessungen bis zu zehnmal geringer gehalten werden. Wo das Platzangebot beschränkt ist, wie in Ballungsgebieten oder Industriezentren, werden solche Anlagen als Alternative zu den Freiluftanlagen eingesetzt.

Die einzelnen Komponenten einer konventionellen Freiluft-Schaltanlage sind bei einer metallgekapselten SF₆-Anlage zu einem geschlossenen System zusammengefaßt. Dies gilt für jedes Schaltfeld, aus dem sich eine Schaltanlage, ob Freiluftanlage oder GIS, zusammensetzt. (Jedes der meist sechs bis zehn Schaltfelder hat einen eigenen Leistungsschalter, eigene Anschlüsse an die Sammelschienen, eigene Kabelabgänge usw.) Nicht nur die Leistungsschalter, die das SF₆ zur Löschung von Lichtbögen aktivieren, sind in gasbefüllte dichte Druckkammern eingebaut, sondern darüber hinaus auch die von der Freileitung gespeisten Sammelschienen und die Kabelabgänge. Dazu kommen noch eigene Gasräume für Meßwandler. Die gegeneinander abgeschotteten Isolierkammern lassen sich für Wartungszwecke separat öffnen. Der Gasdruck beträgt ca. 4 bar, im Leistungsschalterraum 6,5 bar. Das ist der Druck, bei dem SF₆ bei minus 25°C gerade noch gasförmig ist. (ABB 1996a)

1.1.2 Hochspannungs-Meßwandler

Meßwandler sind im Falle von GIS in die Schaltfelder gasdicht integriert. In Freiluft-Schaltfeldern handelt es sich um eigene Geräte. Sie werden benötigt, um die auf Hochspannungsniveau auftretenden Betriebsgrößen in für die Meßtechnik erfaßbare Größen umzuwandeln. Sie arbeiten im Prinzip wie Transformatoren und werden als Strom- und Spannungswandler eingesetzt. Freiluftwandler werden bereits zu 10% mit SF₆ statt mit Flüssigkeit isoliert (VDEW 1996a, 37, 40).

1.1.3 Mittelspannungsschaltanlagen (10-30 kV)

Die auf Mittelspannung (MS) ausgelegten Schaltanlagen stehen ausschließlich in Innenräumen (Knies/Schierack 1991, 278) und sind in der Mehrzahl metallgekapselt und luftisoliert. Allerdings nimmt der Anteil SF₆-isolierter Anlagen wegen ihrer Platzersparnis zu.

In Leistungsschalteranlagen wird SF₆ nur zur räumlichen Isolierung des Schalters verwendet, selten als Löschmittel für Lichtbögen. Moderne Leistungsschalter löschen im Vakuum, wo die Kontakt-Abstände geringer als bei SF₆ sein können. (Für die Lichtbogenlöschung im Hochspannungsbereich ab 70 kV werden Vakuumröhren nicht eingesetzt, weil sie zu viel Röntgenstrahlung produzieren) (Siemens 1996a).

Während sich Mittelspannungs-Leistungsschalteranlagen vor allem dort befinden, wo nach der Abspaltung der Stromkreis der Mittelspannungsebene beginnt, sind am anderen Ende des Mittelspannungsnetzes Schaltanlagen installiert, die geringeren Belastungen genügen müssen. Es handelt sich um sog. Lasttrennschaltanlagen, die keine Kurzschlüsse bewältigen müssen, sondern lediglich Betriebsströme (unter "Last") schalten, die nur schwache Lichtbögen bilden. Meist sind sie in kompakten Ortsnetzstationen ("Kioskstationen") eingebaut, wo sie den Strom zum Umspannen auf die verbrauchernahe Niederspannung weiterleiten. Im Kurzschlußfall (z.B. durch Blitzschlag) bewahrt eine Hochleistungs-Sicherung die Anlage vor Schaden (GEC Alstom 1996).

Entsprechend der geringen Belastung stehen SF₆-isolierte Mittelspannungsschaltanlagen nur unter geringem Überdruck. Sie arbeiten bei 1,2 bis 1,3 bar. Oft gibt es nur eine einzige gasbefüllte Kammer pro Schaltfeld, und diese ist nicht, wie in der Hochspannung üblich, aus unmagnetischem und korrosionsbeständigem Aluminiumguß, sondern aus Stahlblech gefertigt (ABB 1992, 468). Die Füllung pro Schaltfeld beträgt zwischen 0,5 und 3 kg. Am SF₆-Gesamtbestand machen Mittelspannungsschaltanlagen nur 11% aus, obwohl die Zahl ihrer Felder bei über 50 000 liegen dürfte (Tabelle 6).

Exkurs: SF₆ als Isolier- und als Löschgas

SF₆ hat die gleiche dielektrische Festigkeit wie flüssige Isolierstoffe und eine viel größere als Luft. Dieses gute Isoliervermögen beruht auf seiner Elektronegativität (Boeck 1991, 9-10). SF₆ kann unter Bildung negativer Ionen freie Elektronen anlagern

(SF₆ + e⁻ → SF₆⁻). Die Anlagerung in SF₆ verhindert die Vermehrung der Elektronen, und ein Durchschlag kann nicht stattfinden, wenn eine gewisse Feldstärke nicht überschritten wird, ab der die Bewegungsenergie der freien Elektronen gegenüber der Bindungsenergie für den Elektroneneinfang zu groß würde.

Die Fähigkeit zum Bogenlöschen beruht nicht auf der Elektronegativität, sondern auf der niedrigen Dissoziationstemperatur von SF₆ im Zusammenhang mit seiner leichten Ionisierbarkeit (Schmitz 1972, 3-4).

Wechselstromlichtbögen erlöschen zwar im Stromnulldurchgang, entzünden sich aber sofort danach erneut, da der ionisierte und darum elektrisch leitende Lichtbogen zwischen den geöffneten Schaltkontakten weiterbrennt und den Strom weitertransportiert. Der stromunterbrechende Löschvorgang besteht darin, durch intensive Kühlung des Lichtbogen-Plasmas dem Lichtbogen die elektrische Leitfähigkeit zu nehmen, so daß die wiederkehrende Spannung für eine Neuzündung nicht ausreicht. (ABB 1992, 426).

SF₆ dissoziiert durch Lichtbogenwärme bei ca. 3000 °C völlig in seine atomaren Grundbausteine S und F. Diese diffundieren nach außen, wo sie sich im Bereich unterhalb 1000°C unter Freisetzung der Dissoziationsenergie wieder zu SF₆ rekombinieren. Somit findet eine Wärmeabfuhr aus dem Lichtbogen statt. Im dessen Zentrum sind die Gasatome bei Temperaturen bis über 7000 °C ionisiert. Diese elektrisch leitfähige Zone ist wegen der Dissoziationswärmeabfuhr am Bogenrand aber nur sehr dünn, so daß das ionisierte Gasvolumen des Lichtbogens in SF₆ äußerst klein ist (Boeck 1991, 7-9).

Damit sind die physikalischen Voraussetzungen günstig, daß die im Leistungsschalter ausgelöste Beblasung mit SF₆-Gas den Lichtbogen schnell (in wenigen Millisekunden) löscht und nach dem Nulldurchgang die Schaltstrecke elektrisch verfestigt.

1.2 Verbrauch von SF₆ für elektrische Betriebsmittel

Der jährliche SF₆-Verbrauch für die Erstbefüllung elektrischer Betriebsmittel der Stromversorgung beim Hersteller (Schaltanlagen, Wandler, Transformatoren) stieg von 1990 bis 1995 um 100 Tonnen - von 254 auf 354 t, davon allein bei Schaltanlagen von 240 auf 308 t (ZVEI 1996). Vgl. Tabelle 7. (Die - relativ geringen - Nachfüllmengen für den Emissionsersatz und die Befüllungsverluste sind in Tabelle 7 bereits eingetragen, werden aber erst im nächsten Abschnitt behandelt.)

Tab. 7: Inländischer SF₆-Verbrauch für elektrische Betriebsmittel 1990, 1995 und nach 2000 (Angaben in t/a)			
	1990	1995	2000 ff.
Schaltanlagen und -geräte	240	308	308
Wandler	13	45	45
Transformatoren	1	1	1
Nachfüllungen und Befüllverlust	10,5	13,5	15,5
Summe:	264,5	367,5	369,5

Quellen: Für 1990 und 1995: ZVEI 1996; Befragung Wandler und Trafos. Für 2000 ff. wurden außer bei Nachfüllungen und Befüllverlust gegenüber 1995 unveränderte Mengen unterstellt. Nachfüllungen und Befüllverlust aus Tabelle 8.

Im Jahre 1996 gab es sechs Unternehmen, die im Inland SF₆-Schaltanlagen herstellten. Davon waren zwei nur in der Mittelspannungstechnik tätig, vier auch in der Hochspannungstechnik. Außer den sechs Schaltanlagenbauern gab es zwei inländische Hersteller von SF₆-Wandlern und einen Hersteller von SF₆-Transformatoren.

1.2.1 Schaltanlagen und -geräte

Metallgekapselte SF₆-isolierte Hochspannungsschaltanlagen (GIS) werden in Deutschland seit über 30 Jahren gebaut. Calor-Emag fing 1965 damit an, 1967 folgten Siemens, 1972 BBC (jetzt ABB Calor Emag) und 1974 die AEG. SF₆-Freiluft-Leistungsschalter von Siemens sind seit 1964 im Betrieb. Der Bau von Mittelspannungsschaltanlagen mit SF₆-Isolierung begann mit über zehn Jahren Zeitverzug gegenüber Hochspannungsanlagen: 1978 brachte die Fa. Driescher die ersten Lastschaltanlagen auf den Markt. Bei SF₆-isolierten Leistungsschaltanlagen begann die Einführung 1982 durch Siemens. Andere Hersteller folgten. Die Ausweitung der SF₆-Technologie auf mehrere Anwendungsformen ließ den SF₆-Verbrauch der Schaltanlagenhersteller kontinuierlich ansteigen.

Lt. einer aktuellen Umfrage des ZVEI bei den Schaltanlagenherstellern (ohne Wandlerbauer) verbrauchten diese 1990 rd. 240 t und 1995 rd. 308 t SF₆ (ZVEI 1996). In den dazwischenliegenden Jahren waren es im Jahresdurchschnitt 300 t, während es in der vorausgehenden zweiten Hälfte der achtziger Jahre nur ca. 200 t gewesen waren. Der Gesamtverbrauch stieg somit in den vergangenen zehn Jahren deutlich an.

Der Import in dieser Branche ist vernachlässigbar (ABB 1996a). Allerdings macht der Inlandsmarkt nur ca. ein Viertel des SF₆-Gesamtverbrauchs aus. Der Export ist aufgrund der starken Weltmarktposition der deutschen Hersteller sehr groß. Der Weltmarktanteil deutscher Hersteller liegt z.B. bei dem wichtigsten Produkt, den 110-kV-GIS, bei etwa 40%. Entsprechend hoch ist auch der Export von SF₆, da dieses zusammen mit den versandten Anlagen, die beim Transport mit Stickstoff gefüllt sind, in Behältern mitgeliefert und erst vor Ort nach Evakuierung des Stickstoffs eingefüllt wird. (ABB 1996a)

Der Inlandsabsatz von SF₆ in Schaltanlagen stieg seit der zweiten Hälfte der 80er Jahre um mehr als 60% an. Dieser Zuwachs geht vor allem auf die Modernisierungsnachfrage der EVU für die neuen Bundesländer zurück. In der DDR war SF₆-Isolierung von Schaltanlagen selten und betrug zum Zeitpunkt der Vereinigung nach Schätzungen

nicht viel mehr als 100 installierte Felder in der Hochspannungs-ebene, während SF₆ in der Mittelspannungsebene gar nicht vorkam (Miebach 1996). Zwar gab es dort seit 1975 ein produzierendes Unternehmen (Mosch 1979, 6), das spätere Transformatorenwerk Oberschöneweide (TRO). Doch war die Stückzahl relativ klein.

1.2.2 Meßwandler

Die ersten SF₆-isolierten Freiluft-Meßwandler kamen 1978 von der Fa. Meßwandlerbau Bamberg (heute Haefely Trench MWB) auf den Markt. Lange dominierte indessen 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 seit dem gleichen Jahr die Relation zwischen Ölisolierung und SF₆-Füllung deutlich zugunsten der letzteren. Der inländische SF₆-Verbrauch für Hochspannungs-Meßwandler, die wie Schaltanlagen zum größten Teil exportiert werden, stieg von 1990 bis 1995 um das Dreieinhalbfache (Befragung Wandler und Trafos).

1.2.3 Transformatoren

SF₆-isolierte Transformatoren spielen bei deutschen EVU neben ölisolierten nur eine marginale Rolle, da letztere preiswerter sind und die verlangten Kühleigenschaften besser erfüllen. Wenn sie eingesetzt werden, dann von Industriebetrieben, insbesondere in der Chemischen Industrie. Der einzige inländische Hersteller produziert jährlich weit weniger als 100 Stück für den Mittelspannungsbereich bis 36 kV. Die Geräte mit durchschnittlich 20 kg SF₆ werden nach Firmenangaben zu 80% im Inland eingesetzt (Befragung Wandler und Trafos). Die jährliche SF₆-Füllmenge beträgt insgesamt 1 t.

1.2.4 Künftige SF₆-Verbräuche der inländischen Hersteller

Die Schaltanlagenindustrie nimmt für die absehbare Zukunft keine wesentliche Steigerung ihrer Produktion an, so daß der Gesamtverbrauch von SF₆ im Bereich von 300 Jahrestonnen bleiben dürfte. Da die jährlichen Wachstumsraten des Energieverbrauchs heute mit 1,5-2% niedriger liegen als früher (7%), ist weder mit erhöhtem Anlagenverschleiß noch mit besonderem Expansionsbedarf bei den EVU zu rechnen.

Wegen der auf über 40 Jahre kalkulierten Lebensdauer von GIS steht der Ersatzbedarf erst nach 2010 an, da die Installation in größerer Zahl erst Mitte der 70er Jahre begann. Vom befristeten Nachholbedarf der neuen Bundesländer abgesehen, verlagert sich das Hauptgeschäft in die Industrialisierungsstaaten des Nahen und Fernen Ostens (ABB 1996a). Bei Freiluftwandlern ist ebenfalls eine Konsolidierung des Verbrauchs auf dem gegenwärtigen Niveau wahrscheinlich. Das gilt auch für SF₆-Transformatoren, trotz der Bemühungen des Herstellers um die EVU als Käufer (Schötz 1995).

1.3 Inländische Emissionen 1990 und 1995

Bei den Emissionen ist zwischen Gasverlusten beim Hersteller (Befüllungsemissionen) und Gasverlusten beim Anwender (Bestandsemissionen) zu unterscheiden.

1.3.1 Befüllungsemissionen

Die Befüllungsemissionen sind sehr niedrig, da SF₆ nicht unter Luftverdrängung in die Gasräume gefüllt wird, 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 Feuchte zu halten, um die Bildung von Zersetzungsprodukten durch Sekundärreaktionen zu minimieren. Insgesamt wird die Gasverlustrate bei der Anlagen- und Geräteherstellung auf nur 1% geschätzt, bezogen auf den jährlichen Gesamtverbrauch (ABB 1996a; Eigenschätzung). Darin enthalten sind Gasverluste in der Fabrik (Fertigung einschließlich Tests) und bei der Montage.

Die absolute Menge der Befüllungsemissionen wird in Abhängigkeit von der gesamten jährlichen SF₆-Füllmenge für 1990 auf 2,5 t und ab 1995 auf 3,5 t kalkuliert.

1.3.2 Bestandsemissionen

Die Bestandsemissionen beim Anwender, die sich vor allem aus Leckagen des laufenden Betriebs und aus Gasverlusten bei Wartungsarbeiten zusammensetzen, sind gleichfalls gering und liegen unterhalb von 1%, bezogen auf den Gesamtbestand.

Leckagen

Obwohl die Füllräume der meisten metallgekapselten SF₆-Anlagen unter Drücken bis über 6 bar stehen, sind Gasverluste durch Leckagen während des laufenden Betriebs 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 viel dichter und verlieren jährlich weniger als 0,5%. Alle Hersteller garantieren Leckraten von weniger als 1%.

Wartungsverluste

SF₆-Schaltanlagen sind wartungsarm, da ihr Inneres vor Verschmutzungen und Witterungseinflüssen (Eis, Schnee, Salzluf) 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. der Siemens-Serviceplan für SF₆-Freiluft-Leistungsschalter die erste Revision mit Öffnung des Gerätes erst nach 20 Betriebsjahren vor (Siemens 1996b; Siemens o.J.).

Gaswartung

Es stimmt zwar, daß SF₆ nicht "altert". Doch ein Teil des Füllgases wird durch die elektrischen Entladungen, die naturgesetzlich mit jedem Schaltvorgang verbunden sind, zersetzt. Die bei Entladungen ionisierten oder dissoziierten Moleküle rekombinieren weitgehend wieder zu inertem SF₆, jedoch geschieht dies nicht vollständig. In Abhängigkeit vom Energieeintrag bilden sich Spaltprodukte, und zwar verstärkt in dem Maße, wie sich Spuren von Wasser und Luft im Gasraum befinden. Durch schwache Entladungsquellen werden im wesentlichen Reaktionsprodukte mit gasförmigen Verunreinigungen (Luft, Wasserdampf) erzeugt, während bei stromstarken Lichtbögen auch Reaktionen mit verdampften Metallen und Kunststoffen stattfinden (König 1992, 257). Extreme thermische Beanspruchungen kommen durch stromstarke Lichtbögen im Kurzschlußfall vor. Die Millisekunden vor der Löschung genügen, daß sich "Abbrand" bildet, d.h. außer gasförmigen Verbindungen wie HF und SO₂ auch feste Zersetzungsprodukte wie CuF₂ und WO₃. Deren Beseitigung aus dem Anlageninneren ist nur nach Öffnung des Gasraumes und Entleerung des Gases möglich.

Vergleichbar groß sind die Wartungsintervalle bei metallgekapselten SF₆-Anlagen. Im Normalfall müssen die Reinigung des Gases von Feuchtigkeit, Luft und Zersetzungsprodukten sowie eine Kontrolle bzw. Auswechslung der metallischen Kontakte und Bauteile sowie der Dichtungen nicht vor 20 Betriebsjahren stattfinden.

Entscheidend für den Wartungsvorgang ist, daß beim Öffnen des Gasraumes Emissionen weitgehend vermieden werden. Es ist heute Stand der Technik, das Entleeren und Wiederbefüllen nur im geschlossenen Kreislauf durchzuführen (VDEW 1993, 48,49). Dazu stehen den EVUs 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).

1.3.3 Empirische Erhebung der Bestandsemissionen durch den VDEW für 1995

Die Emissionen beim Anwender differieren deutlich nach der Altersstruktur des Anlagenbestands. Dies sind die Hauptergebnisse der parallel mit dieser Studie vom VDEW durchgeführten repräsentativen SF₆-Erhebung bei den deutschen Energieversorgungsunternehmen - ohne Industrie- und Bahnstrom (VDEW 1996b).

Die Bestandsemissionen wurden über die Menge der jährlichen SF₆-Nachfüllkäufe ermittelt. Zusammenfassend erklärt der VDEW:

"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%."

Die nachgefüllten SF₆-Mengen entfallen zu 97% auf Hochspannungs-Betriebsmittel. Mittelspannungsanlagen verlieren viel weniger Gas. "Trotz der stark ansteigenden Zahl von SF₆-gefüllten Mittelspannungs-Betriebsmitteln können die hier erforderlichen Nachfüllmengen mit weniger als 3% in erster Näherung vernachlässigt werden."

Bei den Hochspannungs-Betriebsmitteln sind die Nachfüllmengen für SF₆-isolierte Schaltanlagen der Baujahre 1980 und früher mit 49% der gesamten Nachfüllmenge auffallend hoch, zumal der Anteil dieser Altanlagen am SF₆-Gesamtbestand nur bei 19% liegt. VDEW: "Dies entspricht einer jährlichen Nachfüllrate von 2,2%. Die Nachfüllmengen für Hochspannungs-Leistungsschalter und -Wandler entsprechen dagegen in etwa dem prozentualen Anteil der Anlagen an der eingesetzten Gesamtmenge. Die Nachfüllmengen für SF₆-isolierte Schaltanlagen der Baujahre 1980 und später liegen sogar deutlich darunter. Diese Komponenten erreichen jährliche Nachfüllraten zwischen 0,3% und 0,6%. Dies hängt zum einen mit der verbesserten Dichtigkeit dieser Anlagen der 2. und 3. Generation und zum anderen aber auch mit dem bei dieser Anlagentechnik heute üblichen SF₆-Handling bzw. SF₆-Wiederverwendung bei Wartungsmaßnahmen zusammen."

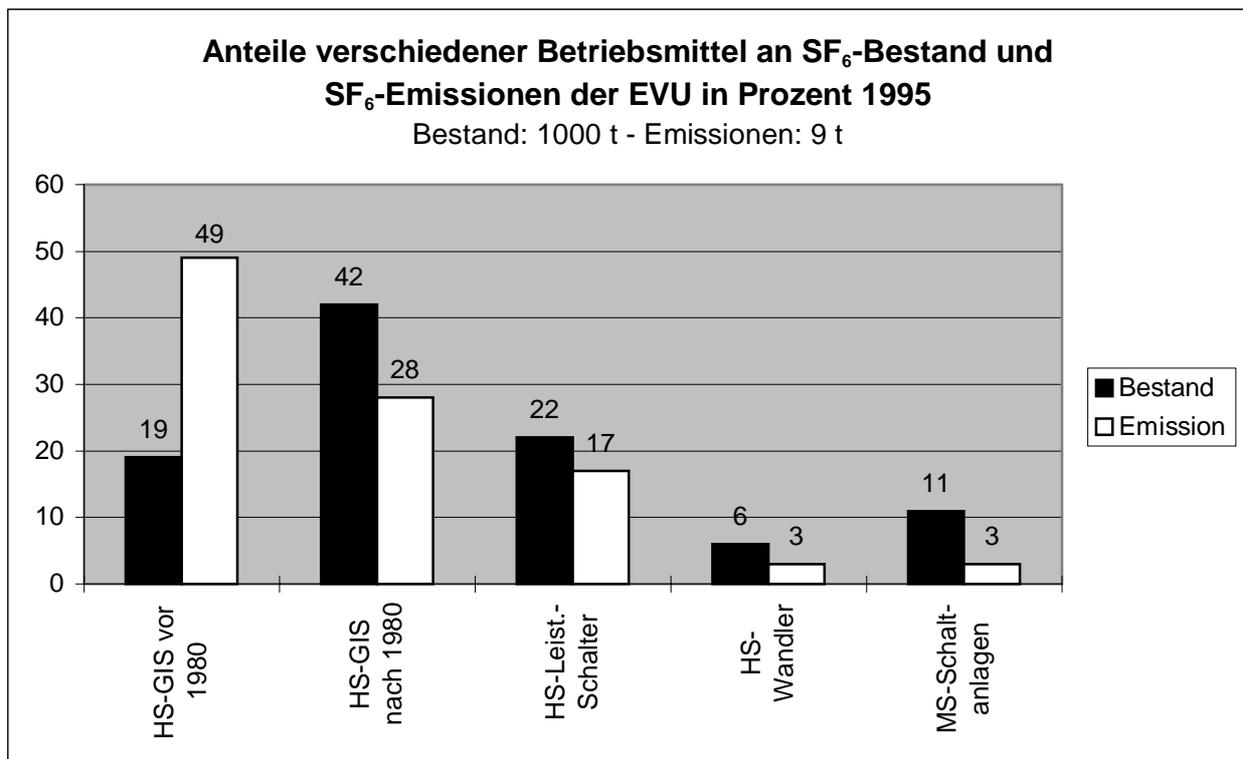


Diagramm 7: Anteile der verschiedenen elektrischen Betriebsmittel der EVU an SF₆-Bestand und SF₆-Emissionen 1995. Nur bei den Hochspannungs-GIS aus der Bauzeit vor 1980 (links außen) ist der prozentuale Anteil der SF₆-Emissionen höher als der prozentuale Anteil am SF₆-Bestand. Bei allen anderen Betriebsmitteln der EVU verhält es sich umgekehrt. Auffallend gering sind die Emissionen von Mittelspannungsanlagen. (Nach VDEW 1996b).

Die grafische Darstellung in Diagramm 7 veranschaulicht die gegenüber den Anteilen am Bestand überproportionalen Emissionen der Hochspannungsschaltanlagen aus den Jahren vor 1980 und die unterproportionalen Emissionen aller anderen Hoch- und Mittelspannungsanlagen und -geräte.

Fast die Hälfte der SF₆-Emissionen (49%) wird durch Hochspannungs-GIS der Bauzeit vor 1980 verursacht, die 19% am Gesamtbestand von 1000 t (d.h. absolut 190 t) ausmachen. Die Emissionsrate (Nachfüllrate) beträgt 2,3%. Die Nachfüllrate der HS-GIS seit 1980 ist deutlich geringer: 0,6%. Sie dürfte bei Anlagen aus den 90er Jahren unterhalb von 0,5% liegen und künftig weiter sinken.

1.4 Emissionsentwicklung 1990 bis 2020

Zur Komplettierung des Emissionsbildes müssen zunächst noch die Anlagen und Geräte außerhalb der öffentlichen Stromversorgung (EVU) berücksichtigt werden. An der gesamten Stromerzeugung der Bundesrepublik haben Industrie und Deutsche Bahn AG einen Anteil von 13,4% (Jahrbuch 1996, 596). Das bedeutet jedoch nicht, daß der Anteil am - hier relevanten - Hoch- und Mittelspannungsnetz genauso groß ist. Es gibt keine veröffentlichten Daten darüber. Expertenschätzungen gehen jedoch von einem Anteil der industrie- und bahneigenen Schaltanlagen und -geräte mit SF₆ am inländischen Gesamtbestand in Höhe von 10% aus (ABB 1996a). Eigene Hochspannungs-GIS werden u.a. von Stahl- und Zementwerken betrieben (ABB 1996b).

In dieser Studie wird der Gesamtbestand an SF₆ in Betriebsmitteln zur Stromversorgung auf 1100 t geschätzt. Das sind 10% mehr als der empirisch erhobene Bestand der EVU. Auch die Jahresemissionen erfahren eine Korrektur nach oben. Sie betragen für 1995 statt 9 t (nur EVU) insgesamt 10 t.

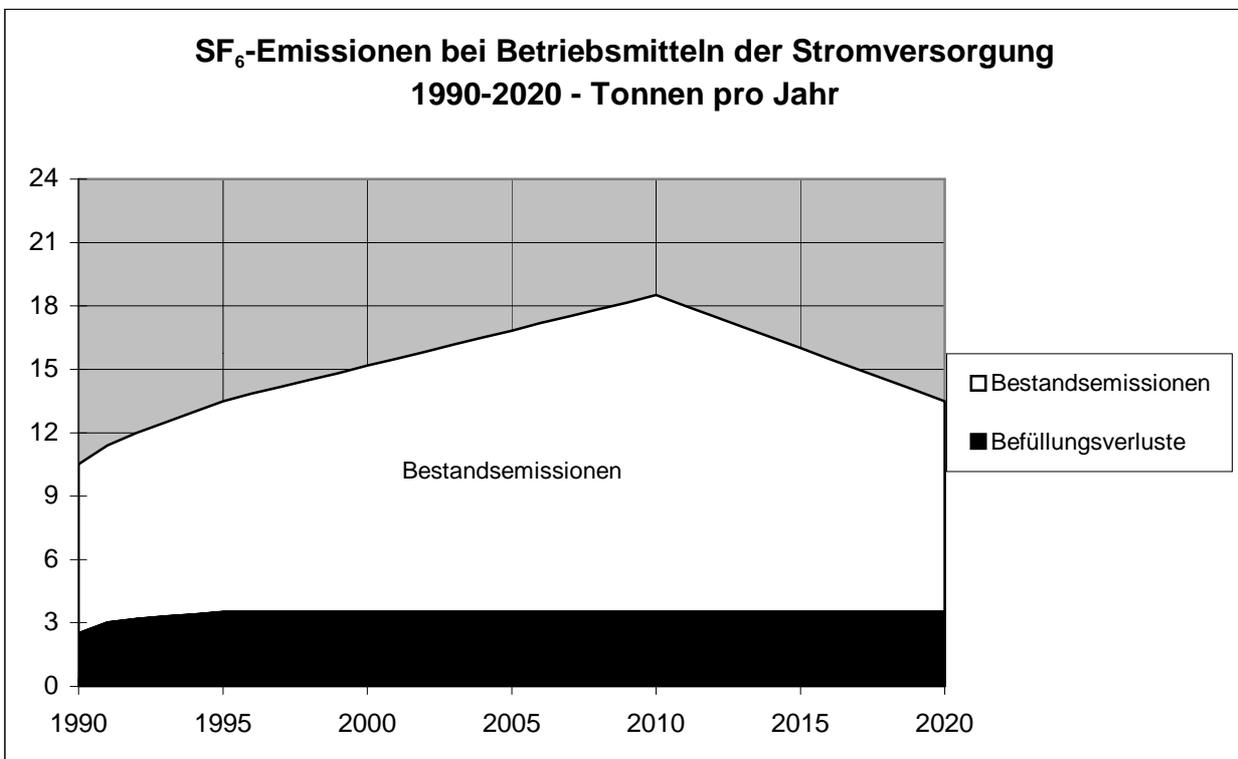


Diagramm 8: SF₆-Emissionen bei Betriebsmitteln der Stromversorgung 1990-2020 in Tonnen pro Jahr. Bei konstanten Befüllungsverlusten von 3,5 Tonnen bilden die Nachfüllungen für Gasverluste das variable Element: Mit der weiteren Ausstattung des Inlands mit SF₆-Betriebsmitteln werden die Bestandsemissionen noch bis 2010 auf 15 t (gesamt: 18,5 t) steigen. Danach beginnt der Ersatz der emissionsträchtigen Altanlagen durch dichtere Neuanlagen, so daß im Jahr 2020 wieder das Emissionsniveau von 1995 erreicht werden kann. Bedingung dafür ist die Umsetzung des Entsorgungskonzepts für gebrauchtes SF₆-Gas.

Die in Betriebsmitteln der Energietechnik eingesetzten SF₆-Gasmengen werden im Inland auch in Zukunft noch ansteigen, da trotz des erreichten hohen SF₆-Ausstattungsgrades in der Hochspannung der Ersatz von ausgedienten luft- oder ölsolierten Anlagen durch SF₆-isolierte weitergehen wird. Bei einer jährlichen Inlandsnachfrage von 70-80 t SF₆ (EVU plus Industrie) wird sich der Bestand in Anlagen und Geräten bis

2010 von gegenwärtig 1100 t auf rd. 2200 t verdoppeln. Erst um das Jahr 2010 endet die Lebensdauer der ersten SF₆-befüllten Altanlagen aus den 70er Jahren, so daß sich von diesem Zeitraum an Zugänge und Abgänge die Waage halten können.

Tab. 8: Emissionsentwicklung von SF₆ bei Betriebsmitteln zur Stromversorgung 1990-2020 in Tonnen pro Jahr

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Befüllungsverluste	2,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Bestandsemissionen	8	10	12	13,5	15	12,5	10
Summe Emissionen	10,5	13,5	15,5	17	18,5	16	13,5

Quellen: VDEW 1996b; ABB 1996a. Für Befüllungsverluste z.T. Eigenschätzungen.

Die jährlichen Bestandsemissionen (Nachfüllmengen) werden noch mindestens bis zum gleichen Zeitraum zunehmen, allerdings in geringerem Maße als bisher, da die neu installierten Betriebsmittel deutlich dichter sind, d.h. jährliche Emissionen von nur ca. 0,5% aufweisen. Wird das Jahr 2010 als erstes Jahr der Bestandsstabilisierung unterstellt, sind die Bestandsemissionen von gegenwärtig 10 t auf ca. 15 t gestiegen, die Gesamtemissionen von 13,5 auf 18,5 t. (Tabelle 8)

Vermeidung von Entsorgungsemissionen erforderlich

Aufgrund der langen Lebensdauer einer regulär gewarteten Anlage werden die ersten Geräte im Zeitraum nach 2010 außer Betrieb genommen werden. Bis dahin dürften Entsorgungsemissionen nur in Sonderfällen vorkommen, wenn etwa ein ganzes Gerät oder Schaltfeld durch äußere Einwirkungen zerstört wird. Im Falle der regulären Ausmusterung eines SF₆-befüllten Gerätes oder Anlagenteils kann das Füllgas abgesaugt und stofflicher Aufarbeitung und Wiederverwendung zugeführt werden.

In der Tat ist der Bereich der Elektrotechnik bisher der einzige Fall von SF₆-Anwendung, für den ein Konzept zur Wiederverwertung von genutztem SF₆-Gas vorliegt. Es wurde vom Hersteller SOLVAY Fluor und Derivate GmbH in Zusammenarbeit mit der DILO Armaturen und Anlagen GmbH (führender Hersteller von Wartungs- und Meßgeräten für SF₆) entwickelt und sieht neben dem Vor-Ort-Recycling durch die Wartungsgeräte auch die Aufarbeitung des genutzten Gases in der Produktionsanlage von Solvay vor, wo gebrauchtes Gas zu "Neugas regeneriert wird", das "in allen Punkten der DIN IEC 376 für Neugas" entspricht (Solvay 1996b).

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.

Ab ca. 2020 besteht die Möglichkeit eines absoluten Rückgangs der Emissionen, und zwar sogar eines überproportionalen, weil dann die emissionsträchtigen Anlagen der ersten Generation mit über 2% jährlichen Gasverlusten durch moderne mit nur ca. 0,4% Jahresverlusten ersetzt werden. Durch die Ausmusterung der Altanlagen können sich die Jahresemissionen aus dem laufenden Bestand innerhalb von zehn Jahren von 15 t auf 10 t vermindern, d.h. im Jahr 2020 wieder auf der absolute Höhe von 1995 liegen, obwohl sich der Bestand seit 1995 mehr als verdoppelt haben wird.

Absolute Bedingung einer solchen Entwicklung ist jedoch, daß die Entsorgung von gebrauchtem SF₆-Gas im Zuge der Entsorgung der technisch veralteten Anlagen und Geräte ohne nennenswerte Emissionen vonstatten geht.

2. Schallschutzscheiben

Schallschutzscheiben bilden nach elektrischen Betriebsmitteln den zweitgrößten Verbrauchsposten von SF₆ - mit 275 t im Jahre 1995 (1990: 180 t). Die Emissionen aus diesem Anwendungsgebiet betragen 1995 etwa 108 t (1990: 69 t) und werden bis 2020 voraussichtlich bis auf fast 200 t ansteigen.

2.1 SF₆ als Schalldämmgas

Bei Mehrscheiben-Isolierglas, das sich wegen erhöhter Ansprüche an die Wärmedämmung bereits in den siebziger Jahren gegenüber Einfachverglasung bei Fenstern und Glasfassaden durchgesetzt hatte, wird seit 1975 zur Erhöhung der Schalldämmung SF₆ in den Scheibenzwischenraum gefüllt. Gegenüber Glasscheiben mit bloßer Luftfüllung reduziert SF₆ die Schallwirkung um weitere 2-4 dB, was als Geräuschhalbierung empfunden wird (Flachglas 1996a; VEGLA 1996).

Die Schalldämmung resultiert aus der verminderten Schallgeschwindigkeit, die in SF₆ 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). SF₆ als sehr schweres Gas ist darum gut für zusätzliche Schalldämmung geeignet - jedoch nicht für zusätzliche Wärmedämmung. Letztere ist gegenüber Luft sogar ein wenig schlechter (Huntebrinker 1995, 43). Als Gas für die Wärmedämmung wird üblicherweise Argon eingesetzt.

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.

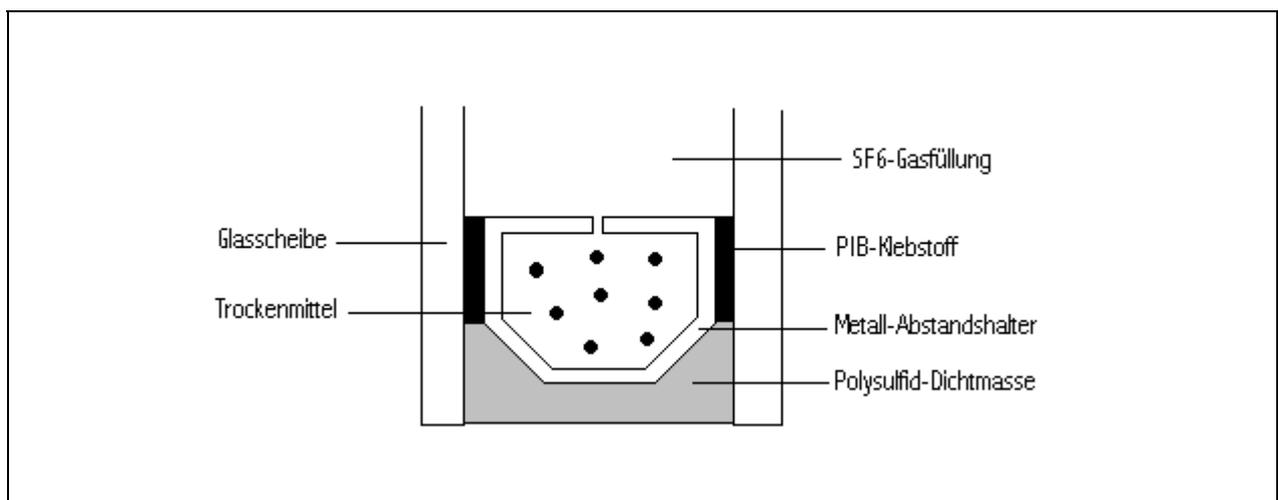


Abb. 1: Randverbund von Mehrscheiben-Isolierglas mit SF₆-Füllung zum erhöhten Schallschutz. Der metallische Abstandshalter rund um die Kantenlänge der Scheiben ist mit einer Polysulfid-Masse gegen Diffusionen nach innen und außen abgedichtet. Das Trockenmittel saugt eindiffundierte Luftfeuchte 20 bis 30 Jahre lang auf. (Zeichnung nach Holler 1995, 69).

Der Abstandshalter hat einen Diffusionsspalt zum inneren Druckausgleich und enthält ein Trockenmittel (Silica-Gel, Molekularsieb) zur Bindung von eindiffundiertem Wasserdampf. Siehe Abb. 1.

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 versiegelte 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).

2.2 Markt und Verbrauch

Marktstruktur und Außenhandel

In Deutschland werden zwar die Basisglasscheiben von einer überschaubaren Anzahl von Glasfabriken industriell erzeugt. Die Verarbeitung zu Isolierglasscheiben geschieht jedoch überwiegend dezentral und kleinbetrieblich; nur ein Viertel kommt aus industriellen Großbetrieben. Die räumliche Liefernähe zu Fenster- und Glasfassadenherstellern ist wichtig. Daher gibt es auch keinen nennenswerten Außenhandel mit Isolierglas und erst recht nicht mit Schallschutzscheiben, ein Punkt, der die Ermittlung der inländischen Verbräuche und Emissionen erleichtert. Neben den Scheibenherstellern, die die Fensterbauer und Glasereien beliefern, gibt es auch industrielle Fensterproduzenten mit eigener Scheibenproduktion. Die Zahl der Herstellerbetriebe von Schallschutzscheiben wird auf 300 bis 400 geschätzt, von denen über 100 zu einer der fünf führenden inländischen Unternehmensgruppen auf dem Flachglassektor gehören. (Befragung Schallschutzglas)

SF₆-Verbrauch

Laut Statistik der Flachglas AG, Gelsenkirchen, wurden 1990 in Deutschland 26,3 Mio. qm Isolierglas hergestellt, davon 1,5 Mio. qm Schallschutzglas. Der vereinigungsbedingte Bauboom führte zu einem stetigen Anstieg bis 1995: 36,5 Mio. qm Isolierglas¹, wovon 2,6 Mio. qm SF₆-haltige Schallschutzscheiben waren. In der DDR war SF₆ nicht als Isoliergas für Schallschutzscheiben benutzt worden.

Der durchschnittliche Scheibeninnenraum hat sich seit 1975 konstant vergrößert, und zwar durch Erhöhung des Scheibenabstands von 12 auf 16 Millimeter (Befragung Schallschutzglas). Daraus ergibt sich für 1990 ein Gasfüllvolumen aller Schallschutzscheiben zusammen von rd. 18 Mio. Liter und 1995 von rd. 42 (41,6) Mio. Liter.

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

¹ Dem Verband der Fenster- und Fassadenhersteller e.V. zufolge wurden 1995 sogar 42,25 Mio. qm Fensterscheiben verbaut, s. Handelsblatt 22.10.96, 19.

Erstens beträgt der Füllgrad des Scheibenzwischenraums mit Gas maximal 90%, da 10% Restluft beim Befüllvorgang nicht zu eliminieren sind.

Zweitens: Der SF₆-Verbrauch entwickelt sich unterproportional zum Anstieg der summierten Füllvolumina der Schallschutzscheiben. Seit Mitte der 80er Jahre gibt es neben den ausschließlich mit SF₆ befüllten Scheiben auch solche mit Beimischungen von Argon. 1990 betrug der Durchschnittsanteil von SF₆ in gasbefüllten Schallschutzgläsern rechnerisch nur noch 85%. Das heißt: Rund 70% der Schallschutzscheiben hatten eine 100%-ige SF₆-Füllung (von der Restluft abgesehen) und 30% enthielten Mischgas, das im Durchschnitt zur Hälfte aus SF₆ und aus Argon bestand.

Gründe für die Mischung mit Argon sind verschärfte Ansprüche an den Wärmeschutz. So verlangt die am 1.1.1995 in Kraft getretene 3. Wärmeschutzverordnung in vielen Bereichen (z.B. der Gebäudesanierung) erheblich niedrigere Wärmedurchgangskoeffizienten für Fenster (k-Werte < 2,0), die durch gängige Isolierverglasung mit 100%-iger SF₆-Füllung nicht einzuhalten sind. Soll der Schallschutz nicht auf Kosten des Wärmeschutzes gehen, sind höhere Anteile von Argon erforderlich. In der Praxis zeigte sich, daß 30% SF₆ im Füllgas für die geforderten Schallschutzwerte durchaus genügen, wenn der Glasaufbau geändert wird (dickere Scheiben, Gießharzfüllung u. dgl.).

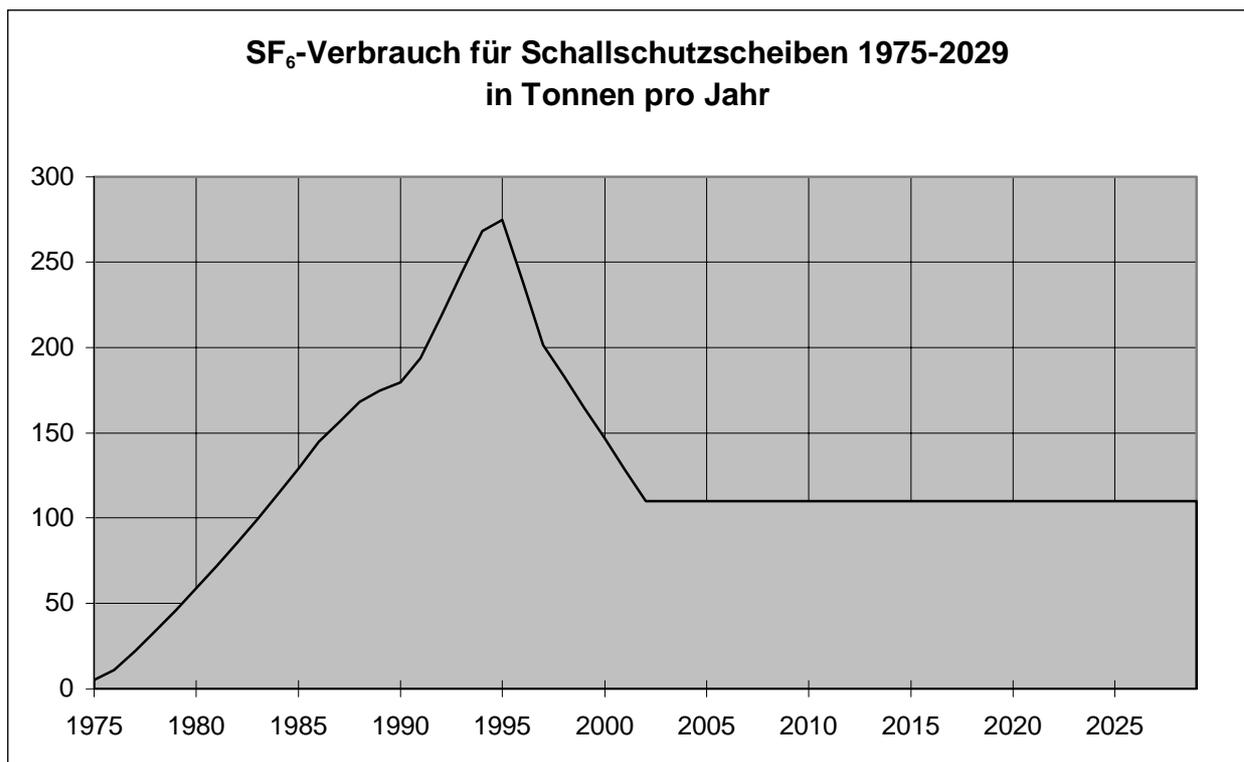


Diagramm 9: SF₆-Verbrauch für Schallschutzscheiben 1975 bis 2029 in Tonnen pro Jahr. Nach einem fast linearen Anstieg in den ersten zehn Jahren und einer Beschleunigung des Verbrauchs in den Jahren 1991 bis 1995 (erhöhte Nachfrage in den neuen Bundesländern) sinkt ab 1996 die absolute Menge steil ab, weil sich der spezifische SF₆-Anteil pro Scheibe stark vermindert.

Der Rückgang des spezifischen SF₆-Anteils in der Gasfüllung von ca. 85% auf 30% innerhalb eines Jahrzehnts hat gravierende Auswirkungen auf den Gesamtverbrauch, wie er in Diagramm 9 für den Zeitraum 1975 bis 2029 dargestellt wird.

Die Tendenz zur Reduzierung des SF₆-Anteils in Schallschutzgläsern erhielt 1995 neuen Schub. Nur mehr die Hälfte der 1995 befüllten Scheiben enthielt im ersten Jahr nach Inkrafttreten der 3. Wärmeschutzverordnung 100% SF₆, die andere Hälfte enthielt Mischgas, das sich im Mittel zu 50% aus SF₆ und zu 50% aus Argon zusammensetzte. 1996 forcierten die Scheibenhersteller die Umstellung. Nach Expertenschätzung wird sich bis zur Jahrhundertwende als allgemeiner Standard eine Zusammensetzung von 30% SF₆/70% Argon durchsetzen (Befragung Schallschutzglas).

Für die Jahre vor 1990 unterstellen die fünf befragten Isolierglashersteller einen seit 1975 linearen Produktionsanstieg für Schallschutzgläser. Für die Zeit nach 1995 gehen sie mehrheitlich von einer Marktsättigung aus, d.h. sie nehmen eine Fortführung der Produktion auf dem gegenwärtigen Niveau an. Seit Mitte der 80er Jahre wird die Kurvenform entscheidend vom rückläufigen spezifischen SF₆-Verbrauch geprägt.

Der 1986 einsetzende Rückgang des spezifischen SF₆-Verbrauchs (SF₆ pro qm Schallschutzglas) wurde bis 1990 und danach noch einmal in den Boomjahren 1991 bis 1995 kräftig durch vermehrte Mengennachfrage überkompensiert. Der Gesamtverbrauch (s. Tabelle 9) für Einfüllung und sog. Überfüllung (s.u.) lag 1990 bei 180 Tonnen. Bis 1995 stieg er auf den Rekordwert von fast 275 Tonnen an. Ab 1996, dem ersten Jahr der Mengenstagnation, ging der absolute Verbrauch erstmals, und zwar stark zurück, bis er sich kurz nach der Jahrhundertwende bei ca. 110 Tonnen pro Jahr stabilisieren dürfte, wenn sich der spezifische SF₆-Anteil im Mischgas auf 30% vermindert hat.

2.3 Die drei Formen von Emissionen

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.

2.3.1 Befüllungsverluste

Da der Befüllvorgang wegen der Zerbrechlichkeit des Glases bei atmosphärischem Druck durchgeführt wird, ist er äußerst emissionsträchtig. Grundsätzlich geschieht das Befüllen durch Verdrängung der Luft von unten nach oben, indem an der Unterseite der aufrecht gestellten Scheibe das etwa fünfmal schwerere SF₆-Gas eingeleitet wird.

Bei der bis 1990 ausschließlich praktizierten manuellen Schlauch-Befüllung mit Hilfe eines an Gasflaschen angeschlossenen Dosiergerätes wird SF₆ durch ein Bohrloch im unteren Abstandshalter eingeleitet, während die Luft durch Bohröffnungen im oberen Abstandshalter entweicht. Trotz äußerst langsamer Gaszufuhr von ca. 4 Litern pro Minute (eine Scheibe von 1 qm mit 16 mm Scheibenabstand hat ein Volumen von 16 Litern) sind Verwirbelungen im Innenraum unvermeidlich, so daß nicht nur die Restluft, sondern ein Luft-SF₆-Gemisch austritt. Ein Gasverlust, die sog. Überfüllung, von 30 bis 50% der Einfüllmenge ist üblich. Dabei handelt es sich um einen rechnerischen Mittelwert, denn die relativen Emissionen sind bei großflächigen Scheiben kleiner als bei

kleinflächigen. 4 Liter Gasaustritt machen bei einer Scheibe mit 20 Litern Zwischenraum 20%, bei einer mit 4 Litern Zwischenraum 100% aus. (DCL 1996; Ratiotechnik 1996)

Ab 1991 kamen zur Verkürzung der langen Taktzeiten sowohl schnellere Handfüllgeräte als auch - für größere Chargen von Schallschutzscheiben - automatische Gasfüllpressen zum Einsatz. Letztere weisen eine Fülleistung bis zu 120 Liter SF₆ pro Minute auf (Lenhardt 1996). Dabei wird durch seitliches Anheben einer Glasscheibe sowohl unten als auch oben ein zwei bis drei Millimeter breiter Spalt zum auf der anderen Scheibe aufliegenden Abstandshalter erzeugt, so daß das Schwergas unten in den Scheibenzwischenraum geflutet werden kann, um die Luft durch den oberen Spalt hinauszudrängen. Nach dem Befüllvorgang verschließt der Automat die Scheibe, indem er die angehobene Scheibe auf den mit Klebstoff beschichteten Abstandshalter preßt.

Der Gasverlust bei der automatischen Befüllung überstieg anfangs den der langsamen Handgeräte um ein Mehrfaches. Durch konstruktive Maßnahmen konnte er mittlerweile auf einen Durchschnittswert von 50 bis 60% der eingefüllten Menge reduziert werden (Befragung Schallschutzglas).

In vielen Betrieben werden sowohl Handfüllgeräte als auch Füllautomaten angewendet; denn es fallen im allgemeinen außer maschinengeeigneten Standardscheiben auch sehr kleine oder geometrisch schwierige Modelle (Dreiecke, Rundbögen usw.) an, die nur manuell zu füllen sind. Nach einer überschlägigen Schätzung wird gegenwärtig je die Hälfte der Schallschutzscheiben per Hand bzw. automatisch befüllt. Im Durchschnitt ergibt sich aus der Befragung der fünf führenden inländischen Isolierglashersteller und der drei inländischen Hersteller von Gasfüllgeräten eine Überfüllung von 50% auf die effektiv eingefüllte Menge (Befragung Schallschutzglas). Letztere beträgt, wie bereits bemerkt, nur 90% des Scheibenzwischenraums.

2.3.2 Bestandsemissionen

Emissionen nach der Befüllung resultieren entweder aus Schäden in der Versiegelung oder aus Glasbruch. Für Gasverluste während der Nutzungsphase schreibt eine DIN-Norm eine Obergrenze vor: Derzufolge darf die jährliche "Gasverlustrate von gasgefülltem Mehrscheiben-Isolierglas" im Bereich von 1 bis 1,2 Prozent liegen (DIN 1286, T 2). Laut einstimmiger Aussage aller befragten Experten liegt der reale SF₆-Gasverlust, sofern das Glas noch intakt ist, weit unter diesem zulässigen Höchstwert (Befragung Schallschutzglas).

Bei Glasbruch entweicht die Gasfüllung nicht teilweise, sondern vollständig. Auf dem Weg von der Befüllung bis zum Einbau auf der Baustelle sind kritische Stadien die Transportvorgänge und die Einfassung der Scheiben in die Fensterrahmen. Beim Glasbruch während der 20- bis 30-jährigen Nutzungsphase unterscheiden sich Schallschutzscheiben nicht von anderen Verglasungen. Eine zuverlässige Statistik über die Bruchquote des gesamten Verglasungsbestandes gibt es nicht - auch nicht bei den Sachversicherern. Die Fensterglashersteller erheben zwar den Ersatzbedarf; dieser betrug 1992 ca. 8,5 Mio. qm von insgesamt 575 Mio. qm Verglasung, d.h. etwa 1,5% (Flachglas 1996b). Aber er umfaßt nicht nur zerbrochene Scheiben, sondern auch diejenigen, die wegen Kondensation oder im Zuge von Sanierungsmaßnahmen ausgetauscht werden, ohne zerbrochen zu sein.

Die Bestandsemissionen werden in dieser Studie mit jährlich 1% angesetzt. Darin sind laufende Gasverluste durch die Randversiegelung hindurch ebenso enthalten wie Gasverluste durch Glasbruch vor und während der Nutzungsphase.

2.3.3 Entsorgungsverluste

Während für SF₆ in Schaltanlagen oder für H-FKW in der Kältetechnik ein Wiederaufarbeitungskonzept für die Entsorgung der befüllten Anlagen existiert, gibt es ein Recycling im Bereich Schallschutzscheiben lediglich für das Rahmenmaterial PVC und Aluminium sowie für das Glasmaterial (Verband der Fenster- und Fassadenhersteller 1996; Reiling Glas Recycling 1996). Ein Konzept für SF₆-Recycling aus gebrauchten Glasscheiben ist bisher nicht in Anwendung oder in Aussicht. Solange dies nicht der Fall ist, muß damit gerechnet werden, daß nach Ende der Lebensdauer der Schallschutzscheiben (20-30 Jahre) oder des Fensterrahmenmaterials das Füllgas in die Atmosphäre entweicht. Es handelt sich hier um große Emissionsmengen, da von der ursprünglichen SF₆-Befüllung lediglich die jährlich 1% betragenden Bestandsverluste während der 20-30-jährigen Lebensdauer fehlen, mithin noch ca. 75% vorhanden sind.

Da der Einbau der ersten SF₆-Schallschutzscheiben 1975 erfolgte, ist ab dem Jahr 2000 mit ersten Entsorgungsemissionen zu rechnen, die danach von Jahr zu Jahr zunehmen werden.

2.3.4 Menge und Zusammensetzung der Emissionen 1990 bis 2030

In Tabelle 9 sind die jährlichen Totalemissionen für 10 Stichjahre aufgeführt. Daraus geht auch hervor, daß sie vor dem Jahr 2010 mengenmäßig unter den Jahresverbräuchen liegen und danach erheblich darüber. Sie steigen von 1975 bis 1995 kontinuierlich bis auf 108 Tonnen an, sinken bis 2000 auf 74 Tonnen ab und nehmen danach erneut kräftig zu - bis zum Maximum von knapp 200 Tonnen im Jahre 2020. Erst ab 2027 befinden sich die Emissionen im Gleichgewicht mit dem Jahresverbrauch - auf einem Niveau von 110 Tonnen.

Tab. 9: Verbrauch und Emissionen von SF₆ bei Schallschutzscheiben in Tonnen										
Jahr	1975	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Verbrauch	5	180	275	146	110	110	110	110	110	110
Emission	2	69	108	74	91	128	153	199	130	110

Verbrauch: Einfüllung plus Überfüllung. Emissionen: Überfüllung + Bestandsemissionen + Entsorgungsverluste. Die Berechnungsgrundlagen sind im Text erläutert.

Wie eingangs dieses Abschnitts 2.3 bemerkt, fallen Befüllungs-, Bestands- und Entsorgungs-Emissionen zeitlich verschieden stark an. Aus der im Abschnitt 2.2 dargestellten Verbrauchsentwicklung der Jahre 1975 bis 2000 ff. lassen sich die Emissionen ableiten, da alle drei Emissionsgruppen entweder zeitgleich oder zeitverschoben von der SF₆-Verbrauchsmenge im Befüllungsjahr abhängen. Das Diagramm 10 zeigt die anfallenden Emissionen in ihrer unterschiedlichen Zusammensetzung im Zeitverlauf.

Die Befüllungsemissionen (Überfüllung) betragen 50% des Jahresverbrauchs und verlaufen daher parallel mit ihm. Wie dieser erreichen sie ihr Maximum im Jahr 1995. Ihr Spitzenwert beträgt dann 92 Tonnen. Danach sinken sie und bleiben ab dem Jahr 2002 auf einem konstanten Wert von 37 Tonnen.

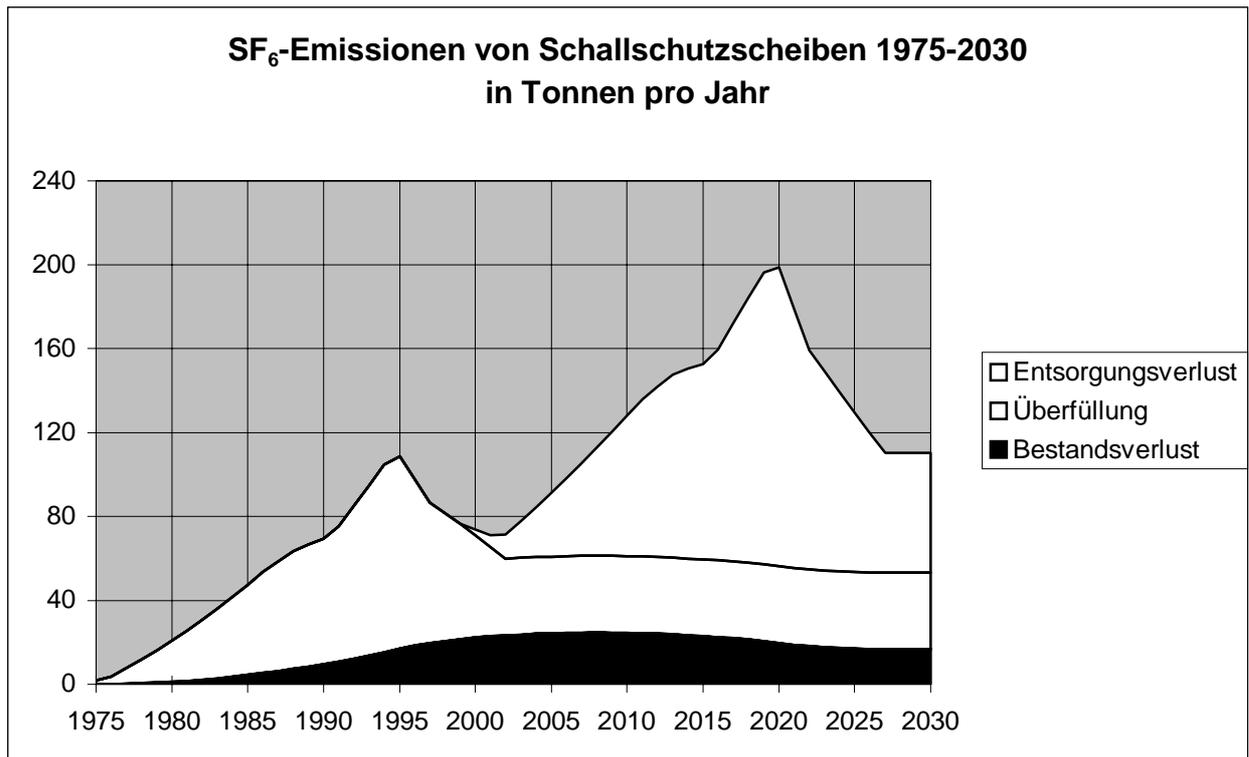


Diagramm 10: SF₆-Emissionen von Schallschutzscheiben 1975 bis 2030 in Tonnen pro Jahr. Ihren vorläufigen Höhepunkt haben die Emissionen 1995, wenn die dem Jahresverbrauch proportionale Überfüllung ihr Maximum hat. Nach einer vorübergehenden Senkung steigen die Emissionen ab 2000 wegen der Entsorgungsverluste wieder an. Deren Maximum, und damit das Maximum der Gesamtemissionen, wird 2020 erreicht - bei 199 Tonnen.

Die Bestandsemissionen (Bestandsverluste), die jährlich 1% der SF₆-Füllung in sämtlichen eingebauten und noch nicht entsorgten Schallschutzscheiben betragen, steigen mit der Anhäufung des Bestands bis zum Jahre 2008 auf 25 Tonnen an. Danach sinken diese Emissionen wieder, weil die jährlichen SF₆-Abgänge größer als die SF₆-Zugänge durch Scheiben-Neubefüllungen sind. Ab 2026 ff. belaufen sich die Bestandsemissionen konstant auf 17 Tonnen.

Die Entsorgungsemissionen (Entsorgungsverluste) setzen erst ab dem Jahr 2000 ein, wenn nach 25-jähriger Nutzungsphase der aus dem Jahr 1975 stammende erste Scheiben-Jahrgang ersetzt wird. Hier wird unterstellt, daß kein Recycling von SF₆ aus Schallschutzscheiben praktiziert wird. Falls es bei diesem Zustand bleibt, dann nimmt die Kurve der Entsorgungsemissionen vom Jahr 2000 an 25 Jahre lang einen steilen Anstieg, der erst 2025 bei einem Wert von 142 Tonnen sein Maximum erreicht. Die Gesamtemissionen erreichen dann ebenfalls ihr Maximum mit knapp 200 Jahrestonnen, an denen die Entsorgungsverluste einen Anteil von über 70% ausmachen. Erst ab 2027 ist mit einem konstanten Wert der Entsorgungsverluste in Höhe von 57 Tonnen zur rechnen. Die Gesamtemissionen betragen ab diesem Jahr konstant 110 Tonnen jährlich und sind dem Jahresverbrauch gleich (Gleichgewichtsemissionen).

2.4 Der Beitrag zum Treibhauseffekt durch SF₆-Emissionen von 1975 bis 2030

Das Treibhauspotential der SF₆-Emissionen aus Schallschutzscheiben ist sehr hoch. Im Emissionsspitzenjahr 2020 ist der Beitrag zum Treibhauseffekt der 199 (metrischen)

Tonnen SF₆ so groß wie derjenige von 4,75 Millionen Tonnen CO₂, über einen Zeitraum von 100 Jahren betrachtet (GWP_{100a}). Im Bezugsjahr 1990 waren es erst 1,66 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente gewesen.

Tab. 10: Treibhauspotential der Emissionen von SF₆ bei Schallschutzscheiben in Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente 1990-2030									
Jahr	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
Emission	69	108	74	91	128	153	199	130	110
Mio. t CO ₂ -Äqu.	1,66	2,59	1,76	2,18	3,06	3,65	4,75	3,10	2,63

Die grafische Umsetzung des Beitrags zum Treibhauseffekt in Tabelle 10 zeigt Diagramm 11:

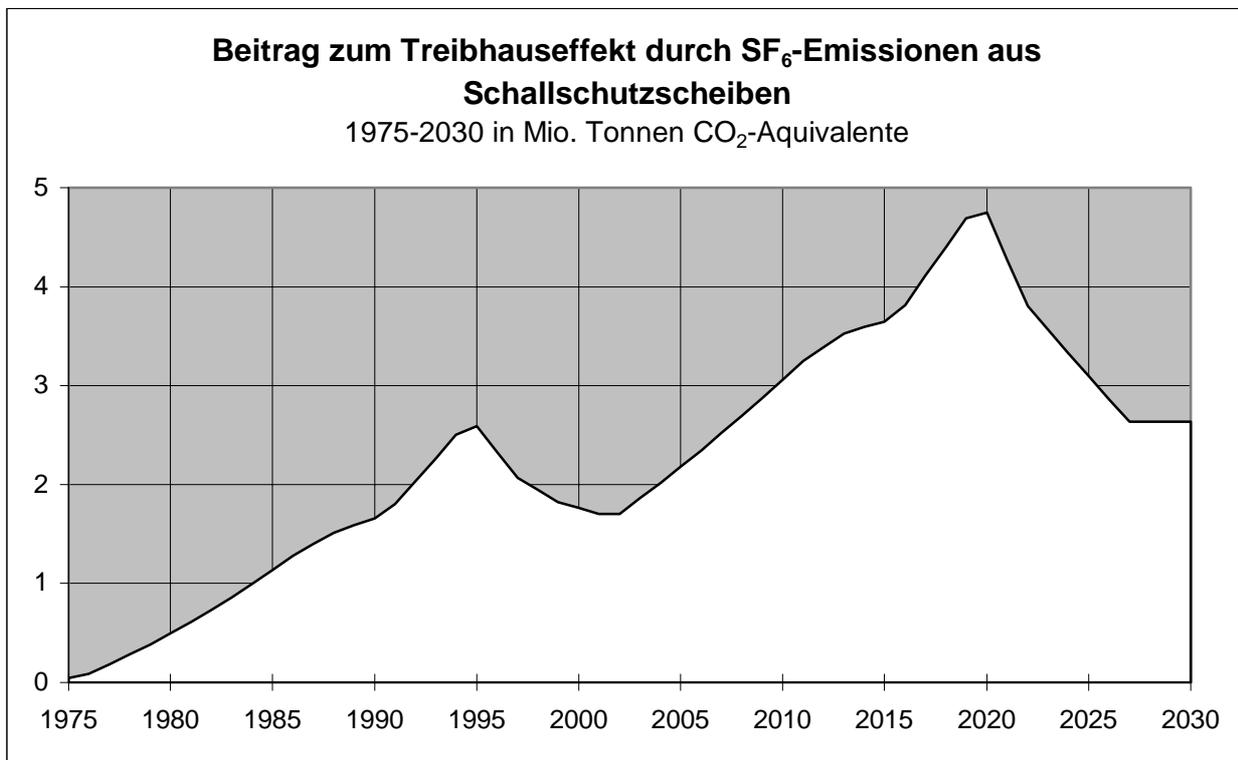


Diagramm 11: Beitrag zum Treibhauseffekt durch SF₆-Emissionen aus Schallschutzscheiben 1975 bis 2030. Die Kurve der CO₂-Äquivalente erreicht das Maximum im Jahr 2020 bei 4,75 Mio. Tonnen und stabilisiert sich langfristig ab dem Jahr 2027 bei 2,63 Mio. Tonnen.

2.5 Alternativen zu SF₆

Aufgrund der großen SF₆-Bestände in bereits verbauten Schallschutzscheiben ist eine spürbare Entlastung bei den Emissionen mittelfristig ohne ein Recyclingkonzept nicht möglich. Da aber selbst dann die SF₆-Emissionen aus Schallschutzscheiben (Befüllungsemissionen) noch erheblich wären, kommt der stofflichen Substitution erhöhte Bedeutung zu.

SF₆ ist nicht der einzige schalldämmende Faktor bei Glasscheiben, sondern es verstärkt lediglich die ohnehin schalldämmende Wirkung gängiger Mehrscheiben-Isoliergläser um weitere 2-4 dB. Ein zusätzlicher Schallschutzeffekt läßt sich ohne SF₆ auch durch Füllung mit Gießharz erzielen, insbesondere im Zusammenhang mit verändertem, asymmetrischem Glasaufbau. Assymmetrischer Glasaufbau bedeutet nichts anderes als unterschiedliche Dicke der Scheiben. Die schalldämmende Wirkung wird durch eine zusätzlich zur gießharzgefüllten Zweifachscheibe angebrachte dritte Scheibe weiter erhöht (Flachglas 1996a). Dazu muß allerdings auch die Stärke der Fensterrahmen geändert werden.

Die Kosten eines Isolierglases mit Gießharzfällung sind etwa doppelt so hoch wie die einer Doppelscheibe mit SF₆-Fällung. Diese Verdoppelung führt beim fertigen Fenster zu einer Preiserhöhung von 30 bis 40% (Unilux 1996). Einige Fensterhersteller in Deutschland sind mittlerweile dazu übergegangen, grundsätzlich Schallschutzscheiben nicht mehr mit SF₆-Fällung, sondern mit asymmetrischen Glasaufbau und Gießharzfällung zu fertigen und weiterzuverarbeiten.

3. Autoreifen

Die Befüllung von Autoreifen ist nach der Befüllung von Schallschutzscheiben der drittgrößte Verbrauchsposten von SF₆. Der Verbrauch stieg von 1990 bis 1995 von 100 auf 130 Tonnen. Mit dreijährigem Zeitverzug, bei der Demontage der abgefahrenen Reifen, werden die gespeicherten SF₆-Mengen ungehindert in die Atmosphäre emittiert. Der ökonomische Nutzen steht bei dieser Anwendung in einem derart krassen Mißverhältnis zu seinem ökologischen Schaden, daß über seine Fortsetzung ernsthaft nachgedacht werden sollte.

3.1 Erhöhte Druckstabilität dank SF₆

Seit 1984 haben Autofahrer in Deutschland die Möglichkeit, ihre Reifen mit SF₆ statt mit Luft befüllen zu lassen. Dabei werden aus einer 40-kg-Druckflasche in der Regel pro Reifen 250-350 Gramm entnommen, pro Reifensatz demnach über 1 kg, wofür der Kunde zwischen 80 und 120 DM bezahlt. Die im Vergleich zu Stickstoff und Sauerstoff der Luft größeren Moleküle des SF₆ entweichen wesentlich langsamer, so daß der Reifenhersteller Continental (Entdecker von SF₆ als Reifenfüllgas) "stabilen Reifendruck für 1 Jahr und länger" (Continental o.J.) versprechen konnte.

Konstanter korrekter Reifendruck trägt zu erhöhter Fahrsicherheit, geringerem Reifenverschleiß und niedrigerem Spritverbrauch bei. Mit Druckabweichungen vom Sollwert sind lt. Continental aber "über die Hälfte der Autofahrer" unterwegs (ebd.). Nach einer im Februar 1996 veröffentlichten Untersuchung des Bundesverbandes Reifenhandel und Vulkaniseurhandwerk e.V. (BRV 1996) weicht sogar bei "74,24% der Autos der Luftdruck der Reifen an einem oder mehreren Rädern um mindestens 0,2 bar von den vorgeschriebenen Herstellerangaben ab". Grund für den BRV, an die Autofahrer zu appellieren, "einmal wöchentlich den Reifendruck zu kontrollieren" (BRV 1996).

Das von Continental unter der Bezeichnung "Air safe" entwickelte System kann die Abweichungen vom korrekten Fülldruck nach oben und unten nahezu für die ganze Nutzungsdauer eines Reifens verhindern, sofern ihn keine mechanischen Beschädigungen undicht machen. Gerade hierin liegt aber das Problem. Die SF₆-Befüllung kann in der Praxis eine Vernachlässigung regelmäßiger Reifenkontrollen (durch Ansetzen des Meßgerätes an die Ventile) begünstigen. Allerdings ist anzumerken, daß die "Air safe"-Informationsblätter zumindest indirekt auf regelmäßige Reifenkontrollen auch im Falle von SF₆-Befüllung hinweisen: "Druckverluste durch äußere Reifenverletzungen oder undichte Felgen oder Ventile sind auch bei der Verwendung von ContiAIRSAFE weiterhin möglich" (Continental o.J.).

3.2 Verbrauch und Emission

Mittlerweile besteht bei über 500 der rd. 3500 Verkaufsstellen des deutschen Reifenfachhandels die Möglichkeit, die Reifen mit SF₆-Gas zu befüllen. Der Marktanteil von Continental lag bereits 1990 bei nur noch 50% (Continental 1996a). Außer den etwa 200 "Vergölst"-Niederlassungen aus dem Continental-Konzernbereich bietet der fast ebenso viele Händler umfassende "Stinnes Reifendienst" (Veba-Konzern) SF₆ an (Stinnes 1996). Dazu kommen noch über 100 Reifenhändler aus anderen Kooperationen sowie Reifenhändler von lokaler Bedeutung (Befragung Gasehandel).

Bis Mitte 1996 hat Continental die SF₆-Belieferung des konzerneigenen und eines Teils des allgemeinen Reifenhandels koordiniert. Von dieser Aufgabe trennte sich das Unternehmen, so daß sich die Reifenhändler seit Mitte 1996 direkt über den Gasehandel versorgen. Gerade die Gasehändler berichten von einem steilen Anstieg der Nachfrage nach SF₆ für die Reifenbefüllung seit 1990.

Demzufolge ist der SF₆-Verbrauch von ca. 100 t im Jahr 1990 auf 130 t im Jahr 1995 angestiegen (Befragung Gasehandel). Mit 130 t SF₆ können ca. 110 000 Reifensätze befüllt werden. Das entspricht 0,27% des inländischen Pkw-Bestands. 1987 hatte der Gesamtverbrauch erst bei 65 t gelegen.

Tab. 11: Verbrauch und Emissionen von SF₆ als Reifengas 1987-1998 - in Tonnen					
	1987	1990	1992	1995	1998
SF ₆ -Verbrauch	65	100	112	130	90
SF ₆ -Emission	25	65	88	112	130

Quellen: Verbräuche bis 1995: Befragung Gasehandel. Für 1998 Eigenschätzung. Die Emissionen folgen im 3-Jahresabstand den Verbräuchen in gleicher Größe.

Die Emissionen folgen dem Verbrauch im Abstand von ca. 3 Jahren. Bei einer durchschnittlichen Pkw-Fahrleistung von jährlich über 15 000 km und einer mittleren Reifenlaufzeit von 50 000 km steht ein Reifenwechsel im Turnus von drei Jahren an (Continental 1996a). Bei der Demontage der Reifen von den Felgen entweicht das Füllgas vollständig, ob SF₆ oder Luft. Die SF₆-Verbräuche des Jahres 1987 sind daher die Emissionen des Jahres 1990, und 1995 emittiert, was 1992 eingefüllt wurde usw. (Tab. 11).

3.3 Bedenken gegen SF₆ im Reifen

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 beispielsweise 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.

Bedenken gegen SF₆-Gas als Reifenfüllung gründen zum Teil auf Sicherheitsüberlegungen, d.h. auf der möglichen Verleitung der Kunden zu ungenügender Prüfung von SF₆-gefüllten Reifen auf mechanische Schäden hin. Dies ist eines der Motive, weshalb der Reifenhersteller Continental künftig auf die Werbung für "Air safe" verzichten will.

Die Sicherheitsbedenken werden auch durch die Kundengruppe selbst genährt. Es handelt sich nicht um sogenannte Sportfahrer, die ihrem Fahrzeug überdurchschnittlich viel Aufmerksamkeit widmen. Die Hauptanwender von SF₆ schätzen Bequemlichkeit und Fahrkomfort; es sind Halter von Fahrzeugen der oberen Ausstattungs- und Preiskategorie (Continental 1996a). Diese Käufergruppe wird durch die umlaufende Behauptung zusätzlich 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 ja Geld ausgegeben wurde, nachträglich begleiten.

Kritik an der Reifenfüllung mit SF₆ ist ökologisch begründet. Minderdruck von 0,3 bar gegenüber korrektem Reifendruck führt in der Tat zu einem Treibstoffmehrverbrauch von 1,5%. Diesen Punkt hat ContiAIRSAFE in der Vergangenheit hervorgehoben und vorgerechnet, daß ein VW Golf mit 9 Litern Benzinverbrauch pro 100 km bei einer Jahresfahrleistung von 15 000 km im Jahr 20 Liter mehr verbraucht (Continental o.J.) und in CO₂ verwandelt, wenn er statt 2,0 nur mit 1,7 bar Druck fährt. Der Mehrverbrauch beträgt nach drei Jahren, der mittleren Reifenlaufzeit, 60 Liter.

Aus der Weiterrechnung ergibt sich, daß der Mehrverbrauch bei einer Umsetzung von 1 Liter Benzin zu 2,35 kg CO₂ insgesamt 141 kg des Treibhausgases CO₂ erzeugt. Diese Menge durch korrekten Reifendruck zu vermeiden, ist sicher verdienstvoll, aber nicht, wenn dies mittels SF₆ geschieht. Wird den 141 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 SF₆-befüllte Reifensatz spart zwar in drei Jahren 141 kg CO₂ ein, erzeugt aber nach diesem Zeitraum ein Äquivalent von 23 900 kg CO₂. Der Beitrag zum Treibhauseffekt durch die SF₆-Füllung ist fast 170mal so groß wie die Reduzierung über weniger Kraftstoffverbrauch.

Vor dem Hintergrund dieses Mißverhältnisses scheint die Verwendung von SF₆ als Reifenfüllgas ökologisch nicht verantwortbar. Der Verzicht auf SF₆ ist auch praktisch durchaus zuzumuten, zumal SF₆ nicht die Häufigkeit der Reifendruckmessungen, sondern nur der Gasnachfüllungen verringern soll. Wer aber ohnehin schon das Druckmeßgerät auf das aufgeschraubte Ventil angesetzt hat, der kann auch noch die Sekunde für den Fingerdruck zur Nachfüllung von Luft aufbringen.

3.4 Künftige Emissionsentwicklung: Halbierung zu erwarten

Die folgenden Schätzungen gehen für die Berechnung der Emissionen davon aus, daß künftig die Reifenhersteller keine und die Reifenhändler immer weniger Werbung für die Reifenbefüllung mit SF₆ betreiben. Von Reifenherstellern ist sogar zu erwarten, daß

sie sich an einer Gegenaufklärung beteiligen. Zugleich wird unterstellt, daß der Gesetzgeber die Anwendung nicht verbietet, sondern Informationspolitik über den Umweltschaden durch SF₆-Reifenbefüllung betreibt bzw. unterstützt. Für diesen Fall ist mit einem allmählichen, aber stetigen Rückgang von Verbrauch und Emission von SF₆ als Reifenfüllgas zu rechnen. Zumindest wird für das Jahr 2000 eine Halbierung des Verbrauchs gegenüber 1995 angenommen. Unter diesen Bedingungen ergibt sich in etwa das Bild in Diagramm 12.

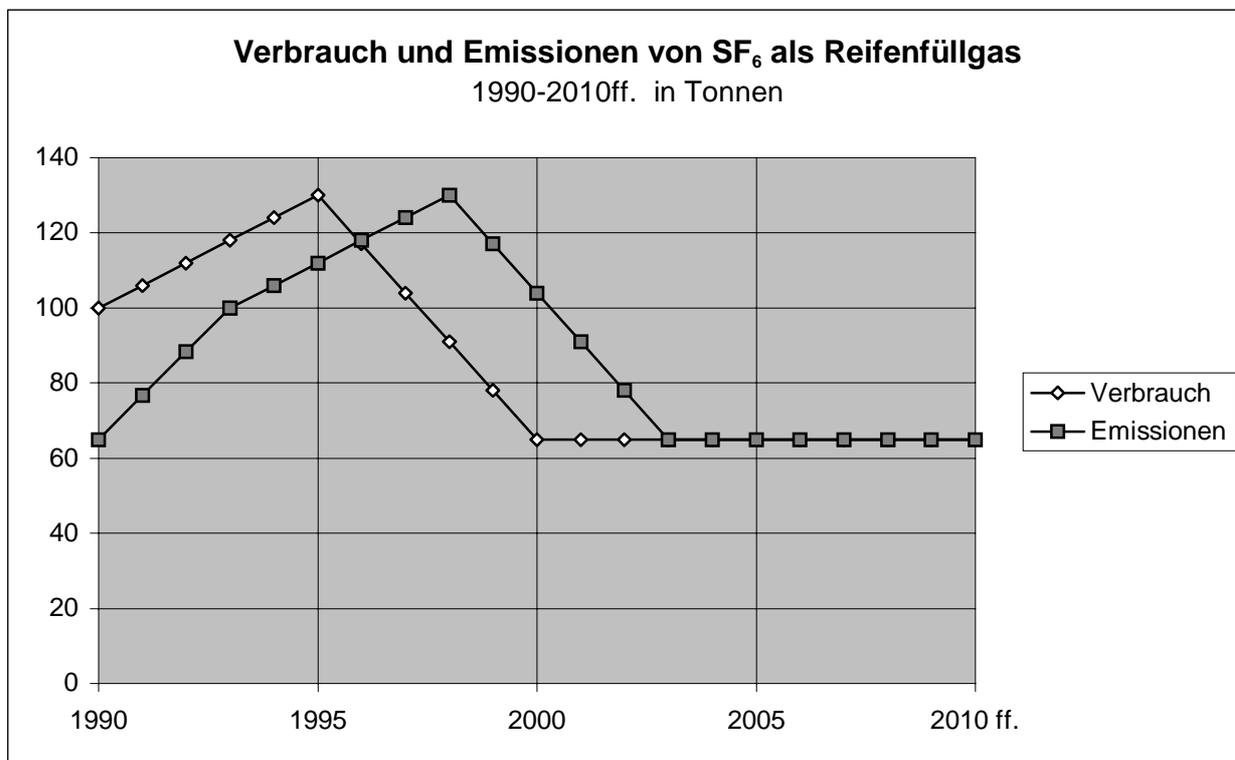


Diagramm 12: Verbrauch und Emissionen von SF₆ als Reifenfüllgas 1990-2010 ff. in Tonnen. Nach dem Anstieg der gegenüber dem Verbrauchsjahr mit 3 Jahren Verzögerung anfallenden Emissionen bis 1998 (130 t) wird eine Verbrauchs- bzw. Emissionshalbierung auf 65 t ab 2000 bzw. 2003 unterstellt - auf ein Niveau, das ohne ordnungsrechtliche Maßnahmen in der Zeit danach konstant bleiben könnte.

3.5 Alternativen

Die Alternative zur SF₆-Reifenfüllung ist Luft. Allerdings werben mit der gleichen Argumentation wie für SF₆ seit einiger Zeit die Händlergruppen "point S" und "Reifenring" in ihren über 400 Niederlassungen für die Reifenbefüllung mit "PRO-FILL", das nichts anderes als reiner Stickstoff ist. Die Prospekte versprechen "verminderten Profilverschleiß und verringerten Druckverlust", weil "PRO-FILL die Druckstabilität erhöht", da es länger im Reifen bleibe als "gewöhnliche Luft" (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 durch seine unter Energieaufwand stattfindende Erzeugung und durch seinen Transport.

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 Kondensation wegen ihrer korrosiven Wirkung zu verhindern (Lufthansa 1996).

3.6 Beitrag zum Treibhauseffekt durch SF₆-Emissionen aus Autoreifen

Autoreifen sind in den 90er Jahren der größte Einzelemittent von SF₆. Erst nach dem Jahr 2000 wird aus Schallschutzscheiben mehr emittieren, vorausgesetzt, daß der unterstellte Rückgang bei den Reifenemissionen tatsächlich stattfindet. Tabelle 12 dokumentiert die Emissionsmengen in Tonnen mit ihrem Treibhauspotential im Fünfjahresabstand.

Tab.12: SF₆-Emissionen aus Autoreifen und ihr Beitrag zum Treibhauseffekt 1990-2010 ff.					
<i>GWP: 23 900</i>	<i>1990</i>	<i>1995</i>	<i>2000</i>	<i>2005</i>	<i>2010 ff.</i>
Emissionen in t	65	112	104	65	65
CO ₂ -Äquivalente in Mio t	1,55	2,68	2,49	1,55	1,55

Quelle: Für Emissionen Befragung Gasehandel. Ab 2000 Eigenschätzung.

Der Beitrag zum Treibhauseffekt durch SF₆-Emissionen aus Autoreifen betrug 1990 rd. 1,55 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente. Im Jahr 1998, drei Jahre nach dem Spitzenverbrauchsjahr 1995, wird die Rekordhöhe von 3,11 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente erreicht werden.

4. Magnesiumgießen

In Magnesiumgießereien wurden 1990 ca. 7,4 und 1995 ca. 7,8 Tonnen SF₆ als Schutzgas verbraucht. Seit 1996 ist der Verbrauch rückläufig. Infolge der minimalen chemischen Umsetzung sind Verbräuche mit Emissionen gleichzusetzen. Durch SF₆-sparende Ofentechnologie ist eine Senkung des Gasverbrauchs um mehr als den Faktor 10 realisierbar. Damit ist es möglich, die absolute Produktion von Magnesiumguß um ein Mehrfaches zu steigern, ohne mehr SF₆ als im Jahr 1990 zu emittieren.

4.1 SF₆ als Schutzgas der Magnesiumschmelze

Beim Gießen von Magnesium wird SF₆ als Schutzgas über der Schmelze eingesetzt, um ihre Oxidation und Entzündung zu verhindern. Es wird dabei in Konzentrationen bis 1 Vol.-% im Gemisch mit Trägergasen wie trockener Luft oder CO₂ über der Oberfläche des über 650 °C flüssigen Metalls verteilt, welches sich normalerweise bereits bei Temperaturen über 500°C entzündet (Solvay 1992, 16/17). Mit Luftsauerstoff bildet Magnesium zwar eine passivierende dünne Oxidhaut, die aber so porös ist, daß sie Metall- dampf hindurch läßt.

Die geringe Zugabe von SF₆ in die Atmosphäre des Schmelztiegels unterbindet die Entzündung des Metalls², und zwar, so wird angenommen, sowohl dadurch, daß die poröse Magnesiumoxidschicht einen Teil des SF₆ physikalisch adsorbiert, als auch dadurch, daß eine chemische Reaktion zwischen Magnesium und SF₆ stattfindet, die zu Magnesiumfluorid (MgF₂) im Schutzfilm führt (Gjestland/Westengen 1996, 3). Die Reaktion läßt sich vereinfacht so vorstellen:



Dabei wird SF₆ nur in minimalen Anteilen chemisch umgesetzt, so daß Verbrauch und Emission gleichgesetzt werden können.³

Das SF₆-Verfahren kommt seit Mitte der 70er Jahre zum Einsatz, nachdem es Anfang der 70er Jahre an der University of Michigan von J.D.Hanawalt entwickelt worden war (Clow/Garber 1991, 600). Seitdem trat es in Konkurrenz zu SO₂, das in Konzentrationen von 0,5-1,5% über der Schmelze zu einem Schutzfilm aus MgSO₄ führt, der elastischer und dicker als die reine MgO-Schicht ist und dadurch die Schmelze wirksam schützt (Gjestland/Westengen 1996, 7). Wegen der Toxizität gegenüber Menschen und der korrosiven Wirkung von SO₂ gegenüber Stahl konnte sich SF₆ in vielen neuen Gießereien durchsetzen, insbesondere beim Magnesium-Druckguß.

Vor dem Gießen wird der Rohstoff Magnesium (in Form von Masseln) zunächst verflüssigt wird. Das geschieht in Öfen, deren Tiegel im Betrieb abgedeckt sind, aber Zufuhröffnungen für Rohmaterial und Schutzgas sowie Auslässe für die Schmelze haben. In Deutschland wird das geschmolzene Metall zu 90% in Druckgußmaschinen weiterverarbeitet (Warm- und Kaltkammerverfahren). Sandguß betreiben nur 10% der Gießereien (Befragung Magnesium). Beim Sandgießen wird die Schmelze höher erhitzt. Hier

² "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).

³ "In der Magnesiumindustrie gilt, daß alles SF₆, das in der Produktion eingesetzt wird, in die Atmosphäre emittiert." (Gjestland/Westengen/Magers 1996, 2).

sind noch in vielen Fällen statt Gasen Abdecksalze im Einsatz, die wegen der Korrosionsanfälligkeit der Gußteile aus dem Druckgießen durch SO₂ oder SF₆ verdrängt sind.

Da in Europa nur in Norwegen und Frankreich Primärmagnesium hergestellt wird (Metallstatistik 1993, 5), ist in Deutschland kein Schutzgas für das Vergießen von frischem Primärmetall in Barren bzw. Masseln erforderlich.

Schutzgas kommt in Deutschland nur bei der Verarbeitung der fast ausschließlich aus den USA (Dow; Vertrieb über Montangesellschaft, Köln) oder Norwegen (Norsk Hydro; Vertrieb über Hydro Magnesium, Bottrop) importierten Masseln in Formgießereien vor. Anzumerken ist, daß die Hauptabnehmer von Magnesium nicht Gießereien sind. Sie verwenden nur etwa 15% des Magnesium-Imports. Über die Hälfte des Leichtmetalls geht als Legierungsbestandteil in die Aluminiumverarbeitung (Clow/Garber 1991, 599).

4.2 Verbrauch und Emissionen von SF₆

Die Befragung aller inländischen Leichtmetallgießereien, die 1995 jeweils über 5 Tonnen Magnesium im Druck- oder Sandguß verarbeiteten, ergab eine Produktionsmenge von Magnesiumguß in Höhe von 4750 t für 1990 und 4920 t für 1995 (Tabelle 13). (1996 waren es bereits über 5350 t.) Die Anzahl der Gießereien betrug 1990 zwölf, 1995 waren es dreizehn.

4.2.1 Oxidationsschutz der inländischen Gießereien

Von den 4750 t des Jahres 1990 wurden nur 1630 t (34%) unter Verwendung von SF₆ als Schutzgas hergestellt (Tabelle 13), und zwar bei sechs Unternehmen - fünf Druckgießern und einem Sandgießer.

Tab. 13: Magnesiumguß in Tonnen - nach Oxidationsschutz der Schmelze 1990 und 1995

SF ₆		SO ₂		Abdecksalze	
1990	1995	1990	1995	1990	1995
1630	1800	2960	2960	160	160

Quelle: Befragung Magnesium (13 Gießereien über 5 t Jahresausstoß Magnesiumguß).

Mit SO₂ dagegen arbeiteten 1990 zwar nur 4 Gießereien (alle Druckguß), doch produzierten diese vier zusammen zwei Drittel des gesamten inländischen Magnesiumgusses. Der überwiegende Anteil der SO₂-Verwendung kommt allerdings hauptsächlich von einem einzigen Hersteller, der nach eigenen Angaben über 2000 t Magnesiumdruckguß (Werkzeuggehäuse) produziert und die Metallschmelze seit 1974 mit 0,5%-iger SO₂-Konzentration schützt (Stihl 1996).

Mit Abdecksalzen arbeiteten 1995 zwei weitere Unternehmen: zwei Sandgießer mit einer Gesamtproduktionsmenge von 160 t Magnesiumguß.

Im Laufe des Jahres 1995 kam eine neue Gießerei dazu. Die Produktion von Magnesiumgußteilen stieg dadurch von 4750 auf 4920 t (um 170 t) an.

Da diese neue Gießerei als Schutzgas SF₆ verwendet, nahmen SF₆-geschützte Gußteile zwischen 1990 und 1995 von 1630 t auf 1800 t zu (Tabelle 13).

4.2.2 Die SF₆-Emissionen pro Tonne Magnesiumguß

Die absoluten SF₆-Emissionen beim Magnesiumguß stiegen von 1990 bis 1995 von 7,4 t leicht auf 7,8 t an. Die spezifische SF₆-Emission pro Tonne Magnesiumgußteile sank im gleichen Zeitraum von 4,5 auf 4,3 kg.

Diese Emissionskoeffizienten stimmen weitgehend mit einer weltweiten Umfrage von Norsk Hydro bei 20 Druckgießern überein, die als Durchschnittswert "approximately 4 kg SF₆/ton produced Mg components" (Gjestland/Westengen 1996, 5) ergab. Dabei streuten die Einzelwerte in der Umfrage von 0,1 bis 11 kg pro Tonne.

Auch in der 1996er Befragung im Rahmen dieser Studie ist die Bandbreite der Emissionskoeffizienten sehr groß. Sie reicht von 0,25 kg bis 10 kg SF₆ pro Tonne Magnesiumguß. Dabei werden Emissionskoeffizienten von 10 kg SF₆ pro produzierte Tonne Magnesiumguß öfter genannt, und zwar vorwiegend von kleineren Betrieben, während Emissionskoeffizienten von 0,25 kg SF₆/t Mg in zwei größeren Gießereien auftreten, die erst seit 1996 (noch nicht 1995) mit neuen Schmelzöfen und elektronisch geregelter SF₆-Dosierungstechnik arbeiten.

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 des Eisenfluorids von den Tiegellinnenwänden von 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 1996).

Tab. 14: Magnesiumguß, SF₆-Emissionen und SF₆-Emissionskoeffizienten
1990-1996 tatsächliche Größen, ab 2000 Prognosen

	1990	1995	1996	2000	2005	2010
Magnesiumguß gesamt in t	4750	4920	5350	10000	15000	20000
Magnesiumg. (Schutzgas SF ₆) in t	1630	1800	2370	7020	12020	17020
SF ₆ -Emission in t	7,4	7,8	5,7	7,0	4,9	6,1
SF ₆ -Emission in kg/t Mg-Guß*	4,5	4,3	2,4	1,0	0,4	0,36

Quelle: Befragung Magnesium; Magers 1995; Eigenprognosen für 2005 und 2010. Erläuterungen im Text dieses und des folgenden Abschnitts.

* Quotient aus Zeile "SF₆-Emission in t" und Zeile "Magnesiumguß (Schutzgas SF₆) in t".

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

Zur Verminderung der Emissionen werden insbesondere zwei Arten von technischen Maßnahmen vorgenommen:

1. Die Dichtheit der Öfen wird erhöht, wobei außer Dichtungen im engeren Sinn (feuerfestes Material zwischen Tiegel und Deckel) vor allem Schleusensysteme für die Materialbeschickung eingesetzt werden.
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 1996; Westofen 1996)

Im Jahre 1996 wurden in zwei Gießereien solche modernen Schmelzöfen installiert. Die SF₆-Verbräuche liegen dort tatsächlich um den Faktor 10 niedriger als in den alten Gießereien. Es handelt sich außer einer mittelgroßen Gießerei mit 140 t Jahresproduktion, die vorher SO₂ verwendet hatte, um einen sehr großen Betrieb, der 1995 noch 3,8 kg SF₆ pro Tonne verbraucht hatte. Beide Betriebe benötigen jetzt - nach Eigenangaben - nur noch 0,25 kg SF₆ pro Tonne Magnesiumgußteile.

Allein infolge dieser Umstellungen sanken 1996 die SF₆-Emissionen gegenüber 1995 von 7,8 t auf 5,7 t (Tabelle 14), obwohl das SF₆-geschützte Magnesiumgießen im gleichen Zeitraum um 32% auf 2370 t anstieg. Der durchschnittliche Emissionsfaktor pro Tonne Magnesiumguß lag 1996 bei 2,4 kg SF₆ (ebd.).

4.3 Künftige Verbrauchs- und Emissionsentwicklung

Dem Magnesiumguß wird in Deutschland eine stark wachsende Nachfrage für die nächsten Jahre vorausgesagt, der in obiger Tabelle 14 bereits berücksichtigt ist. Der Grund dafür liegt in dem erwarteten Mengenzuwachs im Automobil, wo das Leichtmetall mit der Dichte 1,8 in einigen Fällen den relativ schweren Stahl (Dichte ca. 7,8) als Werkstoff ersetzen könnte, um das Fahrzeuggewicht zu verringern.

4.3.1 Steigende Magnesiumnachfrage der Autoindustrie

Dem Vorwurf der grundlosen Spekulationen kann mit einem Blick zurück auf die ersten 30 Jahre nach dem 2. Weltkrieg begegnet werden. Noch 1970 wurden in Deutschland 40 000 t Magnesiumguß hergestellt (GDM 1996, Tab.5), die zehnfache Menge der neunziger Jahre (4000 t jährlich). Einen entscheidenden Anteil am Magnesiumverbrauch hatte der VW-Käfer mit je 21 kg Magnesiumguß (vor allem Getriebegehäuse und Motorblock); heutige Fahrzeuge enthalten nur wenige hundert Gramm Magnesium (Schlott 1995). Die Einstellung der Produktion des VW-Käfers in den 70er Jahren löste empfindlichen Störungen auf dem Magnesium-Weltmarkt aus (Günther 1996). In den achtziger Jahren führte in Nordamerika die Debatte über Gewichtsreduzierungen von Fahrzeugen zu erhöhter Verwendung von Druckgußteilen aus Magnesium in Automobilen (Instrumententafeln, Lenksäulen, Getriebeteile usw.). Den US-Herstellern folgten japanische (z.B. Lenkräder bei Toyota). Und in Europa ist VW auf dem Wege zum "Drei-Liter-Auto" wiederum zum Vorreiter bei der Verwendung des Leichtmetalls geworden. Dazu hat sich das Unternehmen 1996 sogar an einer israelischen Fabrik zur Magnesiumgewinnung beteiligt (Günther 1996). Allerdings setzen auch andere deutsche Hersteller verstärkt Magnesium ein (Beispiel: Sitzrahmen bei Mercedes-Benz).

Bereits heute wird die Hälfte des im Inland erzeugten Magnesiumgusses in der Automobilproduktion verwendet (GDM 1996, Tab.13).

Der größte europäische Magnesiumhersteller Norsk Hydro, d.h. sein Geschäftszweig Hydro Magnesium, rechnet mit einem weltweiten Anstieg des Einsatzes von Magnesium-Guß im Automobil von 1993 bis 2000 auf das Dreifache, für Europa sollen sich von 1991 bis 2000 die Mengen vervierfachen, und zwar von 6,3 Tsd. auf 26,1 Tsd. Tonnen (Magers 1995).

Allein für Deutschland mit einem Viertel der europäischen Automobilproduktion läßt sich aus dieser - gewiß z.T. zweckoptimistischen - Prognose ein Anstieg der jährlichen Magnesiumgußproduktion bis zum Jahr 2000 auf ein Niveau von 10 000 t ableiten. In der Tat deutet die Größenordnung der kurz vor der Serienfertigung stehenden VW-Magnesiumgießerei in Kassel darauf hin, daß die deutsche Autoindustrie jene - gegenüber 1995 zusätzlichen - 5000 Jahrestonnen Magnesium im Jahr 2000 verwenden wird.

4.3.2 Bedenken der Magnesiumlieferanten gegen zu hohe SF₆-Emissionen

Die Produktion von zusätzlichen 5000 t Magnesium mit einem Emissionskoeffizienten von 4 kg SF₆/t Mg-Guß würde zusätzliche Emissionen von 20 t SF₆ bewirken. Diese Menge käme der Klimawirkung von fast einer halben Million t CO₂ gleich. Zurecht befürchten die Norsk Hydro-Autoren Gjestland und Westengen für ihr 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. Die Autoren merken an, daß Hydro Magnesium seit 1980 SF₆ auch beim Gießen von Primärmetall, also bei der Herstellung der Masseln im Erzeugerland einsetzt, und zwar mit z.Zt. "0,5 kg pro Tonne Metallguß" (Gjestland/Westengen 1996, 6). Sie fordern daher: "Der Einsatz von SF₆ in der Magnesiumindustrie sollte strikt reduziert oder gar eliminiert werden", wobei sie SO₂ für einen akzeptablen Ersatz halten (ebd.).

4.3.3 Vervierfachung der Magnesiumgußproduktion gegenüber 1990 ohne Steigerung der SF₆-Emissionen (Szenario)

Der Trend geht bei den neuen Gießereien zumindest in Deutschland nicht zu SO₂, sondern zu SF₆ als Schutzgas. Mit den seit 1996 in Deutschland eingesetzten neuen Schmelzöfen sind allerdings Emissionsfaktoren von 0,25 kg und sogar weniger erzielbar. Würde der bis zum Jahre 2000 projizierte Mehrbedarf an Magnesiumguß von 5000 t mit einer solchen Technik hergestellt, bedeutete dies eine zusätzliche Emission von nur 1,25 t SF₆.

Unter diesen Bedingungen würde die emittierte SF₆-Menge im Jahre 2000 mit 7 t trotz Verdoppelung der Magnesiumgußproduktion sogar noch knapp unter der Emissionsmenge von 1990 (7,4 t) liegen (Tabelle 14; Diagramm 13).

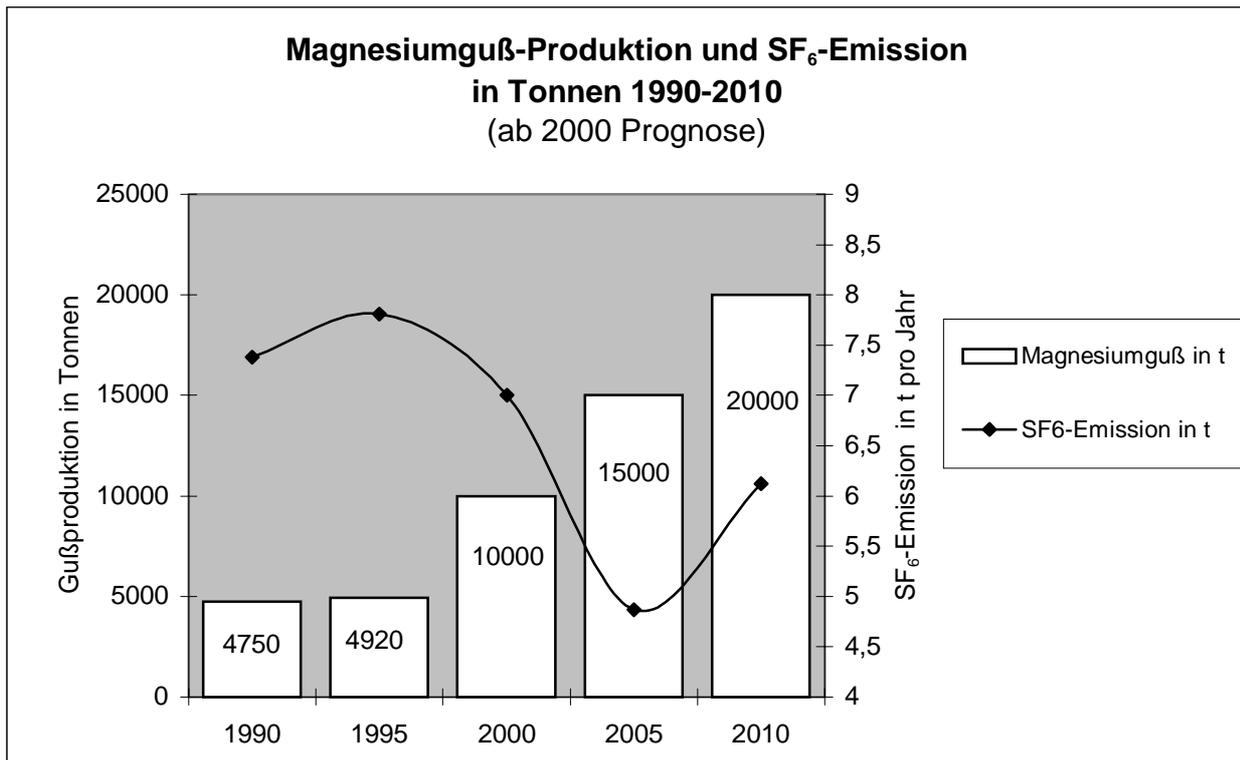


Diagramm 13: Magnesiumguß-Produktion und SF₆-Emission 1990-2010 in Tonnen. Mit modernen Öfen ist eine Produktionssteigerung bei gleichzeitiger Reduktion der SF₆-Emissionen gegenüber heute möglich. Grund ist ein niedrigerer Emissionsfaktor der neuen Technik.

Würden die verbliebenen vier mit herkömmlichen Schmelzöfen arbeitenden mittelgroßen Gießereien (jeweils über 100 t Jahresproduktion) ihre hohen Emissionskoeffizienten von 5,2 kg SF₆/t Mg zwischen 2000 und 2005 durch Modernisierung ebenfalls auf den Wert von 0,25 kg SF₆/t Mg senken, würden die SF₆-Emissionen um weitere 3,4 t sinken. Vorausgesetzt, daß die drei großen Gießereien, die heute SO₂ einsetzen, dabei bleiben oder ebenfalls auf SF₆-arme Ofentechnologie wechseln, könnten inländische Betriebe bis 2005 weitere 5000 t Magnesiumguß mit modernen Schmelzöfen erzeugen, wodurch die SF₆-Emissionen auf 4,9 t jährlich anstiegen (Tabelle 14; Diagramm 13), und bis 2010 noch einmal um die gleiche Menge erhöhen auf insgesamt 20 000 t Magnesiumguß, ohne mit ihren SF₆-Emissionen von 6,1 t das Niveau des Jahres 1990 (7,4 t) zu überschreiten.

Der Emissionskoeffizient für SF₆ läge dann in den SF₆-einsetzenden Gießereien (d.h. ohne die SO₂-Verwender) bei 0,36 kg pro Tonne Magnesiumguß (Tabelle 14; Diagramm 13).

5. Halbleiterfertigung

SF₆ ist ein wichtiges Ätzgas in der Halbleiterindustrie. Zusammen mit anderen fluorierten Gasen wird SF₆ als Ätzgas in dem selbstständigen Kapitel IV abgehandelt. Daraus stammen die nachfolgenden Daten zur Verbrauchs- und Emissionsentwicklung.

Tab. 15: Verbrauch und Emission von SF₆ in der deutschen Halbleiterindustrie 1990 bis 2005 ff. in t/a

SF ₆	1990	1995	2000 (Progn.)	2005 ff. (Progn.)
Verbrauch	5	6	7,5	9,5
Emission	3,7	2,2	0,6	0,2

Quelle: Befragung Elektronikgase; für 2005 ff. eigene Hochrechnung, s. Kap. IV.

Trotz der Verbrauchszunahme nehmen die Emissionen wegen der Abgasreinigung ab. Diagramm 14 macht die gegensätzliche Entwicklung grafisch sichtbar:

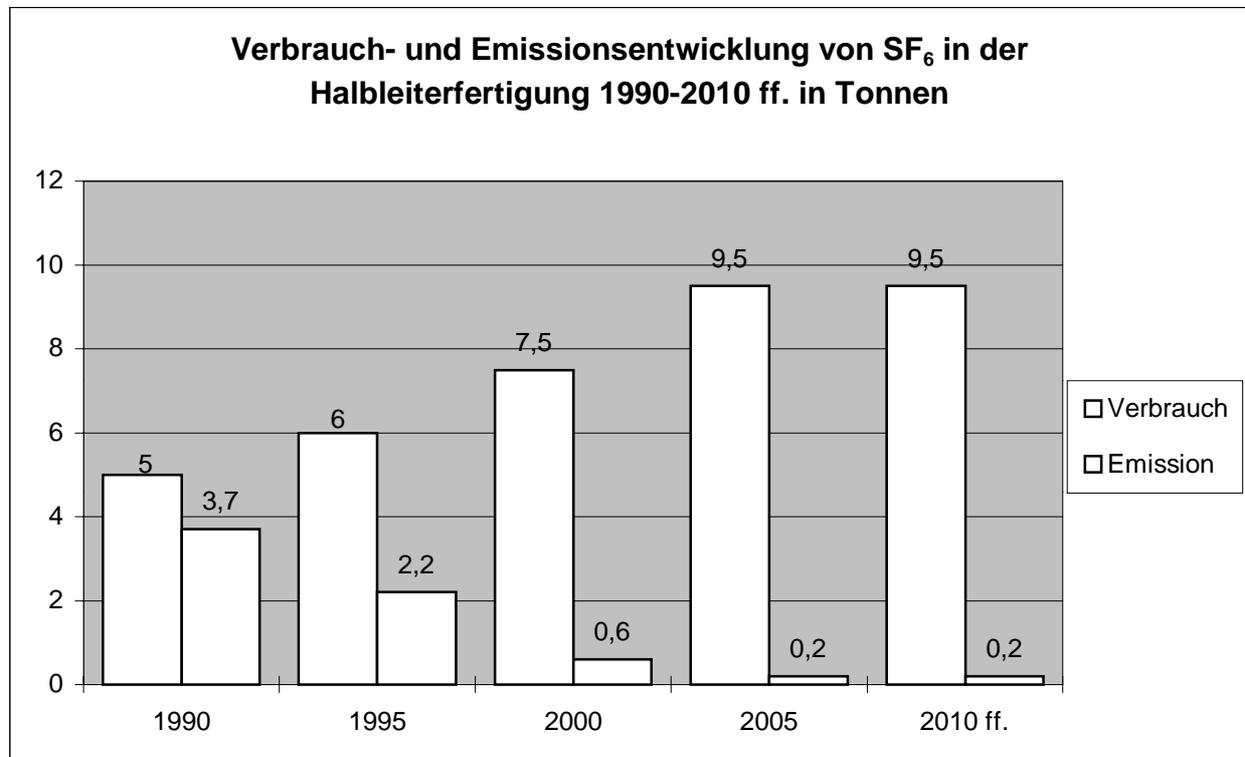


Diagramm 14: Verbrauch und Emission von SF₆ in der Halbleiterfertigung 1990-2010ff. in Tonnen pro Jahr. Während der Verbrauch bis 2005 auf 9,5 Tonnen steigt, sinken durch die Abgasreinigung die Emissionen von 1990 bis 2005 ff. von 3,7 auf lediglich 0,2 Tonnen.

Im selben Maße, wie die Emissionen zurückgehen, sinkt ihr Beitrag zum Treibhauseffekt. In Tabelle 16 sind die Emissionen aus Tab. 15 in CO₂-Äquivalente umgerechnet.

Tab. 16: Treibhauspotential der SF₆-Emissionen aus der Halbleiterindustrie 1990-2010 ff. - in Tsd. Tonnen CO₂-Äquivalente

GWP _{100a}	1990	1995	2000	2005	2010 ff.
23900	88,43	52,58	14,34	4,78	4,78

Quellen: Tabelle 15. Für das GWP: IPCC 1995.

6. Sonstige Bereiche

Neben den fünf Hauptanwendungen von SF₆ gibt es noch weitere Einzelanwendungen, die für sich genommen mengenmäßig wenig, aber zusammen einen recht beachtlichen Verbrauchs- bzw. Emissionsposten bilden. Insgesamt konnten acht verschiedene Bereiche mit SF₆-Emissionsmengen zwischen 70 kg/a und 3100 kg/a identifiziert und abgeschätzt werden. Zusammen handelt es sich um Inlandsverbräuche von 5,2 t für 1990 und 5,8 t für 1995. Bei den inländischen Emissionen handelt es sich 1990 um 7 t, 1995 um 7,4 t und ab 2000 um 7,9 t (s. Tabelle 17).

Tab. 17: SF₆-Inlands-Verbrauch und -Emission in sonstigen Anwendungen in t/a						
	1990		1995		2000 ff.	
	Verbrauch	Emission	Verbrauch	Emission	Verbrauch	Emission
Teilchenbeschleuniger	2,9	2,9	2,9	2,9	3,1	3,1
Elektronenmikroskope	0,17	0,07	0,3	0,2	0,23	0,23
Röntgen-Materialtester	0,1	0,06	0,5	0,21	0,5	0,44
Röntgen-Therapiegeräte	0	0	0,07	0,07	0,1	0,1
Tracergas	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Flugzeugradar	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Aluminium-Reinigung	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Sondergebiete*	*	2,0	*	2,0	*	2,0
Summe	5,17**	7,03	5,77**	7,38	5,93**	7,87

* Wegen Vertraulichkeitszusage gegenüber einem Sportschuhhersteller keine Angabe zum inländischen Gesamtverbrauch dieses Sektors, da die Sportschuhe im Ausland ihre SF₆-Füllung erhalten.

** Die Verbrauchssumme gibt hier den Inlandsverbrauch nicht vollständig wieder, da die Sondergebiete incl. Sportschuhen fehlen.

Nachfolgend werden die acht "sonstigen Anwendungen" behandelt. Das Kapitel schließt mit Bemerkungen zu vermuteten, aber nicht verifizierten SF₆-Anwendungen.

6.1 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 Isoliertgas 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 leergepumpt 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 Größe der Geräte ist sehr unterschiedlich; 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 18 folgt den Angaben der Anlagenbetreiber. Nicht berücksichtigt wurden ein möglicher Zubau von Anlagen ab 1997 sowie Emissionen bei der Entsorgung von Altanlagen. Die Jahresemissionen liegen bei etwa 7,5 Prozent des Gesamtvolumens.

Der Verbrauch für Neuanlagen (ohne Verbrauch für Emissionsersatz) verläuft diskontinuierlich. Seit 1965 wurde im Durchschnitt alle 2 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 in den 90er Jahren um etwa 3 t auf nunmehr 41 t stieg.

Tab. 18: SF₆-Emissionen aus Teilchenbeschleunigern 1990-2000 ff. in t/a			
Jahr	1990	1995	2000 ff.
Bestand in t	38	39	41
Emissionen t/a	2,9	2,9	3,1

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

Beim Bestand ist künftig mit Konstanz, nicht mit Zuwachs zu rechnen. Darum bleiben auch die laufenden Emissionen langfristig auf einem Niveau von 3,1 t/a. Von Entsorgungsemissionen wird abgesehen, weil unterstellt wird, daß bei künftiger Anlagenverschrottung das abgesaugte SF₆ der Wiederverwendung zugeführt wird (Solvay 1996b).

6.2 Hochspannungs-Elektronenmikroskope

Bei einem kleinen Teil (< 10 Prozent) der in der Bundesrepublik installierten Durchstrahlungs-Elektronenmikroskope dient SF₆ zur Isolation von Hochspannungsgenerator und Emissionskammer (vgl. DGE 1995). 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 wird vom führenden inländischen Hersteller für 1995 auf etwa 60 Geräte geschätzt (Philips Industrial Electronics 1996a). 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 inländischen Geräten belief sich 1990 auf ca. 540 kg, 1995 auf 1080 kg.

Die Geräte haben eine Lebensdauer von 15 Jahren und weisen jährliche Leckagen von etwa 0,5 kg unabhängig vom Gerätetyp auf (Philips Industrial Electronics 1996b). 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 19 in Höhe von weiteren 0,5 kg pro Gerät einkalkuliert sind. Die Jahresemissionen (Nachfüllungen) betragen somit jährlich pro Gerät 1 kg, insgesamt 60 kg im Jahr 1995. 1990 waren es erst 30 kg, 2000 werden es 90 kg sein. Danach steigen sie nicht mehr an, weil ab dem Jahr 2000 mit einer Bestandssättigung gerechnet wird. Nicht berücksichtigt werden mögliche Emissionen bei der Entsorgung von Altgeräten, da SF₆-Rückgewinnung vorausgesetzt wird.

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 ent-

fallen. Davon gibt es bisher nur zwei. Eines besteht seit 1974 und enthält 390 kg SF₆ im Hochspannungs- und Vorratstank. Das zweite mit über 1200 kg Füllmenge wurde erst 1993 in Betrieb genommen. Der SF₆-Jahresverbrauch für Emissionsersatz wird vom Anwender der beiden Anlagen auf 40 kg für das kleinere und 100 kg für das größere Gerät kalkuliert (Max-Planck-Institut 1996). Die Gasbeladung erfolgte vor Ort bei der Montage, so daß Befüllungsemissionen vernachlässigt werden können, ebenso sind Entsorgungsverluste am Ende der Lebensdauer vermeidbar, wenn das SF₆-Rückgewinnungskonzept greift.

	1990	1995	2000 ff.
Kilo-Volt-Geräte	30	60	90
Mega-Volt-Geräte	40	140	140
Summe	70	200	230

Quellen: Philips Industrial Electronics 1996a, 1996b; Max-Planck-Inst. f. Metallforschung 1996.

Tabelle 19 stellt die laufenden Bestandsemissionen aus Kilo- und Mega-Volt-Geräten zusammen. Sie stiegen 1990-1995 von 70 auf 200 kg und werden sich wahrscheinlich bis zum Jahr 2000 auf dann konstante 230 kg erhöhen. Was den Jahresverbrauch (SF₆-Zufuhr) betrifft, so liegt er bis zum Jahr 2000 um die Neubefüllung von 6 Geräten im Kilo-Volt-Bereich mit zusammen 100 kg SF₆ über den Emissionen, betrug 1990 folglich 170 kg und 1995 300 kg. Ab 2000 decken sich Emissionen und Verbrauch, sofern rückgewonnenes Gas aus Altgeräten für Neubefüllungen zur Verfügung steht.

6.3 Röntgen-Materialuntersuchungsgeräte

Bei transportablen Röntgen-Materialuntersuchungsgeräten (Schweißnahtprüfungen u.ä.) wird SF₆ gegenüber der sonst üblichen Ölisolierung aus Gewichtsgründen bevorzugt. Der Bestand an entsprechenden Geräten (davon ca. 1/3 Importgeräte) hat seit Ende der 80er Jahre kontinuierlich zugenommen. Er wird von Herstellern (Philips Industrieröntgen 1996; Seifert & Co. 1996) wie folgt geschätzt: 1990 ca. 100 Geräte, 1995 ca. 500, 2000 ca. 800 Geräte. Der Jahresabsatz 1996 in Deutschland wird auf rd. 100 Geräte geschätzt. Bei einer Füllmenge von durchschnittlich 1,5 kg SF₆ ergibt sich ein SF₆-Bestand von 150 (1990), 750 (1995) bzw. 1200 kg (2000).

Der SF₆-Jahresbedarf der inländischen Hersteller für Neubefüllungen und Reparaturen, der 1990 noch bei 100 kg lag, stieg bis 1995 auf rd. 500 kg. Davon werden etwa 60 Prozent exportiert; ca. 200 kg wurden in Geräte abgefüllt, die in Deutschland verblieben. Die Abfüllmenge teilt sich in 2/3 für Neugeräte und etwa 1/3 für reparierte Geräte. Bei Reparatur und Verschrottung wird das SF₆ freigesetzt.

Zumindest ein großer Hersteller verzichtet ab 1997 auf SF₆ als Isoliergas (Philips Industrieröntgen). Damit wird der inländische SF₆-Jahresverbrauch zurückgehen. Die Lebensdauer der Geräte wird mit wenigstens 10 Jahren angegeben. Da SF₆-isolierte Geräte erst seit Ende der 80er Jahre auf dem Markt sind, spielen Verschrottungsemissionen erst ab 2000 eine Rolle (rd. 100 Stück/Jahr entsprechend 150 kg SF₆).

Emissionen treten bei Neubefüllung, Reparatur und Verschrottung der Geräte auf. Für eine Abschätzung der zukünftigen Emissionen wird eine Befüllungsemission von 15 Prozent, eine Reparaturquote von 20 Prozent und eine Verschrottungsrate von 100

Stück ab 2000 angenommen. Die geschätzten Emissionen von 1990 bis 2000 ff. sind in der Tabelle 20 eingetragen. Sie dürften sich nach 2000 bei 440 kg/a stabilisieren.

Tab. 20: Emissionen aus Röntgen-Materialuntersuchungsgeräten (Befüllung, Bestand und Verschrottung) 1990-2000 ff. in kg/a:			
Jahr	1990	1995	2000 ff.
Emissionen in kg/a	60	210	440

Quellen: Philips Industrieröntgen 1996; Seifert & Co. 1996.

6.4 Röntgen-Therapiegeräte (Linearbeschleuniger)

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

Da SF₆ als Isolatorgas erst seit 1992 genutzt wird (Philips Medical Systems 1996), ist der entsprechende Gerätebestand vorerst noch gering. Für 1995 kann von 140, für 2000 von 200 SF₆-isolierten Geräten mit einem Jahresverbrauch (= Jahresemission) von 70 bzw. 100 kg SF₆ ausgegangen werden.

Bei der später anstehenden Verschrottung der Altgeräte ist mit einer demgegenüber geringen Emission von 0,1 kg/Gerät zu rechnen, die hier nicht berücksichtigt wird.

Tab. 21: SF₆-Emissionen von Röntgen-Therapiegeräten 1990-2000 ff. in kg/a			
Jahr	1990	1995	2000 ff.
Emissionen kg/a	0	70	100

Quelle: Philips Medical Systems 1996; SF₆ wird hier erst seit 1992 eingesetzt.

6.5 SF₆ als Tracergas für die Untersuchung bodennaher und atmosphärischer Luftströmungen

Als stabiles und auch in extrem geringer Konzentration sehr 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).

Tab. 22: Emissionen von SF₆ als Tracergas 1990-2000 ff. in kg/a			
Jahr	1990	1995	2000 ff.
Emissionen kg/a	500	500	500

Quelle: Befragung Tracergas.

6.6 Flugzeugradar

SF₆ wird als Isolationsmedium in den großen militärischen Aufklärungsflugzeugen vom Typ AWACS in der Radarausrüstung eingesetzt. Es soll elektrische Überschlüge 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 nach Auskunft der Dasa in Ulm 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.

Die AWACS-Flotte der NATO wird von der Dornier Luftfahrt GmbH in Oberpfaffenhofen gewartet. Jährlich wird dafür SF₆ in einer Größenordnung von rd. 1000 kg als Emissionersatz verbraucht. Ob derartige Aufklärungsflugzeuge auch noch in 15 oder 20 Jahren fliegen werden, läßt sich heute nicht voraussagen. Die Prognose in der Tabelle 23 ist daher nur mit Einschränkungen zu betrachten.

Tab. 23: SF₆-Emissionen vom AWACS-Radar 1990-2000 ff. in kg/a

Jahr	1990	1995	2000 ff.
Emissionen kg/a	1000	1000	1000

Quelle: Dornier 1996; Befragung Gasehandel.

6.7 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 zwischen 1 und 2,5% zugesetzt ist. Unter der Marke "Aluclean" vertreibt AGA-Gas ein System aus Inertgasen und 2,5% SF₆-Zusatz (AGA-Gas 1996). Unter der Bezeichnung "Meltabron" bietet die Westfalen AG ein System aus Inertgasen mit 1% SF₆ sowie einem Anteil von elementarem Chlor zur Erhöhung der Wirksamkeit an (Westfalen AG 1996).

Die gesamte inländische SF₆-Menge für diesen Zweck wird von den beiden Gasehändlern auf maximal 500 kg/a geschätzt - bei konstanter, keineswegs steigender Marktentwicklung seit 1990.

Tab. 24: SF₆-Reinigungsgas von Aluminiumschmelzen 1990-2000 ff. in kg/a

Jahr	1990	1995	2000 ff.
Emissionen kg/a	500	500	500

Quelle: AGA-Gas 1996; Westfalen AG 1996.

6.8 Sondergebiete einschl. Füllgas in Sportschuhen

Die SF₆-Broschüre von Solvay aus dem Jahr 1992 führt unter der Rubrik "Sonstige Anwendungen" beispielhaft Sondereinsatzgebiete auf, die bei den Nachforschungen im Rahmen dieser Ausarbeitung nicht gefunden wurden, was aber ihre Existenz nicht aus-

schließt. Dazu gehören etwa Ermittlung der "Luftführung in Bergwerken" oder "Verweilzeitbestimmungen in schnell durchströmten Gefäßen" mittels SF₆ (Solvay 1992, 19). Die Recherchen stießen außerdem auf Kleinstverbraucher wie z.B. Massentrenner, Tscherenkow-Detektoren usw., deren exakte Erfassung nicht erfolgte, weil die eingesetzten Mengen marginal sind. Von Solvay ebenfalls nicht genannt, aber von der deutschen Verkaufsniederlassung der amerikanischen Mutterfirma mit der Bitte um Vertraulichkeit mitgeteilt wurden die SF₆-Mengen, die in Sohlen von Sportschuhen ("Air System") jährlich importiert werden (Nike 1996).

Werden die nichtidentifizierten, folglich nur geschätzten, SF₆-Mengen mit den der Discretion unterliegenden SF₆-Mengen zusammengefaßt, sind Gesamtemissionen von ca. 2 t SF₆ jährlich eine durchaus realistische Größe. Dabei ist zum Bereich der Schuhsohlenfüllung anzumerken, erstens daß dieser Sektor seit 1990 stetig expandiert, zweitens daß diese SF₆-Menge zwar im Inland emittiert, aber nicht Teil des Inlandsabsatzes (Verbrauch) von Gaseherstellern oder -lieferanten ist, da die Schuhe im Ausland gefertigt werden.

Tab. 25: SF₆-Emissionen aus Sondergebieten einschl. Sportschuhen in t/a

Jahr	1990	1995	2000 ff.
Emissionen t/a	2	2	2

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

6.9 Vermutete, aber nicht verifizierte SF₆-Anwendungen

Die Differenz zwischen den Angaben über den aufsummierten jährlichen inländischen Gesamtabsatz von Herstellern und Gasehandel (800 t SF₆ in 1995) und den Verbrauchsangaben der inländischen Anwender für das gleiche Jahr (792 t SF₆) von ca. 8 t war Anlaß, nach weiteren Anwendungen von SF₆ zu suchen. Diese Recherchen ergaben keine weiteren nennenswerten Einsatzgebiete:

6.9.1 Laser

Fluor wird zwar in diversen Excimer-Lasern noch als Beigabe eingesetzt, SF₆ aber nicht. In den 80er Jahren hatte es tatsächlich Versuche zwischen dem Fraunhofer Institut Lasertechnik (ILT) in Aachen und Messer Griesheim gegeben, mit SF₆ die Elektronen, die beim Auftreffen des Laserstrahls entstehen, wegzufangen. Doch der damalige Versuchsleiter Prof. Reinhart Poprawe garantiert, daß heute in der gesamten Lasertechnik kein SF₆ angewandt wird (Roprawe 1996).

6.9.2 Tennisbälle

Zwar experimentiert der einzige deutsche Hersteller von Tennisbällen, die Dunlopillo-Slazenger GmbH in Hanau seit Jahren mit einer 50%-igen SF₆-Füllung statt Luft, um druckstabile Bälle zu erzeugen, die die jetzige luftdichte und druckstabile Verpackung überflüssig machen. Dabei soll derselbe Effekt genutzt werden, der der erhöhten Druckkonstanz von SF₆-gefüllten Autoreifen zugrundeliegt. Dennoch ist es bis heute bei Versuchen geblieben (Dunlopillo 1996). Eine Überschlagsrechnung des Herstellers ergibt: Würden 100% der Tennisbälle zu 50% mit SF₆ gefüllt, entstünde ein SF₆-Mehrbedarf von 2 Tonnen pro Jahr.

6.9.3 Lecksuche-Gas

Obwohl die SF₆-Broschüre von Solvay (Solvay 1992) diese Anwendung nennt, stießen die Nachforschungen im Rahmen vorliegender Studie bei potentiellen Anwendern immer nur auf Helium als Lecksuchegas an Kesseln, Rohrleitungen usw. Als Grund wurde stets der günstigere Preis genannt. Es ist allerdings nicht auszuschließen, daß SF₆ zur Anwendung kommt.

6.10 Beitrag zum Treibhauseffekt

Werden die jährlichen Emissionsmengen aus den acht sonstigen Anwendungen mit dem GWP-Wert von SF₆ (Zeithorizont: 100 Jahre) multipliziert, ergibt sich der Beitrag zum Treibhauseffekt durch die Emissionen aus diesen Bereichen. Er liegt lt. Tabelle 26 im Bereich zwischen 167 Tsd. und 193 Tsd. Tonnen CO₂-Äquivalente.

Tab. 26: Beitrag zum Treibhauseffekt durch SF₆-Emissionen sonstiger Bereiche in Tsd. Tonnen CO₂-Äquivalente					
<i>GWP 23900</i>	<i>1990</i>	<i>1995</i>	<i>2000</i>	<i>2005</i>	<i>2010 ff.</i>
Emissionen in t	7	7,4	7,9	8	8
Tsd. t CO ₂ Äqui.	167,3	176,9	188,8	191,2	191,2

Nachweise zu 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 Schaltanlagen GmbH, Mannheim (Hrsg.), Schaltanlagen, 9., neubearbeitete Auflage, Mannheim 1992;
- ABB Calor Emag Schaltanlagen AG, Mannheim, Fachgespräch mit B. Zahn (Marketing- und Produktmanager), Werk Großauheim, 17.4.1996a;
- ABB Calor Emag Schaltanlagen AG: Referenzliste SF₆-gasisolierte Schaltanlagen Typ ELK-O, Mannheim und Ratingen 1996b;
- AGA-Gas GmbH, Hamburg, pers. Mitt. 9.10.1996;
- Ausimont (Deutschland) GmbH, Fachgespräch mit N. Jäger (Verkauf Fluorprodukte und Chemikalien) und G. Grunert (Verkauf Fluorprodukte), Eschborn 16.4.1996;
- Befragung Gasehandel: Schätzung des Markts für Reifengas 1990 bis 2000 durch:
- Air Products GmbH, Hattingen, 29.5.1996;
 - AGA Gas GmbH, Hamburg, 30.4.1996;
 - Chemogas GmbH, Bochum, 21.5.1996;
 - Linde AG, Höllriegelskreuth, 29.4.1996;
 - Messer-Griesheim GmbH, Krefeld, 22.4.1996;
 - Westfalen AG, Münster, 17.10.1996;
- Befragung Magnesium: Telefonische Befragung der 13 größten Magnesiumgießereien im Zeitraum 10.10.-17.10.1996, nämlich:
- ALUMETALL GmbH, Nürnberg; C&C Bark Metallguß, Schömberg; Bayerisches Druckguß-Werk, Markt Schwaben; Dietz-metall GmbH, Unterensingen; Eifelwerk Heinrich Stein, Eichelhardt; Laukötter GmbH, Wadersloh; Leibfried Mahle Metallwerk GmbH, Fellbach; Metallbearbeitung Friedrichshafen, Friedrichshafen; MST Automotive GmbH, Aschaffenburg Petri AG, Aschaffenburg; W.Schenk GmbH Leichtgußwerke, Maulbronn; Schweizer & Weichand GmbH, Murrhardt; Andreas Stahl, Prüm-Weinsheim; Paul Zitzmann GmbH, Stockheim;
- Befragung Schallschutzglas: Schriftliche, direkte und telefonische Befragung zu quantitativen und qualitativen Aspekten des Schallschutzes mit SF₆ bei
1. Scheibenherstellern:
 - Flachglas AG, Gelsenkirchen, 6.5.1996;
 - VEGLA Vereinigte Glaswerke GmbH, Aachen, 15.4. u. 2.5.1996;
 - Sanco Glas GmbH & Co KG, Nördlingen, 15.5.1996;
 - Isolar Glas-Beratung GmbH, Kirchberg, 2.5.1996, 3.7.1996;
 - Interpane Glasgesellschaft mbH, Plattling, 28.5.1996;
 2. Herstellern von Scheiben-Füllgeräten:
 - DCL Glas Consult GmbH, Sauerlach, 22.5.1996;
 - Ratiotechnik GmbH & Co KG, Braunschweig, 3.9.1996;
 - Lenhardt Maschinenbau GmbH, Neuhausen, 23.5.1996;
- Befragung Teilchenbeschleuniger: Schriftliche und mündliche Befragung im Zeitraum 2.5.-4.6.1996 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, 20.6.1996;
 - Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz, 21.6.1996;
 - FZ Jülich, Abteilung Sicherheit und Strahlenschutz, 20.6.1996;

- TÜV Südwest, Stuttgart, 21.6.1996;
Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 19.6.1996;
Universität Gießen, Geographisches Institut, 19.6.1996;
Befragung Wandler und Trafos: Schriftliche Befragung der Herstellerfirmen:
Haefely Trench MWB GmbH, Bamberg, 13.6.1996;
Ritz Meßwandlerbau GmbH, Hamburg, 14.6.1996;
AEG-Schorch-Transformatorenwerke GmbH, Mönchengladbach, 4.6.1996.
Boeck, W., Isolationssysteme metallgekapselter SF₆-isolierter Schaltanlagen, in: ETG-Fachbericht 34 "Gasisolierte Schaltanlagen im Mittel- und Hochspannungsnetz", Berlin und Offenbach 1991, 7-39;
BRV = Bundesverband Reifenhandel und Vulkaniseurhandwerk e.V., Köln, "Eklatantes Sicherheitsrisiko: Drei Viertel der deutschen Autofahrer sind mit falschem Reifendruck unterwegs", Presseinformation Februar 1996;
Clow, B. B., Garber, F., Magnesium auf neuen Wegen, in: Metall, 45. Jg., Heft 6, Juni 1991, 599-601;
Continental AG, Hannover, pers. Mitt. 27.3., 10.9., 1.10.1996a;
Continental AG, Hannover, Schreiben an Öko-Recherche vom 21.10.1996b;
Continental AG: ContiAIRSAFE-Informationsblatt o. J.;
Daimler Benz Aerospace AG Dasa, Ulm, pers. Mitt. 11.10.1996;
DCL Glas Consult GmbH, Sauerlach, pers. Mitt. 22.5.1996;
Derner, P., Schalldämm-Isolierglas, in: Funktions-Isoliergläser: moderne Verglasungen für Fenster und Fassaden, Hg. H.J.Gläser, Ehningen 1992, 45-82;
DGE = Dt. Ges. f. Elektronenmikroskopie, Verzeichnis elektronenmikroskopischer Einrichtungen in Deutschland, Österreich und der Schweiz, Stuttgart 1995;
DIN 1286, Teil 2, Mehrscheiben-Isolierglas gasgefüllt. Zeitstandsverhalten, Grenzabweichungen des Gasvolumenanteils, Mai 1989;
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;
Flachglas AG, Fachgespräch mit A. Wildner (Leiter Corporate Center Marketing) u. N. Wruk (Leiter des Bereichs Forschung und Entwicklung), Gelsenkirchen, 6.5.1996a;
Flachglas AG, Gelsenkirchen, pers. Mitt. 14.4.1996b;
Frech Engineering GmbH & Co, Schorndorf, pers. Mitt. 8.10.1996;
GDM = Gesamtverband Deutscher Metallgießereien, Düsseldorf, Geschäftsbericht 1995, Düsseldorf 1996;
GEC Alsthom Sprecher Concordia GmbH, Filderstadt, pers. Mitt. 3.8.1996;
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;
Gmelins Handbuch der Anorganischen Chemie, S, Ergänzungsband 2, Schwefelhalogenide, Berlin 1978, 3-218;
Günther, I., Ein Superleichtgewicht unter den Metallen soll zum Stoff der Zukunft werden, in: Frankfurter Rundschau, 13.7.1996, 9;
Heiß, W., Hartmann, E., Holmann, F., Lekies, R., Niegl, M., Betriebserfahrungen mit gasisolierten Mittelspannungs-Schaltanlagen, in: ETG-Fachbericht 34 "Gasiso-

- lierte Schaltanlagen im Mittel- und Hochspannungsnetz", Berlin und Offenbach 1991, 149-195;
- 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 v. 17.6.1996;
- IPCC = Intergovernmental Panel on Climate Change, Second Assessment Report: Climate Change 1995, Cambridge University Press, Cambridge 1995;
- Jahrbuch 1996 Bergbau, Erdöl und Erdgas, Petrochemie, Elektrizität, Umweltschutz, Verlag Glückauf, Essen 1996;
- Knies, W., Schierack, K., Elektrische Anlagentechnik. Kraftwerke, Netze, Schaltanlagen, Schutzrichtungen, München und Wien 1991;
- Ko, M.K.W., Sze, N.D., Wang, W.-C., Shia, G., Goldman, A., Murcay, F.J., Murcay D.G., Rinsland, C.P., Atmospheric Sulfur Hexafluoride: Sources, Sinks and Greenhouse Warming, in: Journal of Geophysical Research, Vol. 98, No. D6, 10499-10507, June 20, 1993;
- König, D., Umgang mit SF₆ in gasisolierten Schaltanlagen und Schaltgeräten, Teil 1: Internationale Arbeiten, in: ETG-Fachbericht 40 "Isolierte Systeme der elektrischen Energietechnik - Lebensdauer, Diagnostik und Entwicklungstendenzen", Berlin und Offenbach 1992, 255-265;
- Lenhardt Maschinenbau GmbH, Neuhausen, pers. Mitt. 23.5.1996;
- Lufthansa Räderwerkstatt, Frankfurt, pers. Mitt. 4.7.1996;
- Magers, D., Einsatzmöglichkeiten von Magnesium im Automobilbau, in: Leichtmetalle im Automobilbau 95/96, Sonderausgabe ATZ und MTZ 1995, 10-13;
- Max-Planck-Institut für Metallforschung, Stuttgart, Schreiben vom 20.5.1996;
- Metallstatistik 1983-1993 der Metallgesellschaft AG, 81. Jahrgang, Frankfurt 1994;
- Miebach GmbH & Co, Dortmund, pers. Mitt. 22.4.1996;
- Montangesellschaft, Köln, pers. Mitt. 17.10.1996;
- Mosch, W., Hochspannungsisolierungen mit Schwefelhexafluorid (SF₆), Heidelberg 1979;
- Neumann, C., Umgang mit SF₆ aus Sicht eines Betreibers von gasisolierten Schaltanlagen und -geräten, Teil 2, in: ETG-Fachbericht 40 "Isolierte Systeme der elektrischen Energietechnik - Lebensdauer, Diagnostik und Entwicklungstendenzen", Berlin und Offenbach 1992, 267-276;
- Nike International, Niederlassung Deutschland, Weiterstadt, Schreiben v. 7.5.1996;
- NuPECC Handbook 1995, 3rd ed., Strasbourg 1995;
- Philips Industrial Electronics Deutschland GmbH, Kassel, Schreiben vom 30.5.1996a;
- Philips Industrial Electronics Deutschland GmbH, Kassel, pers. Mitt. 21.5.1996b;
- Philips Industrieröntgen, Hamburg, pers. Mitt. 3.5.1996;
- Philips Medical Systems, Hamburg, Schreiben vom 15.5.1996;
- 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;
- Ratiotechnik GmbH & Co KG, Braunschweig, pers. Mitt. 3.9.1996;
- Rauch Fertigungstechnik GmbH, Gmunden in Österreich, pers. Mitt. 14.10.1996;
- Reiling Glas Recycling GmbH, Marienfeld, pers. Mitt. 5.9.1996;

- Schlott, S., Magnesium macht's den Konstrukteuren leicht, in: VDI nachrichten, Nr. 2, 13.1.1995, 13;
- Schmitz, W., SF₆-Gas im Schaltanlagenbau - Problemlösung für Isolierung und Lichtbogenlöschung, Sonderdruck der BBC Mannheim aus ETZ-B, Heft 6/72;
- Schötz, H., SF₆-Transformatoren - Alternativen der Zukunft, in: Elektrizitätswirtschaft, Jg.94 (1995), Heft 19, 1213-1222;
- Seifert Rich. & Co. KG Röntgenwerk, Ahrensburg, pers. Mitt. 13.6.1996;
- 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, pers. Mitt., 7.10.; Erlangen, pers. Mitt. 22.4.1996a;
- Solvay Fluor und Derivate GmbH: Schwefelhexafluorid, Hannover 1992;
- Solvay Fluor und Derivate GmbH, Fachgespräch mit B. Wilkes (Leiter Produktions-Koordination), M. Ruhland (Ökologie), H. Bräutigam, H. Bruhns (Leiter Verkauf Fluorspezialitäten), Hannover 23.4.1996a;
- Solvay Fluor und Derivate GmbH, Konzept zur Wiederverwendung von genutztem SF₆-Gas. Ein Beitrag zur Wirtschaftlichkeit durch Umweltschutz, Firmenschrift Hannover 1996b;
- Steinhäuser, Th., Universität Duisburg, Fachbereich 8, pers. Mitt. 8.10.1996;
- Stihl Magnesium Druckguß, Prüm-Weinsheim, pers. Mitt. 22.4.1996;
- Stinnes Reifendienst, Kaiserslautern, pers. Mitt. 22.5.1996;
- Unilux AG, Salmtal, pers. Mitt. 5.6.1996;
- VDEW, Empfehlungen für Planung, Bau und Betrieb von gasisolierten metallgekapselten Schaltanlagen 123 kV, Frankfurt, 1. Ausgabe 1993;
- VDEW, Gasisolierte metallgekapselte Leistungsschalteranlagen bis 36 kV. Betriebliche Anforderungen für Projektierung, Bau und Betrieb im EVU, Frankfurt, 1. Ausgabe 1994;
- VDEW, Störungs- und Schadensstatistik 1992 und 1993. Bundesrepublik Deutschland gesamt. Ergebnisse für die Hochspannungsnetze der Bundesrepublik Deutschland, hrsg. von der Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke VDEW e.V., Frankfurt 1996a;
- VDEW, Umfrage zum Thema SF₆ in Betriebsmitteln der elektrischen Energieversorgung. Eingesetzte Gesamtmenge und jährliche Nachfüllmengen (Manuskript-Druck), Frankfurt, August 1996b;
- VDEW/ZVEI, Erklärung zur Verwendung von SF₆ im Bereich elektrischer Schaltgeräte und -anlagen in Deutschland, Frankfurt 1996;
- VEGLA, Fachgespräch mit J. Grönegräs (Produktmanager Isolierglas) und N. Lüling (Produktentwicklung Verbundglas), Aachen, 15.4.1996;
- Verband der Fenster- und Fassadenhersteller e.V., Frankfurt, pers. Mitt. 19.6.1996;
- Westfalen AG, Münster, pers. Mitt. 17.10.1996;
- Westofen GmbH, Mainz-Kastel, pers. Mitt. 31.10.1996;
- Zenger, A., Rühling, A., Bächlin, W., Lohmeyer, A.: Tracergasuntersuchungen zur naturgetreuen Simulation von atmosphärischen Transport- und Mischungsvorgängen im Rahmen von Umweltverträglichkeitsprüfungen, in: Staub - Reinhaltung der Luft 54 (1994), 51-54;
- ZVEI Fachverband 6 (Schaltgeräte, Schaltanlagen, Industriesteuerung): Umfrage zum SF₆-Verbrauch bei den Mitgliedsfirmen, Frankfurt 1996.

II. Perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe CF₄ und C₂F₆

Überblick

Die für die globale Erwärmung wichtigsten Spurengase aus der Gruppe der perfluorierten Fluorkohlenwasserstoffe (PFC) sind CF₄ und C₂F₆. Für CF₄ hat die jüngere Forschung außer anthropogenen auch natürliche Quellen identifiziert (Harnisch u.a. 1996). Letztere sind demnach für etwa die Hälfte der gemessenen aktuellen atmosphärischen Konzentration verantwortlich. Die seit Mitte der 30er Jahre dieses Jahrhunderts einsetzende Zunahme der globalen atmosphärischen CF₄-Konzentration über die (an jahrzehntelang abgeschlossener Luft gemessene) natürliche Hintergrundkonzentration hinaus korreliert mit dem weltweiten Anstieg der Produktion von Primäraluminium (Harnisch 1996a). Letztere gilt als Hauptquelle der anthropogenen Emissionen von CF₄ und von C₂F₆.⁴ Die Gase werden hierbei nicht gezielt eingesetzt, sondern entstehen als Nebenprodukte der elektrolytischen Reduktion von Aluminiumoxid zu Aluminium.

Rückgang der inländischen Emissionen

Die Aluminiumverhüttung ist auch in Deutschland mit einem Anteil von ca. 95% an den CF₄- und C₂F₆-Emissionen der mit Abstand größte Einzelverursacher. Wie Tabelle 27 zeigt, spielen Emissionen aus der Elektronik, wo die Gase gezielt zum Plasmaätzen eingesetzt werden, nur eine marginale Rolle. CF₄-Emissionen als Nebenprodukt der FCKW-Produktion gibt es seit 1994 nicht mehr. Zwar werden auch höherfluorierte PFC angeboten: C₃F₈ in Kältemittelgemischen für den FCKW-Ersatz (Rhône-Poulenc o.J.) oder C₃F₈ und C₄F₁₀ als Feuerlöschmittel (3M). Sie spielen aber bislang keine nennenswerte Rolle, wohl deshalb, weil es ausreichend Alternativen gibt. C₃F₈ kommt auch als Ätzwasser für die Halbleiterfertigung infrage. Sein Einsatz wäre ökologisch nicht folgen-schwer. Erstens ginge er auf Kosten von C₂F₆ (Linde Technische Gase 1996); zweitens würde das Gas in den Abgasreinigungssystemen der Halbleiterindustrie weitestgehend zersetzt (vgl. Kap. IV).

Tab. 27: Emissionen von CF₄ und C₂F₆ 1990-2000 ff. nach Herkunft in Tonnen pro Jahr					
Herkunft	PFC	1990	1995	2000	2005 ff.
1. Aluminiumhütten	CF ₄	335	209	100	100
2. Halbleiterindustrie	CF ₄	6,8	4,5	1,6	0,8
3. Leiterplattenfertigung	CF ₄	3,4	4,3	4,3	4,3
4. Chem. Nebenreaktion	CF ₄	10	0	0	0
Summe CF₄		355,2	217,8	105,9	105,1
5. Aluminiumhütten	C ₂ F ₆	33,5	20,9	10	10
6. Halbleiterindustrie	C ₂ F ₆	8,4	6,4	2,5	0,8
Summe C₂F₆		41,9	27,3	12,5	10,8

Tabelle 27 und Diagramm 15 zeigen, daß die inländischen PFC-Emissionen zwischen 1990 und dem Jahr 2000 deutlich zurückgehen. Die pro Jahr emittierte CF₄-Menge

⁴ Um eine weitere Größenordnung geringer sind die Emissionen von C₃F₈ aus Aluminiumhütten, die kürzlich auf 0,3% beziffert wurden, bezogen auf das emittierte CF₄ (Harnisch 1996b, 58). In dieser Ausarbeitung wird C₃F₈ aus Aluminiumhütten nicht berücksichtigt.

sinkt innerhalb eines Jahrzehnts von ca. 355 auf ca. 105 t, die C₂F₆-Emissionen gehen von knapp 42 auf knapp 11 Tonnen zurück.

Gegenüber dem Ausgangsjahr 1990 betragen die CF₄-Emissionen im Jahr 2000 nur noch knapp 30%, die C₂F₆-Emissionen sogar nur noch 26%. Der Hauptgrund für diese Entwicklung sind Kapazitätsabbau und Modernisierungsmaßnahmen in der Aluminiumindustrie. Da das Modernisierungspotential der inländischen Aluminiumelektrolysen aus gegenwärtiger Sicht ab dem Jahr 2000 weitgehend ausgeschöpft sein wird, sind nach 2000 keine so spektakulären Verminderungen der inländischen PFC-Emissionen wie in den Jahren davor mehr zu erwarten. Darum dürften sich die Emissionen - in Abhängigkeit vom Produktionsvolumen - mittelfristig bei 100 bzw. 10 t pro Jahr für CF₄ bzw. C₂F₆ stabilisieren.

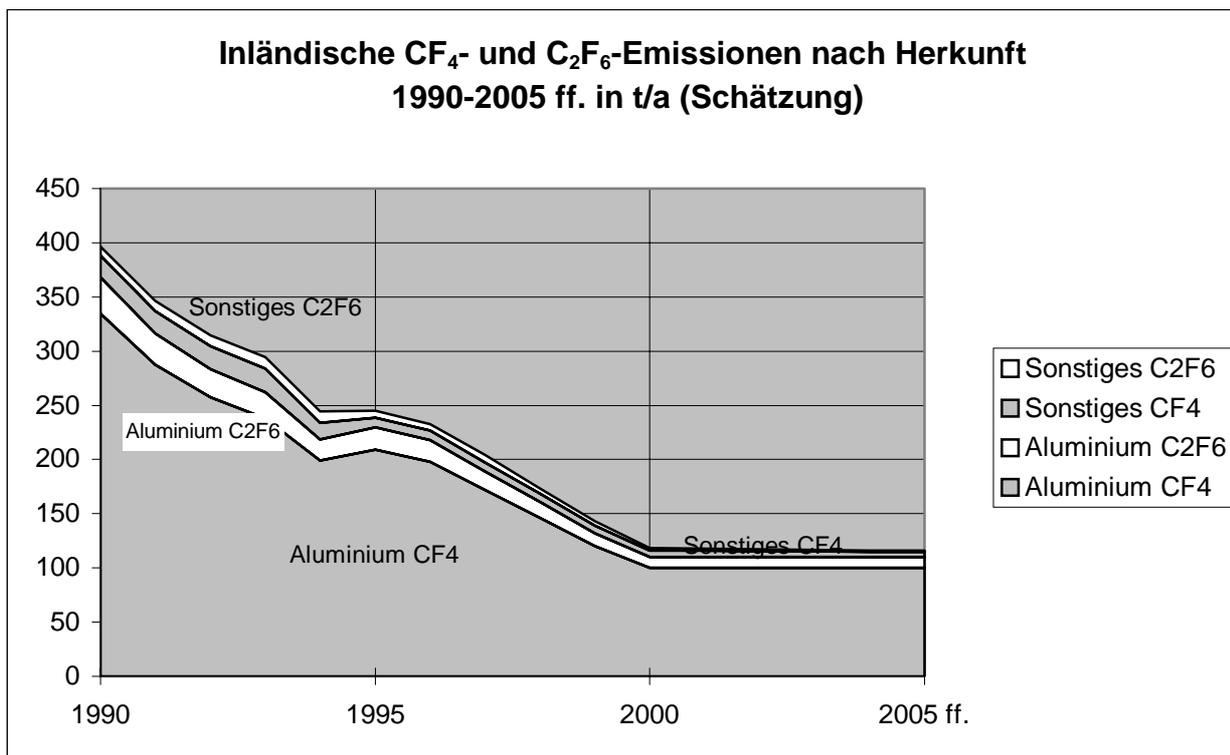


Diagramm 15: Inländische PFC-Emissionen von 1990 bis 2005 ff. in Tonnen pro Jahr. Die Entwicklung ist zu über 95% von der Aluminiumindustrie bestimmt. Ihre jährlichen CF₄-Emissionen sinken gegenüber 1990 bis zum Jahr 2000 von 335 auf ca. 100 t, ihre C₂F₆-Emissionen von knapp 34 auf 10 t. Gründe für den deutlichen Rückgang sind Kapazitätsabbau und vor allem Modernisierungsmaßnahmen in der Aluminiumverhüttung.

Sinkender Beitrag zum Treibhauseffekt

Werden die PFC-Emissionen mit ihrem spezifischen GWP (Zeithorizont: 100 Jahre) gewichtet und in CO₂-Äquivalente umgerechnet (s. Tabelle 28 und Diagramm 16), ist zu erkennen, daß der Beitrag zum Treibhauseffekt durch die Summe der PFC-Emissionen zwischen 1990 und 2005 ff. deutlich sinkt. Er geht von 2,69 auf 0,78 Mio. t CO₂-Äquivalente zurück oder um etwa 71%.

Tab. 28: Beitrag zum Treibhauseffekt durch Emissionen von CF₄ und C₂F₆ von 1990 bis 2005 ff. in Mio. t CO₂-Äquivalente				
	1990	1995	2000	2005 ff.
CF₄ (GWP: 6500)				
Emissionen in t	355,2	223,8	105,9	105,1
Mio. t CO ₂ -Äquivalente	2,31	1,45	0,69	0,68
C₂F₆ (GWP: 9200)				
Emissionen in t	41,9	27,9	12,5	10,8
Mio. t CO ₂ -Äquivalente	0,39	0,26	0,12	0,10
CF₄ + C₂F₆				
Mio. t CO ₂ -Äquivalente	2,69	1,71	0,80	0,78

Quellen: Tabelle 27, Summenzeilen CF₄ und C₂F₆; GWPs aus IPCC 1995.

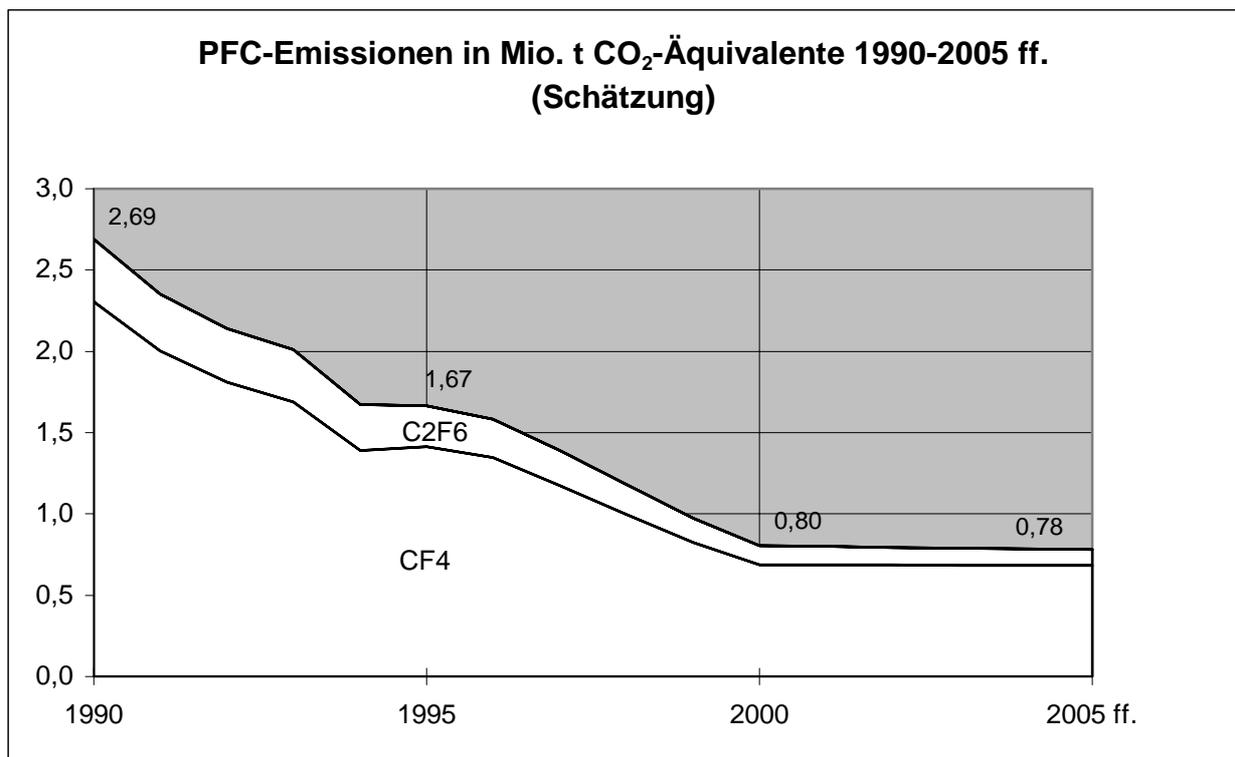


Diagramm 16: Jährliche PFC-Emissionen in Mio. t CO₂-Äquivalente 1990 bis 2005 ff. Zwischen 1990 und 2005 ff. geht der Beitrag zum Treibhauseffekt durch CF₄- und C₂F₆-Emissionen von 2,69 auf 0,78 Mio. t CO₂-Äquivalente zurück.

Anhang

Die Jahre 1990 bis 1995

Tabelle 28a und 28b dienen der Vervollständigung der Emissionsdaten für die einzelnen Jahre zwischen 1990 und 1995. Aus den Werten ist erkennbar, daß im ersten Jahrfünft der neunziger Jahre bereits die Hälfte der bis zum Jahr 2000 erwarteten Emissionsminderung realisiert worden ist - nach Tonnage und Beitrag zum Treibhauseffekt.

Tab. 28a: Inländische CF₄-und C₂F₆-Emissionen nach Herkunft 1990-1995 (Schätzung)						
CF₄						
<i>Herkunft</i>	1990	1991	1992	1993	1994	1995
1. Aluminiumhütten	335	287	257	238	199	209
2. Halbleiterindustrie	6,8	7,1	7,5	7,8	7,8	4,5
3. Leiterplattenfertigung	3,4	3,6	3,8	4,0	4,3	4,3
4. Chem. Nebenreaktion	10	10	10	10	3	-
Summe CF₄	355,2	307,7	278,3	259,8	214,1	217,6
C₂F₆						
	1990	1991	1992	1993	1994	1995
5. Aluminiumhütten	33,5	28,7	25,7	23,8	19,9	20,9
6. Halbleiterindustrie	8,4	9,2	10,1	10,9	10,9	6,4
Summe C₂F₆	41,9	37,9	35,8	34,7	30,8	27,3

Tab. 28b: Beitrag zum Treibhauseffekt durch CF₄-und C₂F₆-Emissionen in Mio. t CO₂-Äquivalente 1990-1995 (Schätzung)						
CF₄						
<i>GWP: 6500</i>	1990	1991	1992	1993	1994	1995
1. Aluminiumhütten	2,18	1,87	1,67	1,55	1,29	1,36
2. Halbleiterindustrie	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03
3. Leiterplattenfertigung	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
4. Chem. Nebenreaktion	0,07	0,07	0,07	0,07	0,02	-
Summe CF₄	2,31	2,00	1,81	1,69	1,39	1,42
C₂F₆						
<i>GWP: 9200</i>	1990	1991	1992	1993	1994	1995
5. Aluminiumhütten	0,31	0,28	0,24	0,22	0,18	0,19
6. Halbleiterindustrie	0,08	0,08	0,09	0,10	0,10	0,06
Summe C₂F₆	0,39	0,36	0,33	0,32	0,28	0,25

1. CF₄ und C₂F₆ aus der Aluminiumelektrolyse

Die Hauptquelle für Emissionen von CF₄ und C₂F₆ ist die Aluminiumverhüttung. 1990 wurden aus dieser Quelle 335 bzw. 33,5 t freigesetzt. Durch Kapazitätsabbau und Modernisierung der Elektrolyseöfen wurden die Emissionen bis 1996 allerdings auf 198 bzw. 19,8 t gesenkt; sie dürften sich ab dem Jahr 2000 bei 100 bzw. 10 t stabilisieren. Das ist innerhalb von zehn Jahren eine Verminderung auf weniger als ein Drittel des 1990er Ausgangswertes. Die Emissionen sind keine Folge einer gezielten Anwendung der Gase im Produktionsprozeß, sondern entstehen als Nebeneffekt der Reduktion von Aluminiumoxid (Tonerde) zu Aluminium.

1.1 Die Aluminium-Elektrolyse

Elektrolyse in wäßriger Lösung ist nicht möglich, weil Wasserstoff elektrochemisch edler als Aluminium ist (zur Technik der Aluminium-Elektrolyse siehe generell Grjotheim/Kvande 1993). Seit über hundert Jahren dient als Lösungsmittel eine Mischung, die hauptsächlich aus geschmolzenem Kryolith (chemisch: Na₃AlF₆) besteht. Dieser bewirkt, daß das in ihm gelöste Aluminiumoxid nicht erst jenseits 2050 °C schmilzt, sondern bereits bei 940 bis 970 °C.

In einer Aluminiumhütte sind üblicherweise zwischen 150 und 500 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.

Eine typische Elektrolysezelle besteht aus einer 9 bis 12 Meter langen, 3 bis 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. Die Anode oder der sog. Anodentisch besteht aus 14 bis 24 großformatigen Kohleblöcken, die in zwei Reihen an stromführenden Stangen in das ca. 20 cm tiefe Elektrolytbad ragen. Der Elektrolyt enthält außer dem Kryolith und weiteren Fluorsalz-Additiven (zur Senkung der Schmelztemperatur) die Tonerde in einer Konzentration zwischen 1,5 bis 5 Gewichtsprozent. Der von der Anode ausgehende Stromfluß bewirkt die eigentliche Elektrolyse der Tonerde, nämlich die Abscheidung des Aluminiums an der Kathode und des Sauerstoffs an der Anode. Das flüssige Metall ist bei einer Arbeitstemperatur von 940-970°C spezifisch schwerer als die Schmelze und sammelt sich am Boden zu einem "Metallbad" von bis zu 20 cm Höhe, von wo es regelmäßig entnommen wird.

An der Anode entläßt sich der Sauerstoff als Gas und reagiert (verbrennt) mit dem Anodenkohlenstoff zu CO₂. Ein einzelner Anodenblock ist - im Falle von vorgebackenen Anoden - innerhalb von 3 bis 4 Wochen verbraucht und muß ausgetauscht werden.

An der Oberseite des Bades und um die Anodenblöcke herum bildet sich eine feste Kruste aus erstarrtem Elektrolyt. Darüber liegt noch eine Schicht aus Tonerdepulver. Diese bis zu 10 cm dicke Kruste schützt das Bad vor Wärmeverlusten und Verdampfungsemissionen und bewahrt den nicht vom Bad benetzten Teil der glühenden Anode vor Oxidation mit der Luft. Der Nachteil der Kruste: Sie muß bei jeder Nachdosierung von Tonerde mechanisch aufgebrochen werden und führt, da Teile der aufgebrochenen Kruste ins Bad fallen, zu Schwankungen in der Bad-Konzentration. Die feste Kruste löst

sich im Bad langsamer als die pulverförmige Tonerde-Zugabe. Dadurch kann sie sich als Schlamm auf dem Boden des Metallbades ansammeln, denn sie ist spezifisch schwerer als Flüssigaluminium. Der Schlamm kann sich wieder auflösen, aber er kann u.U. eine bleibende feste Schicht bilden, die den Stromdurchgang hemmt und somit die Stromausbeute erniedrigt.

1.2 Der Anodeneffekt

Zur Verbindung von Kohlenstoff mit Fluor und damit zu CF₄ und C₂F₆ kommt es bei normal verlaufender Elektrolyse nicht (Tabereaux 1994, 30-34), da die Fluoridschmelze nur Flußmittel ist und an sich weder an der Kathoden- noch an der Anodenreaktion teilnimmt. Zwar bilden sich durch Badverdampfung ständig fluorhaltige Abgase aus gasförmigem Fluorwasserstoff und aus staubförmigen Fluorsalzen (Ullmann 1972, 262-264). Zu organischen Fluoriden kommt es jedoch nur unter besonderen Bedingungen, wengleich diese in Intervallen von Stunden bis zu mehreren Tagen am Ofen immer wieder eintreten. Diese Bedingungen werden als Anodeneffekt bezeichnet.

Der Anodeneffekt tritt bei der Aluminiumelektrolyse ein, wenn der Oxid-Gehalt im Elektrolyten unter eine Minimalkonzentration von ca. 1,5% absinkt (Grijotheim/Kvande 1993, 210). An sich sollte die Nachdosierung von Tonerde im Maße ihres Verbrauchs erfolgen. Doch ist dies nicht so einfach, da das Oxid wegen der Gefahr der Schlammbildung durch ungelöste Tonerde nicht überdosiert werden darf.

Der Anodeneffekt ist durch einen starken Spannungsanstieg gekennzeichnet. Die Gasblasen unter den Anodenblöcken werden immer größer und der eingetauchte Teil der Anodenblöcke wird schließlich nicht mehr vom Bad benetzt, sondern von einer isolierenden Gasschicht umhüllt. Dadurch erhöht sich der elektrische Widerstand an der Schnittstelle Anode/Bad, was wegen der Konstanz der Stromstärke einen sprunghaften Spannungsanstieg verursacht ($U = I \times R$). Aus 5 Volt Normalwert werden 30-40 Volt (Tabereaux 1996). Die hohe Spannung in Verbindung mit vielen kleinen - die isolierende Gashülle durchschlagenden - Lichtbögen und Funken zwischen Anodenboden und Bad reicht aus, um aus dem Elektrolyten Fluor freizusetzen, das mit dem Kohlenstoff der Anodenblöcke zu den Gasen CF₄ und C₂F₆ reagiert (Ullmann 1985, 469). Das Gas an der Anode ändert seine Zusammensetzung von CO₂ zu CO und zu 5 bis 20% CF₄ (Grijotheim/Kvande 1993, 210). Außerdem entsteht C₂F₆ im Umfang von ca. 10% der CF₄-Menge (Gibbs/Jacobs 1996, 34).⁵ Der Anodeneffekt mit der Bildung von CF₄ hält an, solange das Anodengas als stabiler Film unter dem Anodentisch bleibt.

1.3 Umgang mit dem Anodeneffekt früher und heute

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 entfernt werden (Ullmann 1985, 469). Das geschieht bei modernen Öfen automatisch durch Hub-, Senk- und Schrägbewegungen des Anodentisches. Die Dauer eines Anodeneffekts beträgt in der Regel zwischen zwei und vier Minuten. Nur in Ausnahmen muß heute, was früher die Regel war, manuell

⁵ CF₄ wird während der ganzen - 2-4-minütigen - Dauer eines Anodeneffektes gebildet. Dagegen entsteht C₂F₆ nur während der ersten Minute, und zwar bis zu einer maximalen Konzentration von 1-2% der Gasschicht (Tabereaux 1996).

eingegriffen werden. Meist wird eine Stange aus frischem Holz kurz in das Bad getaucht, was so starke Turbulenzen erzeugt, daß sich die Gasschicht auflöst (Aluminium Rheinfelden 1996). Mitunter wird auch Preßluft aus Stahllanzen unter die Anodenblöcke geblasen. Die zur manuellen Löschung erforderliche Öffnung der Abdeckung führt immer zu Fluorid-Emissionen in die Halle statt in die Abgasanlage.

Die Zeiten, in denen der Anodeneffekt das Hauptsignal für die Neubeschickung der Zelle war, sind vorbei. Dennoch ist auch gegenwärtig der Anodeneffekt 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 Stromausbeute, 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.

Mit der computergesteuerten Punktodosierung (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 (Winnacker-Küchler 1973, 276). Auf diese Weise kann zwar nicht die Dauer, wohl aber die Häufigkeit des Anodeneffektes drastisch vermindert werden.

1.4 Oxidzufuhr - Schlüssel zur Verminderung der Anodeneffekt-Häufigkeit

Seit im Zuge der Hüttenmodernisierungen der 80er Jahren in den alten Bundesländern 1989 die letzten Öfen mit Söderberg-Anoden stillgelegt wurden (VAW GB 1990, 30)⁶, gibt es nur noch drei hinsichtlich der Anodeneffekt-Häufigkeit differierende Ofentypen. Alle Öfen 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 Punktodosierung erfolgen kann.⁷

1.4.1 Oxidzufuhr von der Seite (SWPB)

Mit der in den 60er Jahren eingeführten Seitenbedienung waren in Deutschland 1990 noch 14% der Produktionskapazität ausgestattet, die 102 Tsd. t/a Primäraluminium erzeugten (vgl. Diagramm 17). 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 die Verschlammung begünstigt. Die Anodeneffekt-Häufigkeit liegt z.Zt.

⁶ In der DDR war dies Anfang 1990 der Fall. In den neuen Bundesländern gibt es keine Aluminiumelektrolysen mehr. (Aluminium 1991, 67. Jg., 12)

⁷ Die Daten über die eingesetzten Zufuhrtechnologien nach einzelbetrieblichen Kapazitäten sind dem Directory "Primary Aluminium Smelters and Producers of the World" zu entnehmen.

bei über 1 pro Ofentag (Aluminium Rheinfelden 1996). In dieser Studie wird angenommen, daß sich die Frequenz der Anodeneffekte bei den deutschen SWPB-Öfen durch verbesserte Betriebsführung reduzieren läßt, und zwar von **1,2** (1990) über **1,0** (1996) auf **0,8** (2000 ff.). (VAW 1996)

1.4.2 Zufuhr durch die Mitte (CWPB)

Mit der ebenfalls in den 60er Jahren entwickelten Dosierung durch die Mitte arbeiteten 1990 die meisten deutschen Öfen. Sie machten damals 63% der Kapazität aus und konnten 460 Tsd. t/a Primäraluminium produzieren (s. Diagramm 17). Zufuhr durch die Mitte oder "Centerwork Prebake" (CWPB) heißt: Die Zellen haben über der Ofenmitte ein Trägergerüst mit mechanischen Dosierern. Das Krustenbrechen besorgen "Schwerter". Das sind Brechbalken oder -meißel, die zwischen den beiden Anodenblockreihen herunterstoßen. Tonerde fließt in abgemessenen Portionen aus einem Vorratsbehälter oberhalb der Zelle in den Badaufbruch. Die Zufuhrintervalle sind kürzer als bei Seitenbedienung und liegen bei 60 Minuten. Die Anodeneffekthäufigkeit beträgt zwischen 0,5-1,5 pro Ofentag (VAW 1996). Diese Studie nimmt für die inländischen CWPB-Öfen bis 1993 einen Wert von **0,9**, ab 1994 einen Wert von **0,86** an.

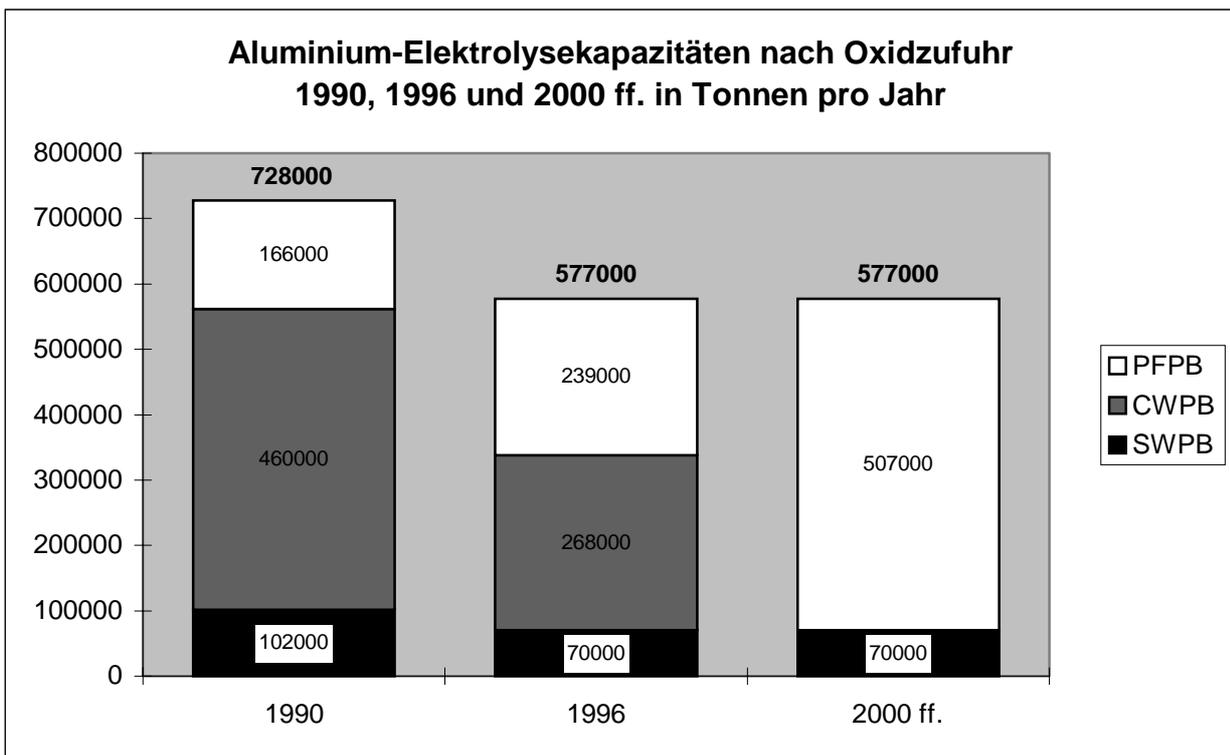


Diagramm 17: Aluminium-Elektrolyse-Kapazitäten nach Oxidzufuhr 1990, 1996 und 2000 ff. in t/a. Zwischen 1990 und 1996 wurden die Kapazitäten um über 150 000 t/a reduziert. Gleichzeitig stieg der Anteil der Punktdosierung (PFPB) deutlich auf Kosten der einfachen Mittedosierung (CWPB) an. Für das Jahr 2000 wird ein völliger Ersatz der Mittedosierung durch Punktdosierung bei gleichbleibender Kapazität angenommen. Quellen für 1990 und 1996: Primary Aluminium Smelters and Producers of the World, Düsseldorf, update 1996.

1.4.3 Punktdosierung (PFPB)

Mit Punktdosierung waren 1990 rd. 23% der Elektrolysekapazitäten ausgestattet. Ihre Produktionsleistung betrug 166 Tsd. t/a Primäraluminium. Die Punktdosierung ("Point Feeder Prebake") ist eine in den 70er Jahren begonnene Weiterentwicklung der Mitte-

dosierung (Grjotheim/Kvande 1993, 80/81). Zwischen den Anodenblöcken angebrachte senkrechte Stößel, die an mehreren Stellen gleichzeitig die Kruste aufbrechen und Tonerde zugeben können, werden fast kontinuierlich in Abständen von nur wenigen Minuten und mit einer Oxidchargierung von nur 0,2 bis 2 kg automatisch betätigt (ebd., 81). Wegen der kurzen Abstände verkrustet das Dosierloch kaum, was Ungenauigkeiten der Oxidzufuhr durch Krusteneintrag zu vermeiden hilft. Computersteuerung ermöglicht die bedarfsgerechte Nachdosierung und das Fahren des Ofens bei konstant niedriger Oxidkonzentration im Bad, so daß Anodeneffekte zur Badkontrolle weitgehend wegfallen. Bei Schmelzöfen mit der Pointfeeder-Technologie tritt ein Anodeneffekt nur 1 bis 2 mal wöchentlich ein, d.h. 0,1-0,3 mal pro Ofentag (Aluminium Essen 1996). In dieser Studie wird für inländische Pointfeeder-Öfen eine Anodeneffekt-Frequenz von **0,25** pro Ofentag angenommen.

1.5 Kapazitätsabbau und Ofen-Modernisierung 1990 bis 2000

Dem Diagramm 17 ist zu entnehmen, daß die inländischen Kapazitäten zwischen 1990 und 1996 stark reduziert wurden - per Saldo von 728 000 auf 577 000 t/a oder auf 79%. Gleichzeitig ist der Anteil der bezüglich der Anodeneffekt-Häufigkeit günstigsten Technologie der Punktdosierung (PFPB) deutlich auf Kosten der einfachen Mittebedienung (CWPB) gestiegen. Allerdings sind zwischen 1990 und 1996 zwei verschiedene Etappen zu unterscheiden, die im Diagramm nicht sichtbar sind: die Phase des Kapazitätsabbaus bis 1994 und die Modernisierungsphase ab 1995.

1. Kapazitätsabbau bis 1994. Die drei Jahre von Ende 1991 bis Ende 1994 waren wegen des Verfalls der Weltmarktpreise für Primäraluminium tiefe Krisenjahre für die deutschen Hütten. In diesem Zeitraum wurden Öfen kaum modernisiert, sondern zur Anpassung an die niedrige Nachfrage in großer Zahl stillgelegt, viele davon dauerhaft.

Stilllegung nach Ofentechnologie:

- Seitenbediente Öfen (SWPB): 32 000 t/a (31% des 1990er Bestands),
- Mittebediente Öfen (CWPB): 47 000 t/a (10% des 1990er Bestands),
- Punktdosierte Öfen (PFPB): 72 000 t/a (43% des 1990er Bestands).⁸

Der Abbau betraf alle Ofen-Kategorien, aber am stärksten die modernisierten Öfen, die erst wenige Jahre zuvor mit Punktdosierung ausgestattet worden waren. Ihre Kapazität sank um über 43%, gemessen am Bestand von 1990. Als Schließungsgründe wurden "Standortnachteile" und "zu geringe Betriebsgrößen" genannt (Erzmetall 1995, 233).

2. Modernisierung ab Ende 1994. Nach dem Ende der Krise nahmen die inländischen Aluminiumhütten ihr Modernisierungsprogramm wieder auf. Dieses hat im wesentlichen zum Ziel, die Öfen mit Mittebedienung (CWPB) auf Punktdosierung (PFPB) umzurüsten. Von Ende 1994 bis Ende 1996 wurden in drei Hütten Öfen mit zusammen rd. 150 000 t Jahreskapazität von einfacher Mittedosierung auf Punktdosierung umgebaut (Primary Aluminium Smelters ..., update 1996). So ist die Kapazität punktdosierter Öfen (trotz des starken Rückgangs in den Krisenjahren 1991-1994) gegen Ende 1996 um etwa 70 000 t/a höher als 1990. Ihr Anteil an der Gesamtkapazität beträgt über 46% - gegenüber 23% im Jahr 1990 (vgl. Diagramm 17).

⁸ Quellen: Börsenzeitung 22.10.91; Aluminium Rheinfelden 1996; Handelsblatt 27.7.93; VAW Geschäftsbericht für 1993, 28; Bundesanzeiger Nr. 35, 1996, S. 1262. In einer der drei betroffenen Hütten mit Punktdosierung zog sich die Stilllegung in Etappen bis Ende Februar 1996 hin.

3. Perspektive bis 2000. Die inländischen Hütten decken zwar seit Beginn der 90er Jahre den inländischen Verbrauch nur zu ca. 50% - gegenüber ca. 70% in der ersten Hälfte der 80er Jahre (Metallstatistik 1994, 71). Dennoch ist auch nach dem Ende der Aluminium-Krise nicht mit der Wiederinbetriebnahme stillgelegter Kapazitäten zu rechnen. Sofern verstärkte Nachfrage nach dem wegen seines geringen Gewichts geschätzten Metall zu neuen Kapazitäten führt, dürften diese, wenn überhaupt, im Ausland errichtet werden.⁹

Andererseits scheint aus gegenwärtiger Sicht mittelfristig auch kein Abbau von Kapazitäten mehr erforderlich. Denn die inländischen Hütten weisen gegenüber den mit niedrigeren Kosten arbeitenden überseeischen Hütten spezifische Vorteile auf, die aus ihrer integrierten Produktionsweise hervorgehen. Sie verfügen über angeschlossene Gießereien und erzeugen nicht nur einfache Aluminiumbarren, sondern sind in der Lage, kundenspezifisch zugeschnittene Legierungen und Zwischenprodukte zu liefern (Aluminium Essen 1996).

So ist zu erwarten, daß der Modernisierungsprozeß der inländischen Hütten auf dem gegenwärtigen, angepaßten Kapazitätsniveau weitergeht. Bleibt es beim jetzigen Umrüsttempo, wird es ab dem Jahr 2000 in Deutschland mittebediente Elektrolysezellen nur noch mit Punktdosierung geben. (Das Diagramm 17 veranschaulicht diese Prognose für die Jahre 2000 ff. durch das Fehlen von Kapazitäten mit CWPB-Technik.)

Ein Prognoserisiko stellen die restlichen 70 000 t/a Kapazitäten mit Seitendosierung dar. Eine technische Umrüstung auf Punktdosierung ist nur durch eine vollständige Neukonzeption der Öfen möglich (VAW 1996). In dieser Studie wird unterstellt, daß diese Öfen auf absehbare Zeit kein neues Dosiersystem erhalten.

1.6 Empirische Messung der CF₄-Emissionen: Daten für 1990 und 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, kann 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.

Tab. 29: CF₄ und C₂F₆-Emissionen der deutschen Aluminiumhütten 1990 und 1996
in Tonnen pro Jahr

	1990	1996
1. Summe CF ₄	315,5	198
2. Summe C ₂ F ₆ *	31,5	19,8
3. Aluminiumproduktion	720300**	577000

⁹ Der letzte Neubau einer Elektrolyse-Hütte in Deutschland erfolgte im Jahre 1973. Neubauten unter deutscher Beteiligung erfolgten seitdem nur im Ausland, und zwar wurden 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)

Quelle für CF_4 : Fachverband Primäraluminium 1996.

* C_2F_6 wurde nicht gemessen, sondern pauschal mit 10% der CF_4 -Menge angesetzt.

** Die effektive Aluminiumproduktion von 1990 lag unter der Kapazität von 728 000 t (Diagramm 17), vor allem weil ein modernisiertes Ofenhaus erst im Frühjahr 1990 die Produktion aufnahm (VAW GB 1990, 22).

Als Resultat wurden für 1996 aggregierte einzelbetriebliche Emissionen im Umfang von 198 t CF_4 ermittelt und rückwirkend für 1990 rd. 315,5 t (s. Tabelle 29, Zeile 1). Der Rückgang beträgt zwischen 1990 und 1996 rd. 117,5 t. Das sind über 37%. Damit fällt die Verminderung der Emissionen bedeutend stärker aus als die 20%-ige Reduzierung der Aluminiumproduktion (s. Tabelle 29, Zeile 3).

Das bedeutet, daß die Abnahme der CF_4 -Emissionen nicht nur auf dem Kapazitätseffekt zwischen 1990 und 1994 gründet, sondern zu einem sehr erheblichen Teil auf den im Abschnitt 5 erläuterten Modernisierungsmaßnahmen beruht. (Die spezifische CF_4 -Menge pro Tonne Aluminium, der Quotient aus Zeile 1 und Zeile 3 in Tabelle 29, ist zwischen 1990 und 1996 von 0,438 kg auf 0,343 kg gesunken.)

1.7 Abschätzung der zukünftigen CF_4 -Emissionen

Das Meßprogramm des Fachverbands Primäraluminium hat erstmalig Meßdaten über die deutschen CF_4 -Gesamtemissionen für die Gegenwart und einige zurückliegende Jahre geliefert. Um darüberhinaus auch die künftigen Emissionen abschätzen zu können, ist ein anderer methodischer Ansatz erforderlich.

Dieser versucht, aus der nach der Art der Oxidzufuhr unterschiedlichen Häufigkeit des Anodeneffekts und dem jeweiligen Anteil des Ofentyps an der effektiven Produktionskapazität auf die CF_4 -Emissionen zu schließen. Um eine der in der internationalen Aluminiumindustrie gebräuchlichen "halbempirischen" Schätzformeln anwenden zu können, sind die aus den vorangegangenen Abschnitten bekannten Bestimmungsgrößen "Anodeneffekte pro Ofentag nach Zufuhrtechnologie" (Abschnitte 4.1-4.3) und "Gesamtkapazität nach Ofentypen" (Diagramm 17) um drei weitere empirische Ofendaten zu ergänzen. Dabei handelt es sich um Faktoren, welche die CF_4 -Emissionsmenge pro Tonne Aluminium mitbeeinflussen, aber in der Praxis wenig variabel sind (in Klammern die internationalen Abkürzungen):

1. Dauer eines Anodeneffektes in Minuten ("AEmin").
2. Fraktion von CF_4 im Anodengas in Prozent ("F").
3. Stromausbeute der Öfen in Prozent (Current Efficiency: "CE").

Zu 1. Die Dauer des Anodeneffekts liegt seit der automatischen Löschung durch Bewegungen des Anodentisches im Bereich von 2 bis 4 Minuten, im Mittel bei etwas unter drei Minuten (HAW 1996). Für die Schätzung wird bei den deutschen Hütten ein Mittelwert von 2,7 Minuten angenommen.

Zu 2. Die durchschnittliche Höhe der CF_4 -Gasfraktion (F) läßt sich theoretisch wiederum in Abhängigkeit von der Anodeneffektdauer - auf Basis der Faradayschen Gesetze - bestimmen. Sie liegt nach 2 Minuten bei ca. 10 und nach 3 Minuten bei ca. 12%¹⁰, und

¹⁰ Zur Erinnerung: C_2F_6 entsteht nur während der ersten Minute des Anodeneffekts. Der C_2F_6 -Anteil ist daher umso höher, je kürzer der Anodeneffekt dauert, und umgekehrt. Bei einer Dauer von ca. 3 Minuten macht C_2F_6 etwa 10% der Menge von CF_4 aus.

steigt danach nur noch unwesentlich an (Gibbs/Bakshi 1996, 16). Für die Schätzung wird in den deutschen Hütten ein Anteil von 11% (bzw. 0,11) angenommen.

Zu 3. Die Stromausbeute für die inländischen Öfen liegt zwischen 90 und 95% (Primary Aluminium Smelters and Producers of the World, update 1996). Für die deutschen Hütten wird ein Wert von 92% (bzw. 0,92) zugrundegelegt.

In Tabelle 30 sind alle Ausgangswerte für die Schätzgleichung zusammengestellt, und zwar nicht nur für das Jahr 2000, sondern auch für die Stichjahre 1990 und 1996. Letzteres deshalb, weil die Plausibilität des über die Schätzformel gewonnen Emissionswertes für das Jahr 2000 umso höher ist, je näher die Schätzergebnisse für 1990 und 1996 mit den vorliegenden Meßresultaten dieser Jahre übereinstimmen.

Tab. 30: Empirische Ofendaten für die Abschätzung der CF₄-Emissionen 1990-2000 ff.

	Anodeneffekte pro Ofentag			Weitere Ofenwerte			ergänzend:
	SWPB	CWPB	PFPB	F	AE min	CE	Al-Prod. in t
1990	1,2	0,9	0,25	0,11	2,7	0,92	720300
1996	1,0	0,86	0,25	0,11	2,7	0,92	577000
2000	0,8	0,86	0,25	0,11	2,7	0,92	577000

Quellen: Anodeneffekte pro Ofentag: Abschn. 4.1-4.3; Weitere Ofenwerte: Abschn. 7. SWPB: Seitenbediente Öfen; CWPB: Mittebediente Öfen; PFPB: Punktdosierte Öfen.

Die Zeilen der Tabelle 30 unterscheiden sich außer in der letzten, ergänzenden Spalte (Aluminiumproduktion in t) voneinander nur in der Frequenz der Anodeneffekte pro Ofentag bei den seitenbedienten (SWPB) und mittebedienten (CWPB) Öfen. Hier wird wie in Abschnitt 4.3 angenommen, daß bis zum Jahr 2000 durch optimierte Betriebsführung der Öfen die Häufigkeitswerte leicht zurückgehen.

Schätzformel für CF₄-Emissionen pro Tonne Aluminium

Die in diesem Abschnitt verwendete Formel zur Abschätzung der CF₄-Emissionen pro Tonne Aluminium wird in den USA und Kanada häufig benutzt (Gibbs/Jacobs 1996; Barber 1996; Gibbs/Bakshi 1996; Tabereaux 1996). Sie lautet:

$$\text{kg CF}_4 / \text{t Al} = \frac{1,7 \times \text{AE/pot/day} \times F \times \text{AEmin}}{\text{CE}}$$

Erläuterung: 1,7 ist eine Konstante, die sich aus den Faradayschen Elektrolyse-Gesetzen ergibt. AE/pot/day ist die Häufigkeit des Anodeneffekts pro Ofentag; hier variiert der Wert lt. Tabelle 30. F ist die CF₄-Fraktion im Anodengas während des Anodeneffektes, hier 0,11. AEmin ist die Dauer des Anodeneffektes in Minuten, hier 2,7. CE ist Current Efficiency (Stromausbeute), hier 0,92.

Werden die Daten aus Tabelle 30 in die Schätzgleichung (s. Kasten) eingesetzt, erhält man für jeden Wert, den der "Anodeneffekt pro Ofentag" annimmt, die CF₄-Emissionsmenge pro Tonne Aluminium in kg. Diese kalkulierten CF₄-Emissionen pro t/Al sind in Tabelle 31 in der Spalte 4 eingetragen. Werden diese ofenspezifischen Emissionsfaktoren mit der Aluminiumproduktion aus den jeweiligen Öfen (aus Diagramm 17 übernommen) gewichtet (Spalte 4 x Spalte 5 in Tabelle 31), erhält man die CF₄-Emissionen in t aus diesen Öfen (Spalte 6). Die C₂F₆-Emissionen in Spalte 7 werden pauschal mit 10% der CF₄-Emissionsmenge angesetzt.

Die Aufsummierung der ofentypischen CF₄-Emissionen eines Jahres ergibt die CF₄-Gesamtemissionen eines Jahres. Für CF₄ lauten die Werte: 315 t (1990), 198 t (1996) und 100,3 t (2000 ff.).

Tab. 31: Kalkulierte CF₄-Emissionen für 1990, 1996 und 2000 ff.						
Schätzformel: $\text{kg CF}_4 / \text{t Al} = 1,7/\text{CE} \times (\text{AE}/\text{pot}/\text{d} \times \text{F} \times \text{AEmin})$						
1 Jahr	2 Ofentyp	3 AE pro Ofentag	4 kg CF₄ /t Al	5 Al-Prod. in t	6 CF₄ in t 4 x 5	7 C₂F₆ in t (10% CF₄)
1990	SWPB	1,2	0,659	102000	67,2	6,7
1990	CWPB	0,9	0,494	457000	225,7	22,6
1990	PFPB	0,25	0,137	161300*	22,1	2,2
Summe				720300	315,0	31,5
1996	SWPB	1,0	0,549	70000	38,4	3,8
1996	CWPB	0,862	0,473	268000	126,8	12,7
1996	PFPB	0,25	0,137	239000	32,8	3,3
Summe				577000	198,0	19,8
2000	SWPB	0,8	0,439	70000	30,7	3,1
2000	PFPB	0,25	0,137	507000	69,6	7,0
Summe				577000	100,3	10,0

Erläuterung: Die CF₄-Emissionsfaktoren (Spalte 4) ergeben sich aus der Anwendung der im Text erklärten Schätzformel. Das Produkt aus diesen Emissionsfaktoren und der spezifischen Aluminiumproduktion (Spalte 5) ist die CF₄-Emission nach Ofentyp pro Jahr in t (Spalte 6). Die CF₄-Gesamtemissionen pro Jahr sind die fett und kursiv gedruckten Werte in Spalte 6.

* Unterhalb der Vollauslastung, da eine Teilkapazität erst ab Frühjahr 1990 in Betrieb ging.

Die geschätzten CF₄-Gesamtemissionen für 1990 und 1996 zeigen eine derart weitgehende Übereinstimmung mit den Werten aus dem Meßprogramm der deutschen Aluminiumhütten, daß auch der geschätzte Prognosewert für 2000 ff. hohe Plausibilität beanspruchen kann. Für das Jahr 2000 ist mit Emissionen von 100 t CF₄ und 10 t C₂F₆ aus der Aluminiumindustrie zu rechnen.

1.8 Ergänzung zum Ausgangsjahr 1990: DDR-Elektrolysen

In einer Darstellung der deutschen CF₄- und C₂F₆-Emissionen ab 1990 müssen auch die beiden Aluminiumelektrolysen berücksichtigt werden, die in der Endphase der DDR noch produzierten. Es handelt sich um die "Elektrolyse Nr.1" in Bitterfeld (Kapazität 1990: 20 000 t/a) und die "Elektrolyse Nr. 2" in Lauta (Kapazität 1990: 25 000 t/a) (Aluminium 66. Jg., 1990, 113). Beide Hütten waren in der ersten Jahreshälfte 1990 noch in Betrieb, wurden aber im Sommer 1990 stillgelegt, da sie gegenüber den Hütten in der Bundesrepublik Deutschland als technisch veraltet galten (Aluminium 67. Jg., 1991, 12). Ihre Jahresproduktion für 1990 wird vom Bundesamt für Wirtschaft auf 20 000 t geschätzt (BAW 1996).

Nach Auskunft von Branchenkennern arbeitete die Hütte in Lauta noch mit selbstbackenden Söderberg-Anoden, während die Bitterfelder Hütte schon vorgebackene Anoden einsetzte (Aluminium Rheinfelden 1996). Da die CF₄-Emissionen beider Hütten durch das 1996 durchgeführte Meßprogramm nicht erfaßt werden konnten, wird hier eine Abschätzung vorgenommen. Dazu werden die Anodeneffekt-Häufigkeiten in der Hütte Lauta mit 2 und in der Hütte Bitterfeld mit 1,6 pro Ofentag angesetzt. Diese Werte

sind insofern Minimalwerte, da sie an der unteren Grenze der Anodeneffekt-Frequenzen entsprechender Öfen aus den 80er Jahren in den alten Bundesländern liegen (Aluminium Rheinfelden 1996).

Legt man dieselbe Schätzmethode wie im vorhergehenden Abschnitt zugrunde, dann haben die 20 000 t Primäraluminium, die 1990 noch in der DDR produziert wurden, PFC-Emissionen in Höhe von ca. 20 t CF₄ und 2 t C₂F₆ verursacht.

Diese Emissionsmengen sind als eine Untergrenze den für 1990 über Messungen ermittelten 315,5 t CF₄ bzw. 31,5 t C₂F₆ zuzufügen.

1.9 Die Emissionen aus deutschen Aluminiumhütten von 1990 bis 2000 ff.

In der Tabelle 32 sind die CF₄- und C₂F₆-Emissionen aus den deutschen Aluminiumhütten für fünf wichtige Stichjahre eingetragen. Das 1996er Meßprogramm des Fachverbands Primäraluminium lieferte auf Basis betrieblicher Messungen die aggregierten CF₄-Daten für 1990 (ohne DDR), 1994 und 1996. Die Daten für die allgemeinen "Eckjahre" dieser Studie, nämlich 1990, 1995, 2000 usw. wurden zum Teil

Tab. 32: CF₄- und C₂F₆-Emissionen aus der Aluminiumverhüttung 1990-2000 ff. (Messungen und Schätzungen) und ihr Beitrag zum Treibhauseffekt)						
CF₄						
<i>GWP: 6500</i>	<i>1990</i>	<i>1994</i>	<i>1995</i>	<i>1996</i>	<i>2000</i>	<i>2000 ff.</i>
Emission in t	335	199	209	198	100	100
Mio. t CO ₂ -Äquivalente	2,18	1,29	1,36	1,29	0,65	0,65
C₂F₆						
<i>GWP: 9200</i>	<i>1990</i>	<i>1994</i>	<i>1995</i>	<i>1996</i>	<i>2000</i>	<i>2000 ff.</i>
Emission in t	33,5	19,9	20,9	19,8	10	10
Mio. t CO ₂ -Äquivalente	0,31	0,18	0,19	0,18	0,09	0,09

Quellen: CF₄ für 1990 (ohne DDR), 1994 und 1996: Meßprogramm des Fachverbands Primäraluminium 1996. CF₄ für 1990 (DDR), für 1995 und ab 2000: Anwendung einer Schätzformel auf empirische Daten. C₂F₆ wird pauschal mit 10% der CF₄-Menge angesetzt.

mit der - im Abschnitt 7 dargelegten - Schätzmethode ermittelt. (Dies gilt auch für die Jahre 1991, 1992 und 1993 in Tabelle 28a und 28b im Anhang des Überblicks.)¹¹ Wie bereits in Abschnitt 6 im Kommentar zu den empirischen Messungen erwähnt, ist der Rückgang der Emissionen zwischen 1990 und 1996 beträchtlich. Werden noch die 1990er Emissionen aus der Endphase der DDR berücksichtigt, ist die emittierte CF₄-Menge in nur sechs Jahren um über 40% gesunken, von 335 t (1990) auf 198 t (1996). Diesen niedrigen Stand hatten die Emissionen zwei Jahre vorher schon einmal erreicht, nämlich 1994 mit ca. 199 t. Dies lag damals aber an der niedrigen Jahresproduktion von Primäraluminium, die nur 503 000 t gegenüber 577 000 t betrug, fast 15% weniger als im Jahr 1996. Relativ betrachtet sind die Emissionen seither weiter zurückgegangen. Der Emissionskoeffizient betrug 1990 0,45 kg CF₄ / t Al, 1994 lag er bei 0,40, 1995

¹¹ Für alle Jahre mit Unterauslastung der installierten Elektrolysekapazitäten mußte die effektive Jahresproduktion nach Technologie der Oxidzufuhr ermittelt werden. Quellenbasis dafür waren außer den Jahrgängen 1990 bis 1995 der Zeitschrift "Aluminium" die Pflichtveröffentlichungen der Jahresabschlüsse 1990 bis 1995 im Bundesanzeiger, und zwar von "VAW aluminium AG", "Hamburger Aluminium-Werk GmbH", "Hoogovens Aluminium Hüttenwerk GmbH", "Leichtmetall-Gesellschaft mbH/Aluminium Essen GmbH" und (bis 1992) "Aluminium Rheinfelden GmbH".

bei 0,36 und 1996 bei 0,34 kg CF_4 / t Al. Dies ist auf die Umrüstung von einfacher Mittdosierung auf Punktdosierung zurückzuführen.¹²

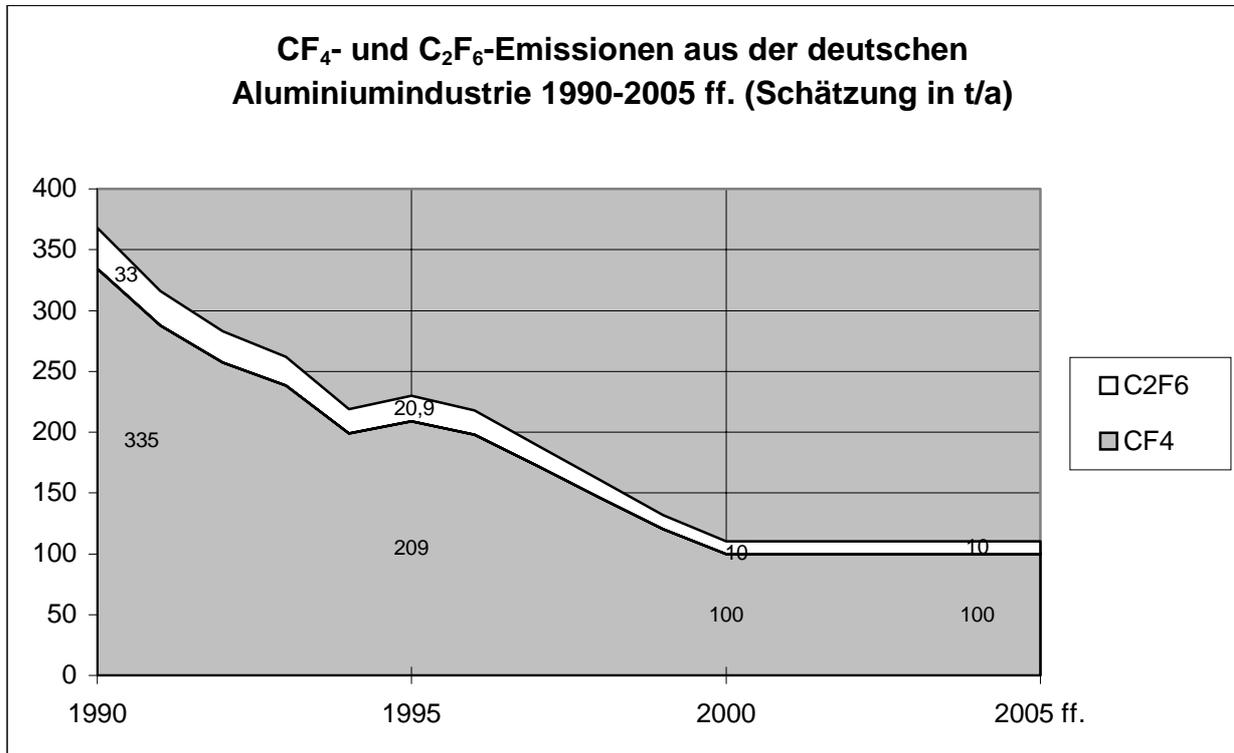


Diagramm 18: PFC-Emissionen aus der deutschen Aluminiumindustrie 1990 bis 2005 ff. (Schätzung in t/a). Zwischen 1990 bis 1995 sanken die CF_4 -Emissionen durch Stilllegungen und Modernisierungen von 335 t auf 209 t. Sie lagen 1996 bei 198 t und dürften im Jahr 2000 nur noch 100 t ausmachen. Die C_2F_6 -Emissionen betragen konstant 10% der CF_4 -Menge. Sie sinken von 1990 bis 2000 von 33 auf 10 t.

Die im Abschnitt 7 durchgeführten Schätzungen lassen für die Zukunft weitere Verminderungen der spezifischen Emissionen erwarten. Ab dem Jahr 2000 ist bei gleichbleibender Jahresproduktion von Primäraluminium nur noch mit Emissionen von 100 t CF_4 und 10 t C_2F_6 zu rechnen, bei einem Emissionskoeffizienten von 0,17 kg CF_4 / t Al. In den darauf folgenden Jahren sind keine so gravierenden Veränderungen wie in den neunziger Jahren mehr zu erwarten, da sich die bestverfügbare Ofentechnologie der Punktdosierung dann überall durchgesetzt haben wird, wo sie gegenwärtig unter wirtschaftlich vertretbarem Aufwand anwendbar erscheint. Darum ist ab 2000 ff. nur noch mit kleineren Schritten der Emissionsminderung zu rechnen, deren Ausmaß heute nicht vorauszusagen ist.

Sollte der Betreiber der bis dahin verbliebenen 70 000 t/a Elektrolysekapazität mit seitenbedienten Öfen es dann für wirtschaftlich vertretbar halten, auf Punktdosierung umzustellen, könnten die CF_4 -Emissionen um weitere 20 t pro Jahr reduziert werden.

1.10 Beitrag zum Treibhauseffekt durch PFC-Emissionen der Aluminiumhütten

¹² Nur während der Zeit der überproportional großen Stilllegung moderner Öfen zwischen 1991 und 1993 (s. Abschnitt 5) stieg der Emissionskoeffizient von 0,41 auf 0,43 kg CF_4 / t Al an.

In Tabelle 32 sind die CF₄- und C₂F₆-Emissionen nicht nur in metrischen Tonnen, sondern auch in Mio. t CO₂-Äquivalente wiedergegeben. Der Beitrag zum Treibhauseffekt durch PFC-Emissionen aus der Aluminiumindustrie betrug 1990 noch 2,48 Mio. t CO₂-Äquivalente. Proportional zum Rückgang der Emissionsmenge in metrischen Tonnen vermindert sich der Beitrag zum Treibhauseffekt bis zum Jahr 2000 auf rd. 0,74 Mio. t CO₂-Äquivalente. Dies zeigt Diagramm 19.

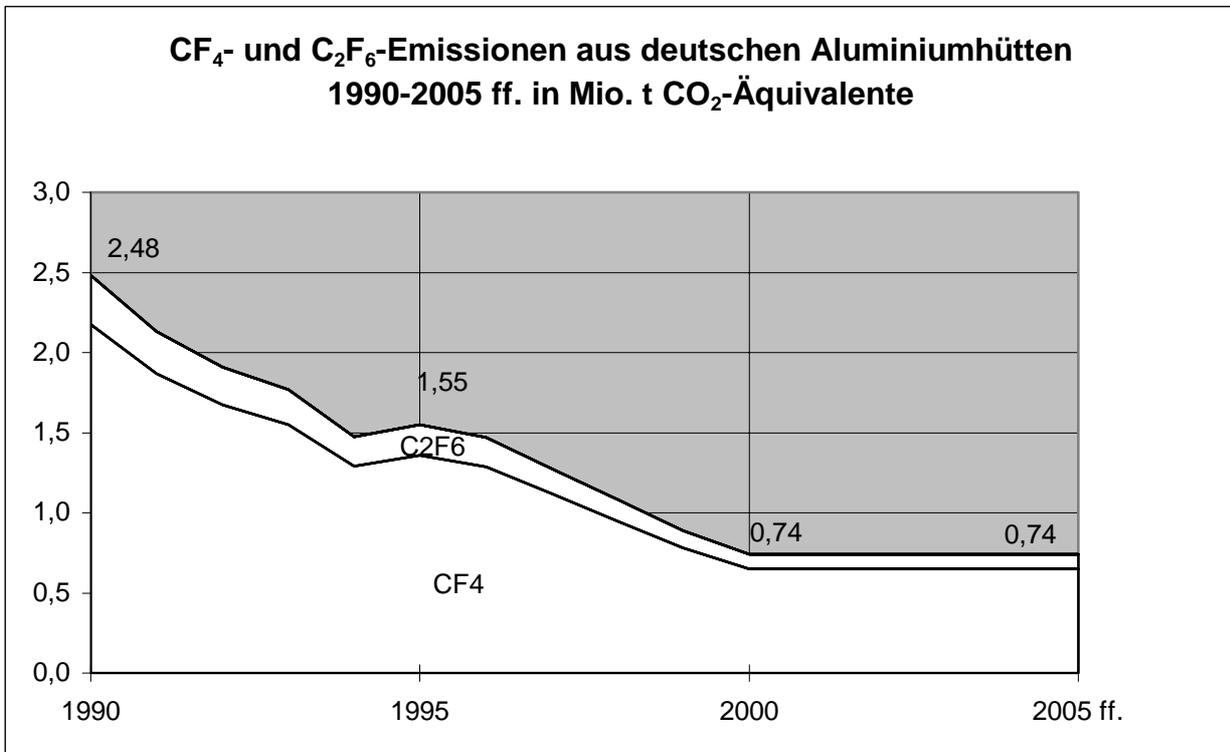


Diagramm 19: Beitrag zum Treibhauseffekt durch PFC-Emissionen aus deutschen Aluminiumhütten in Mio. t CO₂-Äquivalente. Der Beitrag zum Treibhauseffekt sinkt proportional zum Rückgang der Emissionsmengen kontinuierlich bis auf einen Schätzwert von 0,74 Mio. t.

2. CF₄ und C₂F₆ als Halbleiter-Ätzgase

CF₄ und C₂F₆ werden in relativ großen Mengen gezielt als Ätzgase bei der Halbleiterherstellung eingesetzt, wofür sie besonders hohe Reinheitsgrade aufweisen müssen. C₂F₆ stammt fast zu 100% aus den USA, CF₄ zu 60% aus Japan und zu geringen Teilen aus Frankreich (vgl. Kap. IV). Die inländische Produktion im Umfang von ca. 5 t CF₄ für elektronische Anwendungen ist im April 1994 eingestellt worden (Hoechst 1996).

Bemerkenswert ist besonders der jährlich steigende Verbrauch von C₂F₆, das weniger zum Strukturätzen der Chips als zum Reinigen der Reaktorkammer benutzt wird. Eingehende Ausführungen über die beiden Gase finden sich im selbständigen Kapitel IV, wo alle fluorierten Gase für die Halbleiterindustrie zusammen behandelt werden. Daher wird an dieser Stelle auf eine nähere Untersuchung zugunsten einer Darstellung der Emissionen in tabellarische Form verzichtet. Die Daten der Tabelle 33 sind dem Kapitel IV entnommen. Zum Verständnis sei angemerkt, daß die wachsende Diskrepanz zwischen Jahresverbrauch und Jahresemissionen auf die Installation von PFC-spaltenden Abgasanlagen zurückzuführen ist.

Tab. 33: CF₄-und C₂F₆-Verbrauch, -Emissionen sowie Beitrag zum Treibhauseffekt aus der Halbleiterindustrie 1990-2005 ff.

CF₄				
<i>GWP: 6500</i>	<i>1990</i>	<i>1995</i>	<i>2000</i>	<i>2005 ff.</i>
Verbrauch in t	8	10	13	16,6
Emissionen in t	6,8	4,5	1,6	0,8
Tsd. t CO ₂ -Äquivalente	44,2	29,25	10,4	5,25
C₂F₆				
<i>GWP: 9200</i>	<i>1990</i>	<i>1995</i>	<i>2000</i>	<i>2005 ff.</i>
Verbrauch in t	12	18	30	38,3
Emissionen in t	8,4	6,4	2,5	0,8
Tsd. t CO ₂ -Äquivalente	77,3	58,9	23	7,4

Quellen: Kapitel IV vorliegender Studie.

Die wachsende Ausstattung der Halbleiterindustrie mit PFC-spaltenden Abgasanlagen bewirkt, daß trotz steigenden Verbrauchs von CF₄ und C₂F₆ die Emissionen und damit ihr Beitrag zum Treibhauseffekt bis 2005 ff. auf 10% der Werte von 1990 zurückgehen dürften.

3. CF₄ in der Leiterplattenfertigung

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

1. Desmearing. 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 1996a). 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 3 Tonnen im Jahr 1990 und auf 4 Tonnen im Jahr 1995 geschätzt, und zwar ohne absehbare Zuwachstendenzen in der Zukunft (plasonic 1996b).

2. Feinreinigung. In manchen Fällen werden Leiterplatten vor dem Löten oder Bonden im Plasma behandelt, um die Oberflächen zu entfetten oder zu aktivieren. Dies ist namentlich angebracht, wenn ohne Flußmittel gearbeitet wird. Zum Ätzen wird oft eine Gasmischung mit dem Handelsnamen "Purigon" eingesetzt, deren CF₄-Gehalt 40% beträgt - neben Sauerstoff, Wasserstoff und Edelgasen (Linde Technische Gase 1996; Sicherheitsdatenblatt April 1993).

Nach Auskunft der Linde AG liegt der jährliche Inlandsverbrauch für die Feinreinigung bei 1 t CF₄, und zwar einschließlich der (kleinen) Mengen für die Plasmareinigung von Metalloberflächen außerhalb der Elektronik (Additiv zu Sauerstoff).

In der Leiterplattenfertigung gibt es zwar alkalische Abgaswäscher zum Auffangen der Reaktionsprodukte, aber keine Anlagen, die das nicht umgesetzte CF₄ spalten könnten (plasonic 1996a). Wird für CF₄ die gleiche Umsetzung im Plasmareaktor wie bei der Halbleiterfertigung unterstellt (Messungen liegen hierzu nicht vor), dann verlassen 85% des zugeführten CF₄-Gases unverändert die Abgasanlage (Air Products 1996).

Tab. 34: CF₄-Emissionen in t und ihr Beitrag zum Treibhauseffekt 1990-2000 ff. aus der Leiterplattenfertigung

<i>GWP: 6500</i>	<i>1990</i>	<i>1995</i>	<i>2000 ff.</i>
Emissionen in t	3,4	4,3	4,3
Tsd. t CO ₂ -Äquivalente	22,1	27,6	27,6

Quellen: siehe Text.

Von den 1990 zugeführten 4 t CF₄ emittierten 3,4 t, von den 1995 zugeführten 5 t CF₄ ca. 4,3 t in die Atmosphäre. In CO₂-Äquivalente umgerechnet beläuft sich der Beitrag zum Treibhauseffekt 1990 auf 22,1 Tsd. t und ab 1995 auf 27,6 Tsd. t (Tabelle 34).

4. CF₄ als Nebenprodukt der FCKW-Produktion

Bei der chemischen Synthese der FCKW 11 und 12 aus CCl₄ und HF, die in Deutschland bis 1994 in zwei Anlagen durchgeführt wurde, fiel bei einer Anlage als Nebenprodukt in geringen Anteilen (0,03%) CF₄ an. Bei einer Jahresproduktion von 50 000 t FCKW 11 und 12 waren dies jährlich 15 t. Bei der zweiten Anlage, die nach einem anderen Verfahren arbeitete, wurde CF₄ nicht oberhalb der Nachweisgrenze von 0,1 ppm gefunden. (Hoechst 1996; Solvay 1996c)

Von den 15 t CF₄ wurden 5 t aufgefangen und nach diversen Reinigungsschritten als Ätzgas für die Elektronikindustrie verkauft. Die restlichen 10 t emittierten als Abgas in die Atmosphäre.

Seit der Einstellung der FCKW-Produktion in dieser Anlage im April 1994 fiel auch kein CF₄ mehr an. (Für 1994 werden die CF₄-Emissionen auf 3 t geschätzt.)

Nachweise für CF₄ und C₂F₆

- Air Products plc., Schreiben von J. Stienstra (Electronics Marketing), Walton-on-Thames 8.7.1996; Anhang: PFC Consumption Efficiencies for Processes Monitored;
- Aluminium Essen GmbH, Fachgespräch mit K. Ehrke (Geschäftsführer), B. Josefiak (Umweltschutzbeauftragter) sowie R. Buchholz (Fachverband Primäraluminium), Essen, 28.6.1996;
- Aluminium Rheinfelden GmbH, pers. Mitt. 18.6., 4.12., 5.12.1996;
- Aluminium, Internationales Magazin für Industrie, Forschung und Praxis, Jahrgänge 66 (1990) bis 72 (1996);
- Barber, M. A. (Alcan International Limited), Alcans's PFC Emission Reduction Program. A Case Study, Vortrag auf dem U.S. EPA workshop on PFCs, Washington DC, May 8-9, 1996;
- Buck Plasma Electronic, Neuenburg, pers. Mitt. 22.4.1996;
- Bundesamt für Wirtschaft (BAW), Eschborn, pers. Mitt. 13.12.1996;
- Erzmetall 48 (1995), Nr. 4, 233: "VAW schließt Aluminiumelektrolyse in Töging zum Jahresende";
- Fachverband Primäraluminium im Gesamtverband der Deutschen Aluminiumindustrie e.V., Schreiben an das Umweltbundesamt Berlin, Düsseldorf, 19.11.1996;
- 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;
- Gibbs, M. and Bakshi, V., PFC Emissions from U.S. Aluminium Smelters: Preliminary Data Analysis, 19-Seiten-Manuskript des Vortrags auf dem U.S. EPA workshop on PFCs, Washington DC, May 8-9, 1996;
- Grjotheim, K., Kvande, H. (Eds.), Introduction to Aluminium Electrolysis, Düsseldorf 1993;
- Harnisch, J., Borchers, R., Fabian, P., Gäggeler, H.W., Schotterer, U., Effect of natural tetrafluormethane, in: Nature, Vol 384, 7 November 1996, 32;
- Harnisch, J., Emission Scenarios for CF₄ and C₂F₆ Based on Reconstructed Atmospheric Concentrations, prepared for EPA-workshop on PFCs, Washington DC, May 8th and 9th, 1996a;
- Harnisch, J., Die globalen atmosphärischen Haushalte der Spurengase Tetrafluormethan (CF₄) und Hexafluorethan (C₂F₆), Göttingen 1996b;
- HAW (Hamburger Aluminium Werke GmbH), Hamburg, pers. Mitt. 5.12.1996;
- Hoechst AG, Fachgespräch mit S. Hug (Business Director) und H. Debrodt (Marketing Manager Fluorine Chemicals), Frankfurt, 25.3.1996.
- IPCC = Intergovernmental Panel on Climate Change, Second Assessment Report: Climate Change 1995, Cambridge University Press, Cambridge 1995;
- Linde AG Technische Gase, Fachgespräch mit R. Hollenbach (Anwendungstechnik Elektronikgase) und P. Koch (Marketing Produkte), Unterschleißheim 29.4.1996;
- Metallstatistik 1983-1993 der Metallgesellschaft AG, 81. Jahrgang, Frankfurt am Main 1994;
- plasonic Oberflächen GmbH, Gerlingen, pers. Mitt. 28.4.1996a;
- plasonic Oberflächen GmbH, Gerlingen, pers. Mitt. 12.12.1996b;
- Primary Aluminium Smelters and Producers of the World (Directory), compiled by R. Pawlek, basic work updated by supplements several times a year, Düsseldorf, 1990-1996;
- Rhône-Poulenc Chemie GmbH, Frankfurt, Isceon 49, Firmenbroschüre o.J.;

- Sicherheitsdatenblatt Linde -Technische Gase: Purigon Gasgemische für Plasmaprozesse, Stand April 1993;
- Solvay Fluor und Derivate GmbH, Bad Wimpfen, pers. Mitt. 11.12.1996c;
- Tabereaux, A., Anode Effects, PFCs, Global Warming and the Aluminium Industry, in: Journal of Metals, November 1994, 30-34;
- 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, 4. Aufl., Bd. 7, 250-281, Weinheim 1972;
- Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie, 5. Aufl., Vo. A 1, 459-481, Weinheim 1985;
- VAW aluminium AG, Bonn, Geschäftsberichte für 1989, 1990, 1991, 1992, 1993;
- VAW aluminium AG, Bonn, pers. Mitt. 2.7.1996;
- Winnacker u. Küchler, Chemische Technologie, 4. Aufl., Bd. 6, 235-301, München 1973.

III. Wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe - H-FKW

Überblick: H-FKW als FCKW-Nachfolger

Wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW) werden von der Chemischen Industrie als chlorfreie Ersatzstoffe für FCKW¹³ angeboten. Ihre Entwicklung zur Produktionsreife wurde in den 80er Jahren beschleunigt, als sich ein weltweites Verbot vollhalogenierter FCKW abzeichnete und auch den zunächst als Alternative angesehenen teilhalogenierten FCKW (H-FCKW) keine langfristige Perspektive mehr eingeräumt wurde. Die gezielte großtechnische H-FKW-Herstellung begann in den USA (Du Pont) und in Europa (ICI) Ende 1990 mit Tetrafluorethan (R134a¹⁴). In der Mitte der 90er Jahre wurden global davon jährlich rd. 50 000 t produziert (AFEAS 1995).

Außer R134a werden mittlerweile sechs weitere technisch relevante H-FKW hergestellt, allerdings in geringerer Tonnage. Tabelle 35 führt die sieben wichtigsten H-FKW und deren größte Produzenten auf. Es zeigt sich, daß Deutschland als Produktionsstandort nur bei R134a eine nennenswerte Rolle spielt (Kapazität: 5000 t/a).

Tab. 35: GWP-Werte, Produktionsstandorte und -unternehmen der wichtigsten H-FKW 1996

<i>Größte H-FKW-Produzenten in</i>				
<i>H-FKW</i>	<i>GWP</i>	<i>Deutschland</i>	<i>Europa</i>	<i>Welt</i>
134a	1300	Solvay Frankfurt	ICI (GB), Atochem (F)	Du Pont (USA, Japan)
32	650	n.v.	ICI (GB)	Allied Signal (USA)
143a	3800	n.v.	Solvay (F)	Atochem (USA, F)
125	2800	Solvay Bad Wimp.*	Ausimont (I)	Allied Signal (USA)
152a	140	n.v.	Solvay (F)*	Du Pont (USA)
23	11700	Solvay Frankfurt	Atochem (F)	Du Pont (USA)
227	2900	Solvay Frankfurt**	Solvay (E)	Great Lakes (USA)

* Produktion nur chargenweise. ** Nur Destillation, Produktion in Spanien.

Quellen: Literaturlauswertung. Solvay Frankfurt und Solvay Spanien (Tarragona) waren bis Mitte 1996 Standorte der Hoechst AG. GWP-Werte (Zeithorizont: 100 Jahre): IPCC 1995.

Verlust vieler FCKW-Anwendungen an halogenfreie Alternativen

Die Problematisierung der FCKW-Anwendung hatte in der zweiten Hälfte der 80er Jahre eine Debatte um stoffliche und technische Alternativen ausgelöst, bei der es nicht nur um die Ersetzbarkeit des Chloratoms im FCKW-Molekül ging. Während sich die Chemische Industrie auf letzteres konzentrierte, d.h. auf die Entwicklung eines chlorfreien synthetischen Ersatzstoffes, dessen Eigenschaften den bewährten FCKW möglichst wenig nachstanden, kam es allenthalben zu einer Wiederentdeckung und Weiterentwicklung von Stoffen und Verfahren, die wegen der günstigen stofflichen Ei-

¹³ Wo nachfolgend von FCKW die Rede ist, sind nicht nur vollhalogenierte, sondern auch teilhalogenierte FCKW (H-FCKW) gemeint.

¹⁴ Der Buchstabe "R" vor dem H-FKW steht für "Refrigerant" und verweist auf den Ursprung halogener Kohlenwasserstoffe als reine Kältemittel. Da sich die Abkürzung "R" auch in Anwendungsgebieten außerhalb der Kältetechnik durchgesetzt hat, wird sie auch in dieser Studie beibehalten. Zur Nomenklatur von halogenierten Kohlenwasserstoffen s. UBA 1986, 57-59. Die letzte Ziffer bedeutet stets die Zahl der Fluoratome im Molekül.

enschaften der FCKW (Unbrennbarkeit, Leichtflüchtigkeit, Unpolarität, Ungiftigkeit) durch diese verdrängt und jahrzehntelang vernachlässigt worden waren.

Innerhalb weniger Jahre verloren die FCKW den weitaus größten Teil ihres früheren Marktes an halogenfreie Alternativen, die mittlerweile von den Anwendern für fähig gehalten wurden, die von den FCKW gesetzten Standards zu erfüllen, ohne ihre ökologischen Nachteile aufzuweisen. Es handelt sich um die großen FCKW-Anwendungsbereiche Aerosol-Treibgase, Kunststoffverschäumung, Lösemittel und Feuerlöschmittel.

Kernbereich eines direkten Umstiegs von FCKW auf H-FKW blieb nach 1990, als die H-FKW kommerziell verfügbar wurden, nur die Kältetechnik. Dazu kamen Randbereiche einer früheren FCKW-Domäne: Treibmittel in Druckgaspackungen (Polyurethan-Montageschaum in Dosen und Asthmasprays).

Selbst im angestammten Bereich der Kältemittel sind H-FKW als FCKW-Ersatz heute nicht unumstritten, sondern der Konkurrenz von Ammoniak, Kohlenwasserstoffen oder CO₂ ausgesetzt. Obwohl H-FKW nicht an der Ozonschichtzerstörung beteiligt sind, kommt dieser partielle ökologische Vorzug gegenüber den FCKW angesichts der Klimadiskussion nur in geringem Maß zum Tragen. Da sie wie die FCKW zum Treibhaus-effekt beitragen, haftete an ihnen von Anfang an ein negatives Umweltimage. Ihre Einführung kam dadurch ins Stocken, daß sie mit dem Aufschwung der Klimadebatte zusammenfiel. Potentielle Anwender entscheiden sich bei vorhandener technisch oder energetisch gleichwertiger Alternative zunehmend für Stoffe oder Verfahren ohne entsprechendes umweltpolitisches Risiko. Die anhaltende Klimadebatte ist ihrerseits Anstoß, bereits eingeführte H-FKW-Anwendungen erneut zu überprüfen.

Zwei Emissionsprognosen für die vier H-FKW-Bereiche

Nachfolgend werden Verbräuche und Emissionen von H-FKW für die Bereiche untersucht und prognostiziert, wo sie bislang an die Stelle von FCKW getreten sind:

1. Kältemittel für stationäre Anwendungen (seit 1991 R134a, danach die verschiedenen Kältemischungen aus R32, R125, R143a).
2. Kältemittel für mobile Anwendungen (seit 1991; vor allem R134a).
3. Polyurethan (PU)-Montageschaum (seit 1992 R134a und seit 1993 auch R152a).
4. Asthmasprays (seit 1996 R134a; R227 befindet sich in der Testphase).

Für die Emissionen werden pro Anwendungssektor zwei Szenarien entwickelt. Ihnen liegen folgende Prognosemodelle zugrunde:

Das **erste Modell** unterstellt, daß statt der bisherigen FCKW vollständig und ausschließlich H-FKW zum Einsatz kommen (Modell "Voller H-FKW-Umstieg").

Das **zweite Modell** unterstellt ebenfalls, daß sämtliche FCKW ersetzt werden. Der Ersatz geschieht aber nicht ausschließlich durch H-FKW, sondern zum Teil durch halogenfreie Stoffe oder Verfahren (Modell "Teilweiser H-FKW-Umstieg").

Die auf dem zweiten Modell beruhenden Reduktionsszenarien sind nicht aus der Luft gegriffen. Vielmehr orientiert sich dieses Prognoseverfahren an realen Trends. Wenn z.B. für die stationäre Kälte im Supermarktbereich statt eines vollen Umstiegs auf H-

FKW nur ein 70%-iger Umstieg bei gleichzeitiger Einführung halogenfreier Alternativen angenommen wird, so stützt sich dies ebenso auf Aussagen von kältetechnischen Experten wie auf die Entwicklung in Schweden, wo dieser Trend bereits Realität ist. Oder: Wenn für die mobile Kälte bei Pkw-Klimaanlagen ab dem Jahr 2005 mit einem Wiederausstieg aus R134a zugunsten von CO₂ gerechnet wird, dann deshalb, weil die drei führenden deutschen Automobilhersteller nachdrücklich daran arbeiten. Experten aus der Automobilindustrie prognostizieren daher auch diesen Trend.

Das erste Modell ("voller H-FKW-Umstieg") stellt dem gegenüber aber kein "worst case"-Szenario dar. Dies wäre der Fall, wenn es den FCKW-Verbrauch von 1986 zum Ausgangspunkt nähme, der zu fünfmal so hohen H-FKW-Mengen führen müßte wie das Modell 1. Dieses repräsentiert vielmehr eine Tendenz, die sich einstellt, wenn den bestehenden und künftigen ökologischen Auflagen gerade Genüge getan wird, ohne sie zu verschärfen. Es liefert auch einen Vergleichsmaßstab dafür, wie hoch die Entlastung für den Treibhauseffekt ist, wenn die FCKW nur partiell durch H-FKW und zum Teil durch klimaneutrale Alternativen ersetzt werden. Anzumerken ist, daß durch die H-FKW keine völlig neue Klimabelastung entsteht, wenn sie an den Emissionen ihrer FCKW-Vorgänger gemessen werden.

Emissionsmodell "Voller H-FKW-Umstieg": Zusammenfassung

Zwischen 1990 und 2007 nehmen bei vollem H-FKW-Umstieg in allen vier Bereichen die aufsummierten H-FKW-Emissionen um fast das 50-fache zu - von 200 t auf 9500 t jährlich. Danach verlaufen sie im wesentlichen auf gleichbleibendem Niveau weiter.

Tab. 36: H-FKW-Emissionen nach Anwendungen in Tonnen 1990-2020. Voller H-FKW-Umstieg							
Anwendung	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
PU-Schaum	0	1680	1680	1680	1680	1680	1680
Asthmasprays	0	0	300	400	400	400	400
Mobilkälte	0	247	1191	2184	2637	2610	2441
Stationäre Kälte	0	187	1701	3726	4982	4982	4982
Sonstiges	200	100	1,7	1,2	1,2	1,2	1,2
Summe	200	2214	4873,7	7991,2	9700,2	9673,2	9504,2

1. PU-Montageschaum. Seit im Jahre 1993 H-FCKW als Treibmittel in den Dosen für PU-Montageschaum durch H-FKW (R134a, dann auch R152a) abgelöst wurden, emittieren aus dieser Quelle jährlich zwischen 1500 und 1700 t - im Durchschnitt 1680 t. Bis 1999 machen die Schaumtreibmittel, deren Emissionsmenge (je 50% R134a und R152a) konstant bleibt, mehr als die Hälfte der Gesamtemissionen aus.

2. Stationäre Kälte. Ab dem Jahr 2000 ist dieser Bereich größter Einzelemittent. Freisetzen aus stationären Anlagen der Gewerbe- und Industriekälte sowie der Gebäudeklimatisierung bestehen zum größten Teil aus H-FKW-Mischungen, die den H-FCKW R22 ersetzen. Sie erreichen ihr dauerhaftes Maximum ab ca. 2007 auf einer Höhe von 4982 t, wenn der Ersatz von R22 durch H-FKW abgeschlossen ist. Dann bilden sie über die Hälfte der Gesamtemissionen.

3. Bei der Mobilkälte, deren Emissionen zu 90% aus Pkw-Klimaanlagen stammen, wird kein statischer, sondern ein wachsender Kältemittelbestand zugrundegelegt, weil eine

Zunahme der Klimatisierungsquote des Fahrzeugbestands von 7% (1996) bis auf 50% unterstellt wird. Wenn diese Quote im Jahr 2012 erreicht ist, haben die laufenden Emissionen aus Pkw-Klimaanlagen mit 2400 t ihr Maximum (die gesamte Mobilkälte verursacht dann 2680 t). Danach gehen sie mit der Verringerung der Füllvolumina der Anlagen wieder leicht zurück (vgl. Diagramm 20, oberste Flächengruppe).

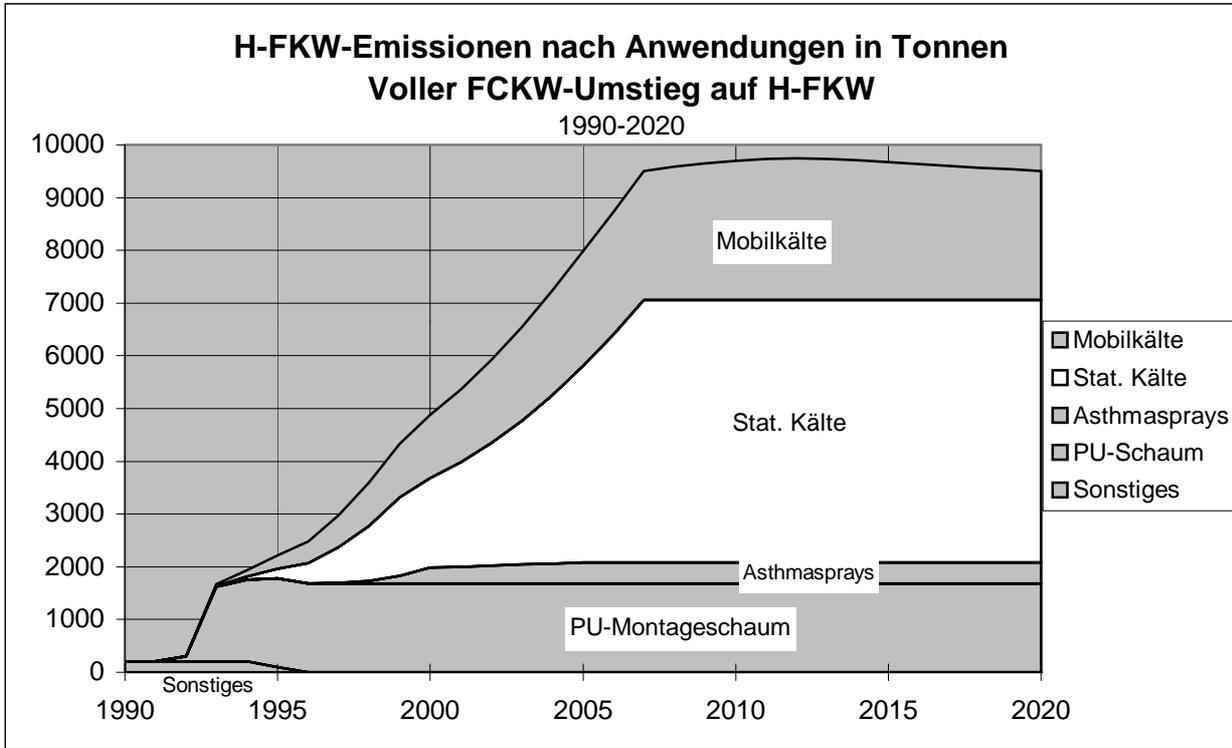


Diagramm 20: H-FKW-Emissionen nach Anwendungen in Tonnen 1990-2020 bei vollem H-FKW-Umstieg. Die Gesamtmenge steigt von 200 auf 9700 t jährlich. Bis 1999 sind PU-Montageschaum-Dosen größte Emissionsquelle, ab 2000 sind es Kältemittel aus stationärer Anwendung. Diese machen ab ca. 2007 über die Hälfte aller H-FKW-Emissionen aus.

4. Asthmasprays enthalten erst im Jahr 2000 mehrheitlich H-FKW statt FCKW. Da die inländischen Emissionen zur Zeit 400 t FCKW betragen, ist für den Fall einer 1:1-Substitution mit der gleichen Emissionsmenge von H-FKW (R134a, R227) zu rechnen.

5. Sonstige Emissionen von nennenswertem Umfang gehören der Vergangenheit an. Es handelte sich um ca. 200 t des H-FKW 23 (Trifluormethan), die vor 1995 jährlich aus unerwünschter Nebenreaktion der großtechnischen Herstellung des H-FCKW 22 in die Atmosphäre entwichen. Sie werden seitdem aufgefangen und thermisch gespalten.

Beitrag zum Treibhauseffekt

Die Berechnung des Beitrags zum Treibhauseffekt durch H-FKW-Emissionen mittels der spezifischen GWP-Werte (s. Tabelle 35) ergibt einen Maximalwert von nahezu 18 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente (17,85 Mio. t) im Jahr 2012. Dem Diagramm 21 zufolge trägt die stationäre Kälte zum Treibhauseffekt viel mehr bei, als ihrem Anteil an der Emissionsmenge (Gewicht) entspricht. Das liegt daran, daß die hier vornehmlich eingesetzten Kältemischungen sehr viel R143a und R125 enthalten, die hohe GWP-Werte haben. Auffällig ist der hohe Anteil der "Sonstigen Emissionen" mit über 2 Mio. t CO₂-Äquivalente. Grund: R23 hat mit 11 700 den höchsten GWP-Wert aller H-FKW.

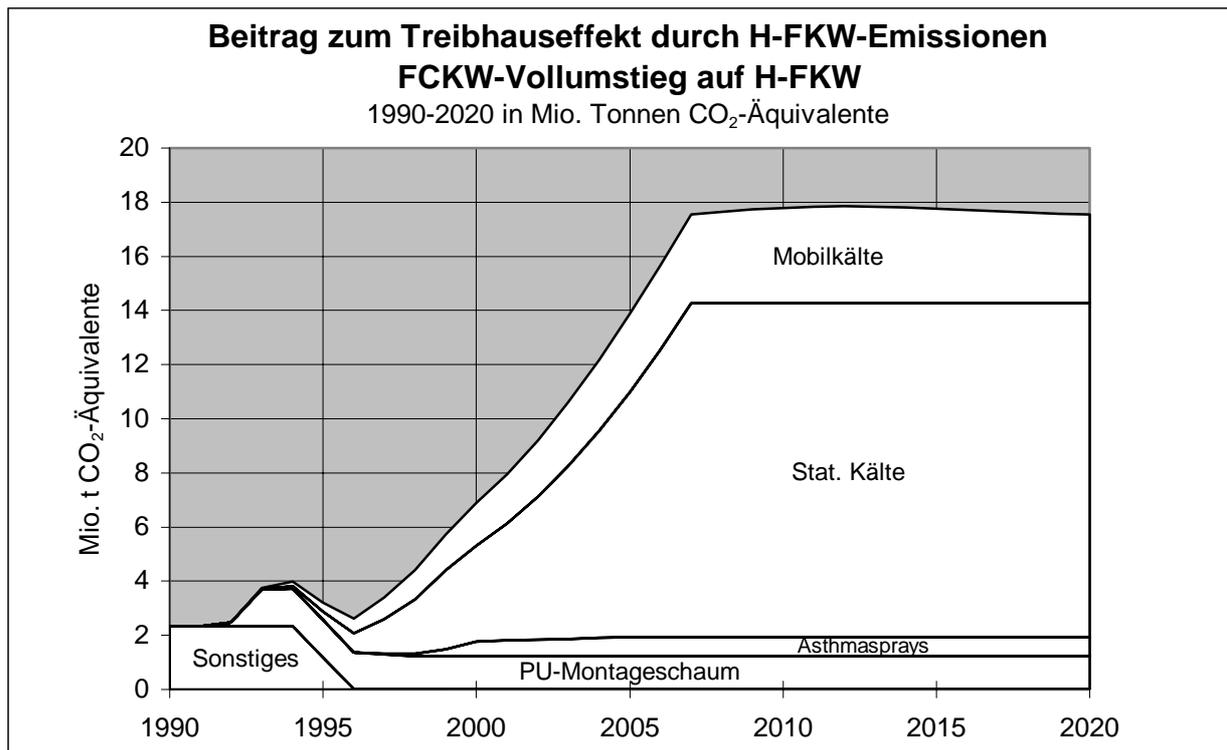


Diagramm 21: Die Umrechnung der H-FKW-Emissionen mittels der spezifischen GWP-Werte ergibt einen Gesamtbeitrag zum Treibhauseffekt von fast 18 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente ab 2007. Den größten, gegenüber dem Gewichtsanteil überproportionalen Einzelbeitrag liefert die stationäre Kältetechnik, die H-FKW mit hohem Treibhauspotential einsetzt.

Emissionsmodell "Teilweiser H-FKW-Umstieg": Zusammenfassung

Die wichtigsten Unterschiede zum ersten Modell sind folgende:

1. Innerhalb der stationären Kälte beträgt - vor allem wegen der Zunahme indirekter Kühlsysteme auf Ammoniakbasis - die Umstiegsquote auf H-FKW beim Kältemittelbestand statt 100% bei
 - Gebäude- und Raumklimatisierung: 90%,
 - Gewerbekälte und industrieller Klimatisierung 70%,
 - Industriekälte: 10%.
2. Innerhalb der Mobilkälte findet bei den Pkw-Klimaanlagen ab 2005 stufenweise der totale Wiederausstieg aus dem Kältemittel R134a zugunsten von CO₂ statt.
3. Bei den Asthmasprays beträgt die Umstiegsquote wegen des Anstiegs der Pulverinhalation nur rd. die Hälfte (52,5%).
4. PU-Montageschaum wird statt R134a bis zum Jahr 2015 vollständig mit R152a getrieben, dessen GWP-Wert mit 140 nur 11% des Wertes von R134a beträgt.

Verminderte Emissionsmengen

Diese Maßnahmen zusammen führen zu einer geringeren Menge und damit zu einem geringeren Treibhauspotential der H-FKW-Emissionen.

Die Gesamtemissionen in Gewichtseinheiten betragen im Jahr 2020 statt 9500 t nur noch 5033 t oder 53% der früheren Masse (vgl. Diagramm 22 und Tabelle 37).

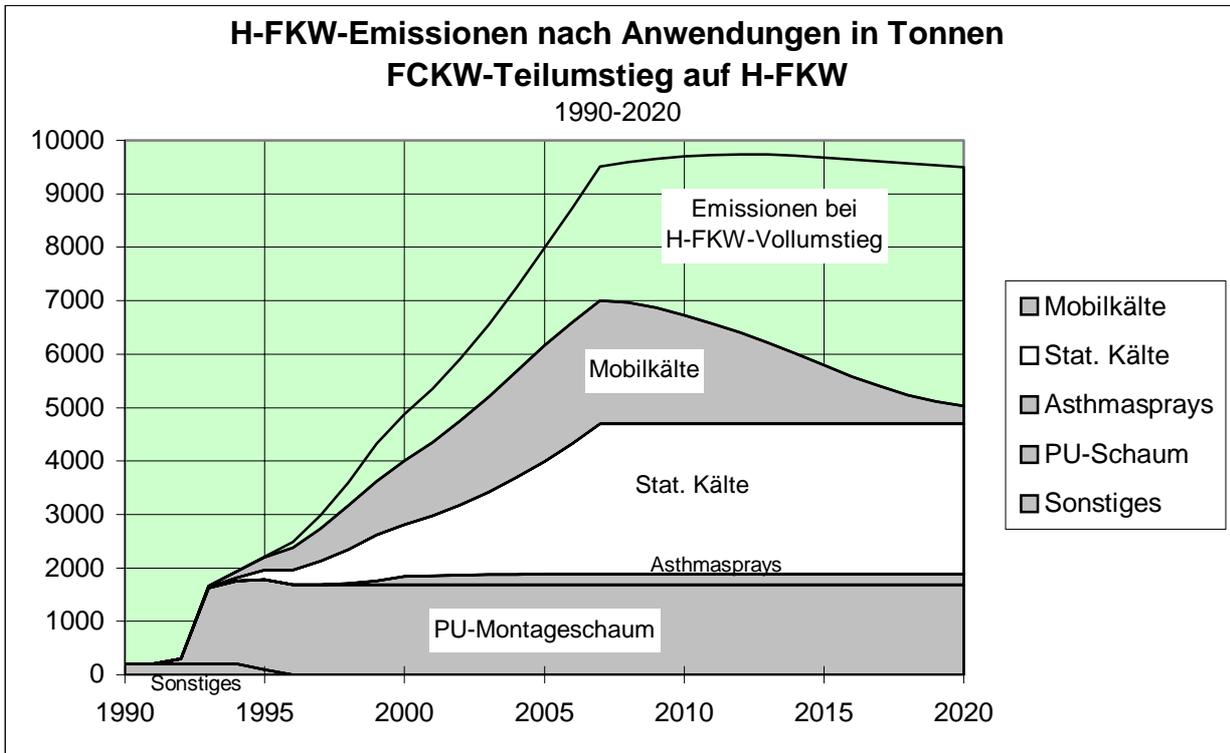


Diagramm 22: H-FKW-Emissionen nach Anwendungen bei H-FKW-Teilumstieg 1990-2020 in Tonnen. Der Abstand zum H-FKW-Vollumstieg (oberste Kurve) wird vor allem durch geringere Emissionen aus der stationären Kältetechnik und ab 2005 auch aus der Mobilkälte (Pkw-Klimaanlagen) erzeugt.

Tab. 37: H-FKW-Emissionen nach Anwendungen in Tonnen 1990-2020.
Teilweiser H-FKW-Umstieg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
PU-Schaum*	0	1680	1680	1680	1680	1680	1680
Asthmasprays	0	0	160	210	210	210	210
Mobilkälte	0	247	1191	2163	2030	1098	335
Stationäre Kälte	0	187	969	2105	2807	2807	2807
Sonstiges	200	100	1,7	1,2	1,2	1,2	1,2
Summe gerundet	200	2214	4002	6160	6728	5796	5033

* Beim PU-Montageschaum wird gegenüber Modell A nicht die Menge, sondern die Zusammensetzung der Treibmittel verändert.

1. In der stationären Kältetechnik betragen die Emissionen ab dem Jahr 2007 statt 4982 t nur noch 2807 t (56,3%).
2. Die Emissionen aus Asthmasprays gehen von 400 auf 210 t zurück (52,5%).
3. Ab 2005 sinken die H-FKW-Emissionen aus Pkw-Klimaanlagen kontinuierlich. Bis 2020 weist die ganze Mobilkälte statt 2441 t nur noch 335 t Emissionen auf (13,7%).
4. Die Emissionsmenge beim PU-Schaum bleibt zwar gleich. Es verändert sich aber das Treibhauspotential auf nur noch 20% des Wertes im ersten Modell.

Geringerer Beitrag zum Treibhauseffekt

Der Beitrag der H-FKW-Emissionen zum Treibhauseffekt liegt im zweiten Modell ("Teilweiser H-FKW-Umstieg") im Jahr 2020 statt bei 17,5 Mio. nur bei 8,1 Mio. t CO₂-Äquivalente. Diese Verringerung auf über die Hälfte (auf 46%) machen Diagramm 23 und Tabelle 38 deutlich.

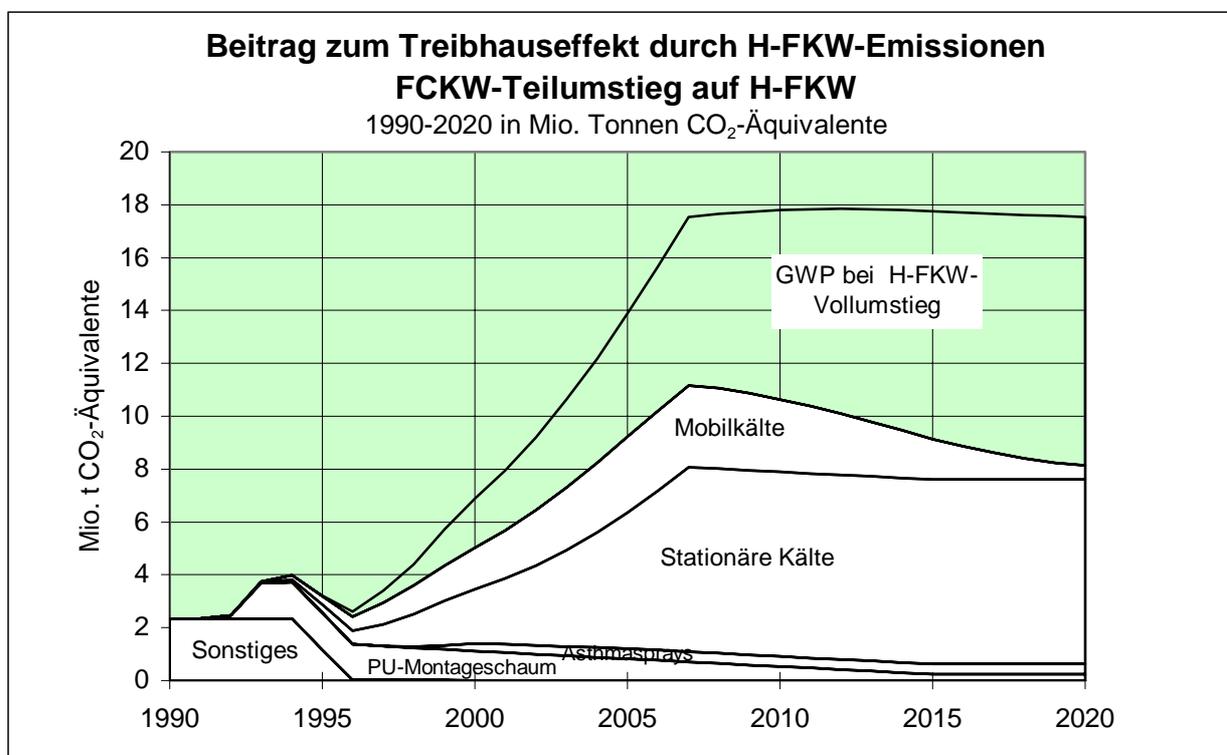


Diagramm 23: Beitrag zum Treibhauseffekt durch H-FKW-Emissionen 1990-2020 bei FCKW-Teilumstieg auf H-FKW. Im Jahr 2020 sind es statt 17,5 Mio. (Vollumstieg) nur 8,1 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente. Die Differenz zur obersten Kurve "Vollumstieg" markiert die Verminderung auf über die Hälfte auf noch 46%.

Insgesamt sinkt der Beitrag zum Treibhauseffekt stärker als die Masse der Emissionen in Gewichtseinheiten. Der Hauptgrund für diesen Umstand ist das geringe Treibhauspotential der - gleichbleibenden - Menge von PU-Schaum-Treibmitteln aufgrund veränderter Zusammensetzung (R152a statt R134a).

Tab. 38: H-FKW-Emissionen nach Beitrag zum Treibhauseffekt in Mio. t CO₂-Äquivalente 1990-2020.

Voller und teilweiser H-FKW-Umstieg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Voller Umstieg	2,34	3,20	6,88	13,90	17,79	17,76	17,54
Teilw. Umstieg	2,34	3,20	5,03	9,23	10,68	9,14	8,14

Tabelle 38 vergleicht die Szenarien "Voller H-FKW-Umstieg" und "Teilweiser H-FKW-Umstieg" hinsichtlich des Beitrags zum Treibhauseffekt durch die H-FKW-Emissionen. Die Unterschiede, die im Jahr 2000 noch nicht sehr groß sind, weiten sich bis 2020 auf über 50% Abstand der Werte des ersten Modells gegenüber denen des zweiten aus.

Anhang

Die Jahre 1990 bis 1995

Die Tabellen 4a und 4b dienen der Vervollständigung der umweltrelevanten H-FKW-Emissionsdaten für die einzelnen Jahre zwischen 1990 und 1995.

Emissionen 1990-1995

Tab. 38a: H-FKW-Emissionen nach Anwendungen in Tonnen 1990-1995						
	1990	1991	1992	1993	1994	1995
PU-Schaum	0	0	100	1428	1554	1680
Asthmasprays	0	0	0	0	0	0
Mobilkälte	0	0	2	31	127	247
Stationäre Kälte	0	0	0	6	61	187
Sonstiges	200	200	200	200	200	100
<i>Summe</i>	<i>200</i>	<i>200</i>	<i>302</i>	<i>1665</i>	<i>1942</i>	<i>2214</i>

Anmerkung: Zwischen den Modellen "Voller" und "Teilweiser H-FKW-Umstieg" besteht bis 1995 noch keine Differenz bezüglich der Emissionen.

Beiträge zum Treibhauseffekt 1990-1995

Tab. 38b: H-FKW-Emissionen nach Beitrag zum Treibhauseffekt in Mio. t CO₂-Äquivalente 1990-1995						
	1990	1991	1992	1993	1994	1995
Mio. t CO ₂ -Äquiv.	2,34	2,34	2,47	3,75	3,98	3,20

1. Kältemittel für stationäre Anlagen

Unter stationären Kälteanlagen werden hier alle kältetechnischen Systeme verstanden, die nicht in oder an Fahrzeugen (Mobilkälte) montiert sind.

Es handelt sich um vier Hauptbereiche:

1. Gewerbekälte: Kühlregale, -vitrinen, -theken, -räume in Supermärkten, Metzgereien, Bäckereien, Gaststätten, Großküchen usw.
2. Industriekälte: Kühlhäuser, Schlachthöfe, Brauereien, Molkereien, Kühlprozesse in der Chemischen und allgemeinen Industrie, Klimatisierung von Arbeitsstätten.
3. Klimatisierung von Gebäuden und Räumen ("Komfort-Klima").
4. Haushaltskälte: Kühl- und Gefriertruhen, Wärmepumpen.

Aktueller und künftiger Kältemittelbestand

Da Kältemittlemissionen aus dem Bestand entweichen und Verbräuche der Auffüllung und Erhaltung des Bestandes dienen, ist dessen Abschätzung zuerst nötig. Der in Anlagen umlaufende Bestand von H-FKW-Kältemitteln ist zur Zeit noch klein gegenüber voll- und teilhalogenierten FCKW. Zur Ermittlung des künftig möglichen Bestandes von H-FKW-Kältemitteln, welche die FCKW ersetzen, wird angenommen:

Bei der stationären Kälte gibt es keine Zunahme der insgesamt erforderlichen Kälteleistung, so daß der FCKW-Altbestand vor der Umstellung die Obergrenze des H-FKW-Bestands nach der Umstellung ist.

Der Altbestand ist dann der H-FKW-Zielbestand, der innerhalb der gesetzlichen Übergangsfristen aufzufüllen ist¹⁵.

Bestandsschätzungen für FCKW-Kältemittel sind vorhanden, auch wenn die Zahlen zum Teil deutlich untereinander abweichen. Nach jüngeren Quellen (Lotz 1993; FKW 1995; Öko-Recherche 1995) sind in stationären Kälteanlagen ca. 48 000 t Kältemittel gebunkert, die für einen Ersatz durch H-FKW oder andere Alternativen infragekommen.

Auf die Hauptbereiche¹⁶ entfallen etwa folgende Mengen:

- | | |
|------------------------------|----------------------------------|
| 1. Gewerbekälte | 25 000 t (vorw. R22, R12, R502). |
| 2. Industriekälte und -klima | 20 000 t (vorw. R22, R12, R502). |
| 3. Gebäude- und Raumklima | 3 000 t (vorw. R22, R11). |

Nach einem Exkurs über Kältemischungen werden die Stationär-Kältemittel im Modell A "Voller H-FKW-Umstieg" und dann im Modell B "Partieller H-FKW-Umstieg" untersucht.

Exkurs: Kältemischungen aus einzelnen H-FKW

¹⁵ Die unterschiedlichen Dichten von FCKW und FKW werden nicht berücksichtigt, da sonst auch die unterschiedlichen Verdampfungswärmen einbezogen werden müßten. Allgemein werden in der Kältetechnik FCKW zu FKW in gleichgroß erforderlichen Massen umgerechnet (Peters 1996).

¹⁶ In der Haushaltskälte sind zwar ebenfalls noch große Mengen FCKW-Kältemittel gespeichert, nämlich in Kühl- und Gefriergeräten und Heiz- und Warmwasserwärmepumpen. Die Bestände in Haushaltskühlgeräten werden jedoch nicht mit H-FKW, sondern mit Isobutan aufgefüllt werden. Auch bei Heizungs-Wärmepumpen ist die Befüllung neuer Anlagen mit Propan statt mit 134a bereits im Gange (Blomberg 1996). Warmwasserpumpen werden, da sie in Innenräumen stehen, dafür länger brauchen (KKW 1996).

Kälte im Temperaturbereich zwischen - 50 und + 20 °C wird im Leistungsbereich bis 1 MW fast ausschließlich mit Kompressionsmaschinen im Kaltdampfprozeß erzeugt. Ein gasförmiges Kältemittel wird durch eine Verdichtermaschine auf hohen Druck (üblich bis zu 25 bar) und hohe Temperatur gebracht. Infolge des Temperaturgefälles zur Umgebung gibt es Wärme ab und verflüssigt sich. Beim Entspannen verdampft das Kältemittel und entzieht die dafür notwendige Wärme einer Kühlstelle.

Anforderungen an Kältemittel

Zu den wichtigsten technischen Anforderungen an das Kältemittel zählt, daß es innerhalb der Temperaturspanne zwischen Wärmeaufnahme und -abgabe zweiphasig vorliegt und gegenüber dem stetigen Druck- und Temperaturwechsel in der Kälteanlage stabil genug ist. Diese Anforderungen erfüllen ausgezeichnet die FCKW.

Zwar sind Propan, Propen, Butan und Ammoniak thermodynamisch den FCKW als Kältemittel gleichwertig, zumal sie im gleichen Temperaturbereich zweiphasig sind. Kälteerzeugung durch brennbare Kohlenwasserstoffe oder das bedingt brennbare, toxische Ammoniak erfordert aber aus Sicherheitsgründen meist indirekte Kühlsysteme, bei denen ein primärer Kälteprozeß einen sekundären Kälteträgerkreislauf kühlt. Indirekte Kühlung galt Ende der 80er Jahre gemessen am Direktverfahren mit FCKW als energetisch und technologisch unausgereift und trat kaum in Konkurrenz mit ihm.

Vor diesem Hintergrund zielten die Bemühungen der Chemischen Industrie Ende der 80er Jahre darauf, als chlorfreie Nachfolgestoffe für die FCKW wieder unbrennbare "Sicherheitskältemittel" für das Direktverfahren zu entwickeln, die dem Anwender einen Kältemittelaustausch in der installierten Anlage gestatten. R134a erfüllte diese Anforderungen weitgehend für den Einsatzbereich von R12. Seit 1991 wurde R134a in neue Autoklimaanlagen gefüllt, die größte Anwendung von R12 und jetzt von R134a.

Ersatz von R22 und R502 durch Kältemischungen

Im Unterschied zur Mobilkälte dominiert in der stationären Kälte mit ca. 70% des Bestandes der H-FCKW R22, der bei größeren Anlagen wirtschaftlicher als R12 ist und tiefere Kühltemperaturen gestattet. Tiefkühlung (< -15 °C) wiederum wird herkömmlicherweise mit dem azeotropen Gemisch R502 betrieben, das zu 51,2% aus FCKW R115 und zu 48,8% wiederum aus R22 besteht - beide siedeln bei ca. - 40 °C.

Die Besonderheit beim Ersatz von R22 und R502 besteht darin, daß fluorierete Methan- und Ethanderivate mit vergleichbarem Eigenschaftsprofil nicht als "Einstoffe" verfügbar sind. Die H-FKW mit vergleichbarem Siedepunkt sind entweder brennbar (R32, R143a) oder erfordern (R125) wegen hoher Drücke großen technischen Aufwand (Bitzer 1995, 11). Die seit 1992 von vielen Kältemittelherstellern angebotenen H-FKW-Substitute für R22 und R502 sind darum durchweg Mischungen, und zwar vor allem aus den drei Komponenten R32, R125 und R143a - mit oder ohne Beigabe von R134a. Durch das Mischen kommen technische Nachteile bzw. die Brennbarkeit einzelner Komponenten nicht mehr zum Tragen. Nachteilig kann sich das unterschiedliche Siedeverhalten der H-FKW-Komponenten auswirken, so daß sich die Dampfphase anders zusammensetzt als die flüssige (Problem des "Temperaturgleits") (FKW 1995, 13).

Aus der anfänglichen Vielzahl von Kältemischungen (BMU 1994, 28-29) zeichnen sich vier Hauptformulierungen ab: R404A, R507, R407C und R410A (Diagramm 24).

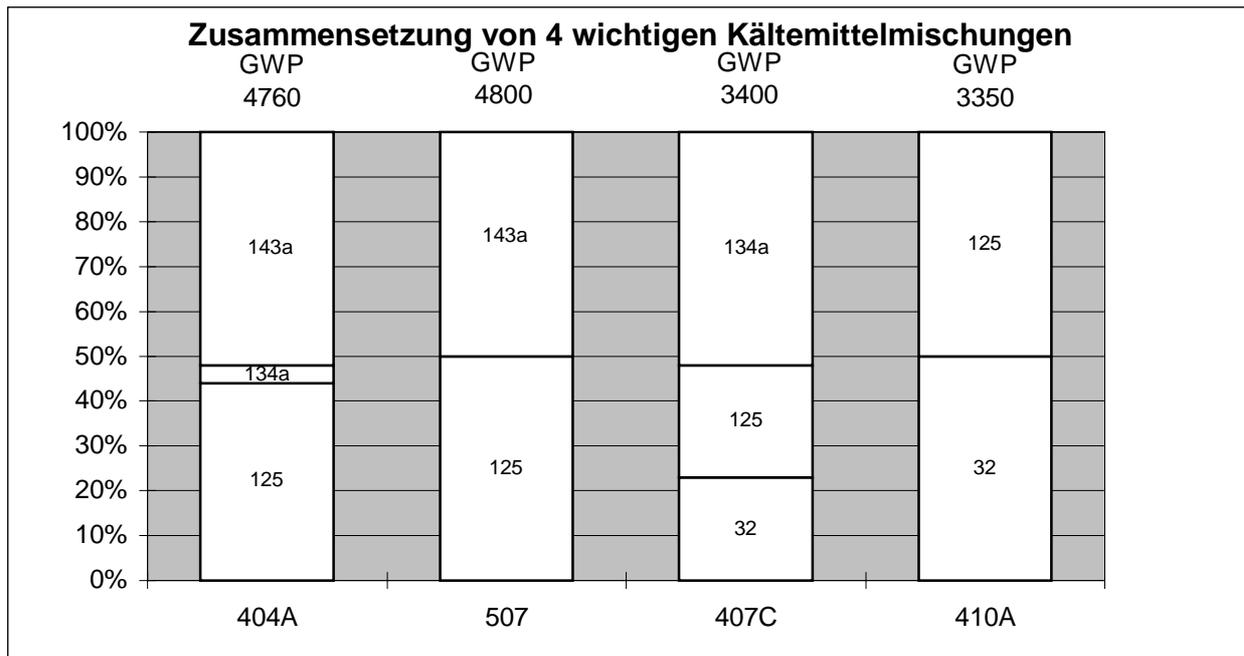


Diagramm 24: Zusammensetzung der vier wichtigsten H-FKW-Kältemischungen für den Ersatz von R502 und R22. Alle Mischungen enthalten brennbare Komponenten, entweder R143a oder R32, die durch die Zugaben schwerbrennbarer Bestandteile neutralisiert werden. Entsprechend dem hohen GWP von 143a (3800) haben die beiden links angeführten Kältemittel ein doppelt so hohes GWP wie die beiden rechten, die R32 mit dem GWP von 650 enthalten.

R404A besteht aus R143a (52%), R125 (44%) und R134a (4%). R507C setzt sich zu je 50% aus R143a und R125 zusammen (Diagramm 24). Beide wurden für den Ersatz von R502 konzipiert, das seit 1995 nicht mehr produziert und in Neuanlagen gefüllt werden darf. Viele Anwender machten die Erfahrung, daß sie mit 404A/507 nicht nur den kleinen Bereich von R502 abdecken können, sondern auch das weit größere Spektrum von R22, ja zum Teil sogar von R12. Sie empfinden die Erzeugung ihres gesamten Kältebedarfs mit einem einzigen Kältemittel als wichtigen Vorteil.

R407C. Das speziell für den Ersatz von R22 entwickelte Gemisch auf Basis von R32 (23%), R125 (25%) und R134a (52%) wird bisher nur in kleinen Mengen verkauft, weil R22 in Neuanlagen erst ab dem Jahr 2000 verboten ist und danach mit einer Übergangsfrist für den Ausstieg aus Altanlagen zu rechnen ist¹⁷. R407C gilt als Kältemittel für die Gebäude- und Raumklimatisierung.

R410A ist ein Gemisch aus R32 (50%) und R125 (50%), das besonders in den USA als R22-Nachfolger diskutiert wird. Sein Merkmal ist eine im Vergleich zu R22 bis zu 50% höhere Kälteleistung, allerdings mit der Konsequenz eines deutlichen Anstiegs der Drucklagen über die üblichen 25 bar hinaus bis zu 35 bar (Renz 1996). Das heißt, daß dieses Kältemittel neue Bauteile braucht, von denen 1996 erst Prototypen verfügbar waren. Thermodynamisch weist R410A so viele Vorteile auf, daß es künftig einen größeren Teil des derzeitigen R22-Bestands ersetzen könnte als R407C.

A: Modell Voller H-FKW-Umstieg

1.1 Die Zusammensetzung der Kältemittel im H-FKW-Zielbestand

¹⁷ Der Zeitpunkt für den R22-Ausstieg aus Altanlagen ist, da er politisch gesetzt wird, z.Zt. nicht absehbar. Die nachfolgend in dieser Studie aus praktischen Gründen verwendete Frist "Ende 2007" ist nur mit Einschränkungen zu nehmen und stellt keinen autorisierten Vorgriff auf spätere Entscheidungen dar.

Aus der alten Kältemittelzusammensetzung läßt sich wegen der Verschiebungen in der R22- und R502-Substitution (s. Exkurs) nicht ohne weiteres die neue ableiten. Zwar gilt für R22 und R502 generell der langfristige Ersatz durch Kältemischungen. Welche das im einzelnen sein werden, ist wegen ihrer unterschiedlich hohen Treibhauspotentiale wichtig, steht aber zur Zeit noch nicht fest.

Eine Expertenbefragung (Befragung Kältemittel) ergab zwar keinen allgemeinen Konsens. Doch verantwortet diese Studie folgende Prognose für die relativen Anteile des Zielbestands im Fall eines vollen FCKW-Umstiegs auf H-FKW (Diagramm 25):

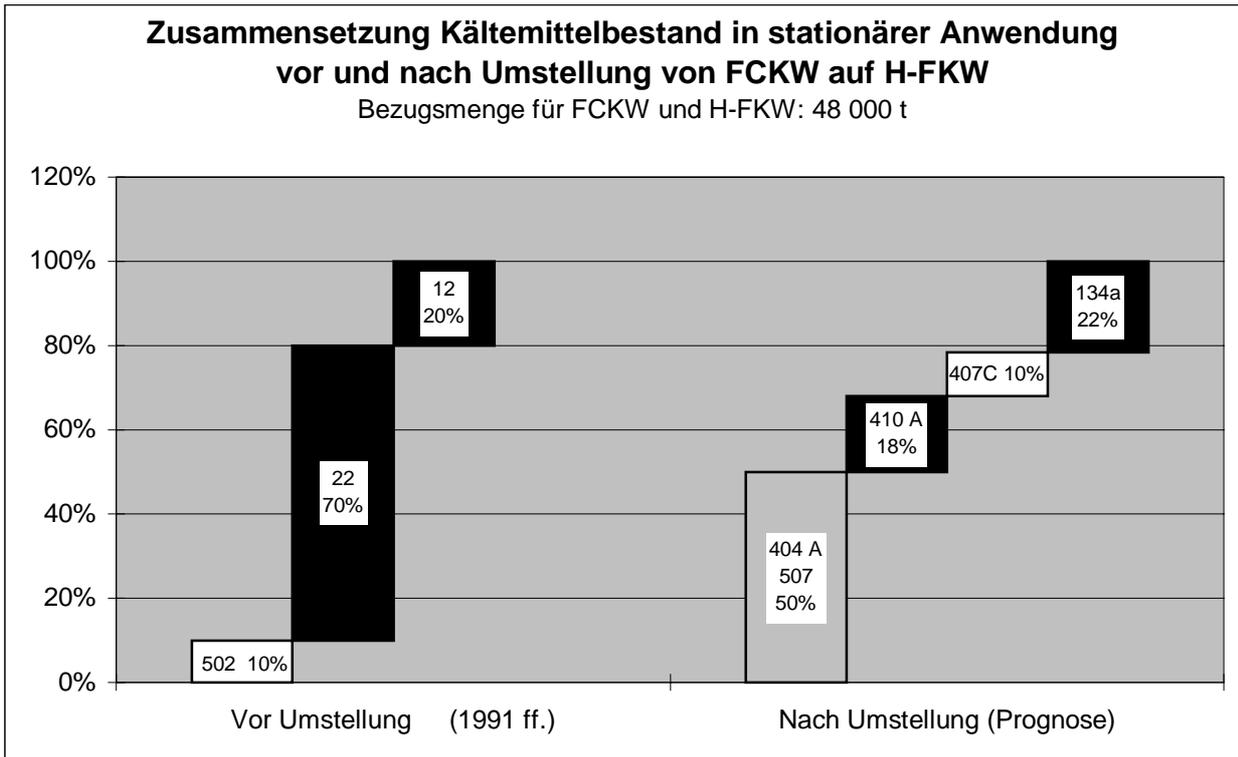


Diagramm 25: Zusammensetzung des stationären Kältemittelbestands vor und nach voller Umstellung von FCKW auf H-FKW. Prognose gemäß Kältemittel- und Verdichterhersteller. Hauptfavorit ist R404A, das hier mit R507 zusammengefaßt ist. Die R12-Substitution geschieht überwiegend durch R134a, das auch R11 ablöst. Um den von R404A/507 nicht besetzten Platz des R22-Ersatzes wird ein Wettbewerb zwischen R410A und R407C erwartet. Sonstige Kältemittel dürften keine große Rolle spielen. Im Diagramm entsprechen die unteren Bereiche tieferen Siedepunkten, die oberen höheren. Nicht aufgeführt sind bei den FCKW 2% R11, 1% R114 und 1% R13, bei den H-FKW fehlt 1% R23.

Einig sind sich alle neun befragten Unternehmen darin, daß der R12-Ersatz vor allem durch R134a geschieht.

In der R22-Substitution sehen acht der neun Unternehmen R404A oder R507 an der Spitze. Begründungen: 1. Frühzeitige Markverfügung. 2. Breites Anwendungsspektrum bis zum R12/R134a-Bereich hinauf, was dem Anwenderwunsch nach einem einzigen Kältemittel entgegenkommt. 3. Kein Temperaturgleit. R407C wird von der Mehrzahl der Befragten als Ersatzstoff für den oberen R22-Bereich eingestuft, d.h. als gut für Klimaanlage geeignet. Die Techniker unter den Befragten stört der hohe Temperaturgleit von 6 bis 7 °C.

R410A ist die umstrittenste Mischung, da sie erst in Prototypen erprobt ist. Skepsis besteht, ob die hohen Drücke und die durch den hohen R32-Anteil verursachte Brandgefahr technisch gemeistert werden können. Für den Fall einer technischen Lösung wird R410A eine größere Chance beim R22-Ersatz als R407C eingeräumt.

Demzufolge wird R404A/R507 langfristig die Hälfte des Kältemittelbestandes bilden und R134a ca. 20%, gemäß dem früheren Raum von R12. Die übrigen 30% werden sich R410A und R407C teilen, wobei R410A bessere Chancen hat.

Der "Einstoff" R23 wird nur eine Nische ausfüllen, und zwar als Nachfolger des industriellen Tiefstkuhl-FCKW R13.

Während in Diagramm 25 der Zielbestand der Kältemittel anteilmäßig dargestellt ist, versucht Tabelle 39, seine Obergrenze in absoluten Größen nach Gewerbe, Industrie und Klima aufzuschlüsseln. Außerdem sind die Umstellungszeiträume (FCKW-Ausstieg) aufgenommen und als Vorgriff die spezifischen Emissionsraten.

Tab. 39: Obergrenze des Zielbestands, Emissionsraten und Umstellungszeitraum für H-FKW-Kältemittel in stationärer Anwendung					
H-FKW-Typ	Anwendungs-Sektor	Emissions-rate	Zielbestand in Tonnen	Umstel-lungBeginn	Umstellung Abschluß
134a	Gewerbe	15%	5000	1993	1999
	Industrie	6%	4000	1993	1999
	Klima (allg.)	2%	1000	1993	1999
	Klima (Indust.)	2%	350	1993	2007
407C	Klima	2%	2000	1994	2007
	Gewerbe	15%	2000	1999	2007
	Industrie	6%	1000	1999	2007
404A/507	Gewerbe	15%	14000	1994	2007
	Industrie	6%	10000	1994	2007
410A	Gewerbe	15%	4000	1999	2007
	Industrie	6%	4300	1999	2007
23	Industrie (TK)	2%	350	1993	1999
Summe			48000		

Quellen: Zusammensetzung der Kältemittel: Befragung Kältemittel; FKW 1996a. Emissionswerte: Literatur - zuletzt FKW 1995, 96. Die Umstellungsfrist ist für FCKW z.T. schon gesetzlich fixiert, für H-FCKW wird sie hier mit 2007 angenommen. Klima (allg.) = Gebäude- und Raumklimatisierung; Klima (Indust.) = Klimatisierung in der Industrie; TK = Tiefstkuhlung.

1.2 Neuverbräuche von Kältemitteln bei vollem H-FKW-Umstieg

Auch in diesem Abschnitt wird unterstellt, daß der FCKW-Altbestand (s.o.) ausschließlich durch H-FKW aufgefüllt wird (Modell "Voller H-FKW-Umstieg").

Wenn erstens die stationäre Kälte ein Gleichgewichtssystem ohne Wachstum des absoluten Kältemittelbestands ist und zweitens der Export von befüllten Anlagen (seit der Verwendung von Butan in Kühlschränken) ignoriert werden kann, dann sind neue Verbräuche von H-FKW-Kältemitteln grundsätzlich dazu bestimmt, Emissionsverluste des umlaufenden Kältemittelbestands auszugleichen. Die Befüllung von Neuanlagen

wird in einem solchen System ganz durch rückgewonnene Kältemittel aus dem Verschrottungsjahrgang gedeckt und erhöht den jährlichen Neuverbrauch nicht. Neuverbrauch und jährliche Zufuhr sind somit zu unterscheiden. Neuverbrauch ist nur der Teil der Zufuhr, der aus neuproduzierten, nicht aus rückgewonnenen Kältemitteln besteht.

Diese Begrenzung des jährlichen Kältemittel-Neuverbrauchs auf Emissionsersatz hat eine wichtige Einschränkung. Sie gilt erst nach Erreichen des Zielbestands, d.h. nicht für die Zeit der FCKW-Substitution. Vor Erreichen des Zielbestands ist der Jahres-Neuverbrauch deutlich höher als der Emissionsersatz, weil die Gesamtheit der Anlagen zunächst einmal aufgefüllt werden muß. Das betrifft nicht nur neue, sondern auch und besonders von FCKW zu leerende Altanlagen. Dies zeigt Diagramm 26.

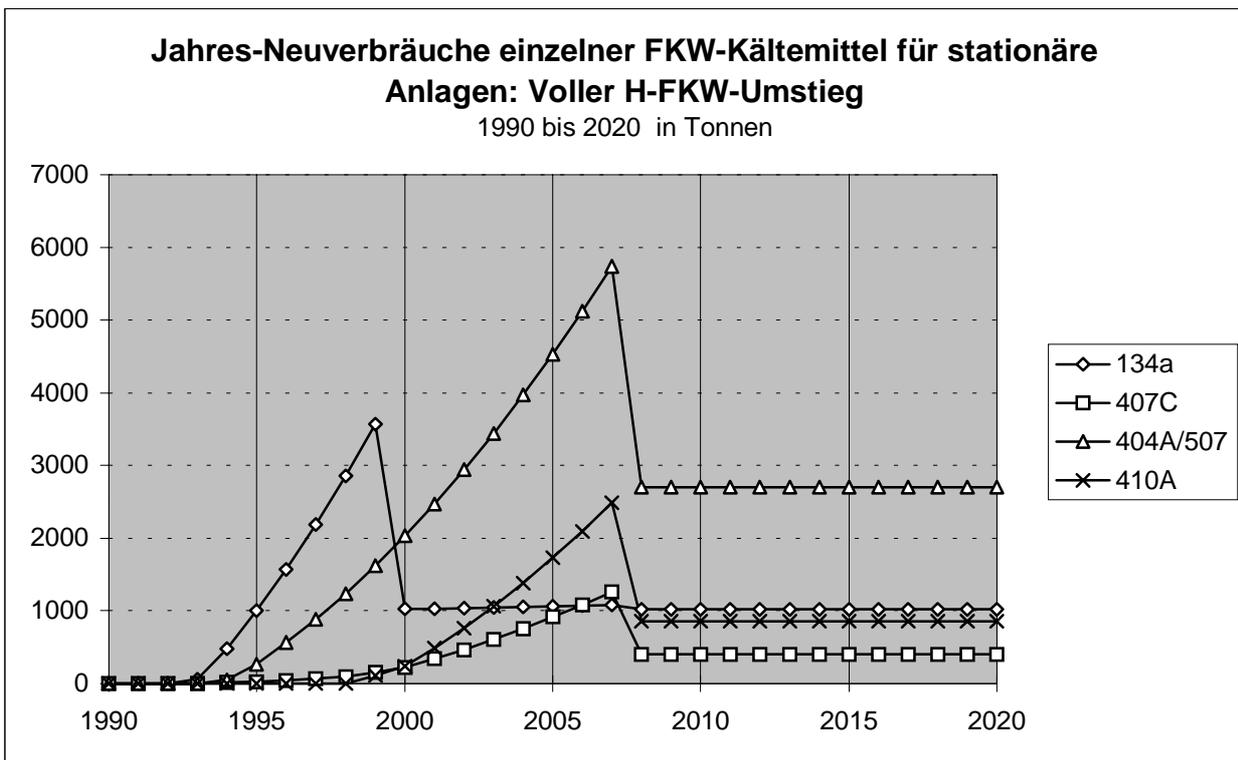


Diagramm 26: Jahres-Neuverbräuche einzelner H-FKW-Kältemittel für stationäre Anlagen bis 2020 bei vollem FCKW-Ersatz durch H-FKW. Nach steilen Anstiegen innerhalb der FCKW-Substitutionsfrist (hier mit 2007 angenommen) sinken die Verbräuche auf jeweils konstante Niveaus des reinen Emissionsersatzes ab. Neufüllungen, dies die Annahme, werden dann ganz durch rückgewonne Altkältemittel gedeckt. Verschrottungsemissionen sind nicht zum Zeitpunkt ihres realen Anfalls abgebildet, sondern in die laufenden Emissionen integriert.

Für alle vier Kältemitteltypen ist ein steiler Verbrauchsanstieg sichtbar, der von der Markteinführung bis zum Ende der Substitutionsfrist (Annahme: 2007) andauert. Da der durch R134a vorgenommene R12-Ersatz innerhalb von nur sechs Jahren abgeschlossen sein muß, ist seine Verbrauchskurve am steilsten. Sie erreicht 1999 ihren Gipfel bei über 3500 Tonnen, um dann auf eine konstante 1000-Tonnen-Linie abzusinken.

Die Kältemischungen 404A/507, 407C und 410A ersetzen vor allem R22 und haben daher bis zum Erreichen ihrer konstanten Verbrauchslinien mehr Zeit - hier bis zum Jahr 2007. Bis dahin weisen ihre Verbräuche unterschiedlich steile Anstiege auf verschiedene Höhen auf. Nach dem Gipfeljahr 2007 vermindern sie sich im Mittel auf die Hälfte, weil es nicht mehr Bestände zu erhöhen, sondern nur noch Emissionen zu er-

setzen gilt. Die Niveaus sind durch die relativen Anteile der einzelnen Kältemittel am Gesamtbestand bestimmt und daher für R404A/R507 am höchsten.

1.3 H-FKW-Kältemittlemissionen bei vollem H-FKW-Umstieg

Die hier verwendeten Emissionsraten 15% bei Gewerbekälte, 6% bei Industriekälte und 2% bei Klimatisierung und industrieller Tiefstkühlung sind in der Fachwelt für die heutigen Anlagen kaum umstritten (vgl. FKW 1995, 96; annähernd Lotz 1993, Tab.3; Haaf u.a. 1996; Peters 1996). Allerdings ist in Zukunft mit niedrigeren Kältemittelverlusten zu rechnen (Befragung Kältemittel). Grund ist vor allem die weiter ansteigende Sorgfalt des Kältehandwerks bei Montage und Wartung, die sich günstig auf die im Gewerbe dominierenden emissionsträchtigen Verbund-Kältesysteme auswirken dürfte.

Trotzdem gelten im vorliegenden Modell konstante Emissionsraten. Der Grund dafür ist nicht Ignoranz gegenüber der Verminderung von Emissionen aus dem laufenden Betrieb, sondern die Berücksichtigung der Kältemittelverluste bei der Anlagenverschrottung. Diese treten zwar nicht aktuell auf, sondern, da H-FKW-Kältemittel überwiegend in neue Anlagen mit einer Lebensdauer bis zu 15 Jahren gefüllt werden, verstärkt erst in der zweiten Hälfte des nächsten Jahrzehnts. Doch ist ihre Größenordnung beachtlich; sie wird von Experten (Lotz 1993, ebd.) auch im Falle der Rückgewinnung auf ca. 25% der Erstfüllung geschätzt. Um diese Verschrottungsemissionen nicht zusätzlich ansetzen zu müssen, werden sie mit den sinkenden Emissionen aus dem laufenden Anlagenbetrieb zu konstant bleibenden Emissionsraten "verrechnet", wodurch sich ihre Zeitverteilung, aber nicht ihre Gesamtmenge ändert.

Durch Anwendung der in Tabelle 39 für die einzelnen Kältemittel nach den Sektoren Gewerbe, Industrie und Klima spezifizierten Emissionsraten auf die Kältemittelbestände ergeben sich die absoluten Emissionen in Tabelle 40. Die Summenzeile zeigt bei den Emissionen einen steilen Anstieg von 187 t (1995) auf 4982 t (2020).

Tab. 40: Emissionen der verschiedenen FKW-Kältemittel 1995 bis 2010 - Schätzungen in Tonnen - Voller H-FKW-Umstieg								
Kälte-Mittel	1995		2000		2005		2010	
	Bestand	Emission	Bestand	Emission	Bestand	Emission	Bestand	Emission
134a	1480	149	10028	1011	10220	1014	10350	1007
404/507	319	36	5581	628	17422	1960	24000	2700
410A	0	0	341	35	4889	505	8300	858
407C	36	1	561	20	3207	239	5000	400
23	50	1	350	7	350	7	350	7
Summe	1885	187	16862	1701	36088	3726	48000	4982

Quellen: Eigenberechnungen unter Verwendung der Werte von Tabelle 39.

Das Diagramm 27 verdeutlicht die Zunahme der H-FKW-Emissionen von "Null" im Jahre 1993 auf fast 5000 Tonnen im Jahre 2010.

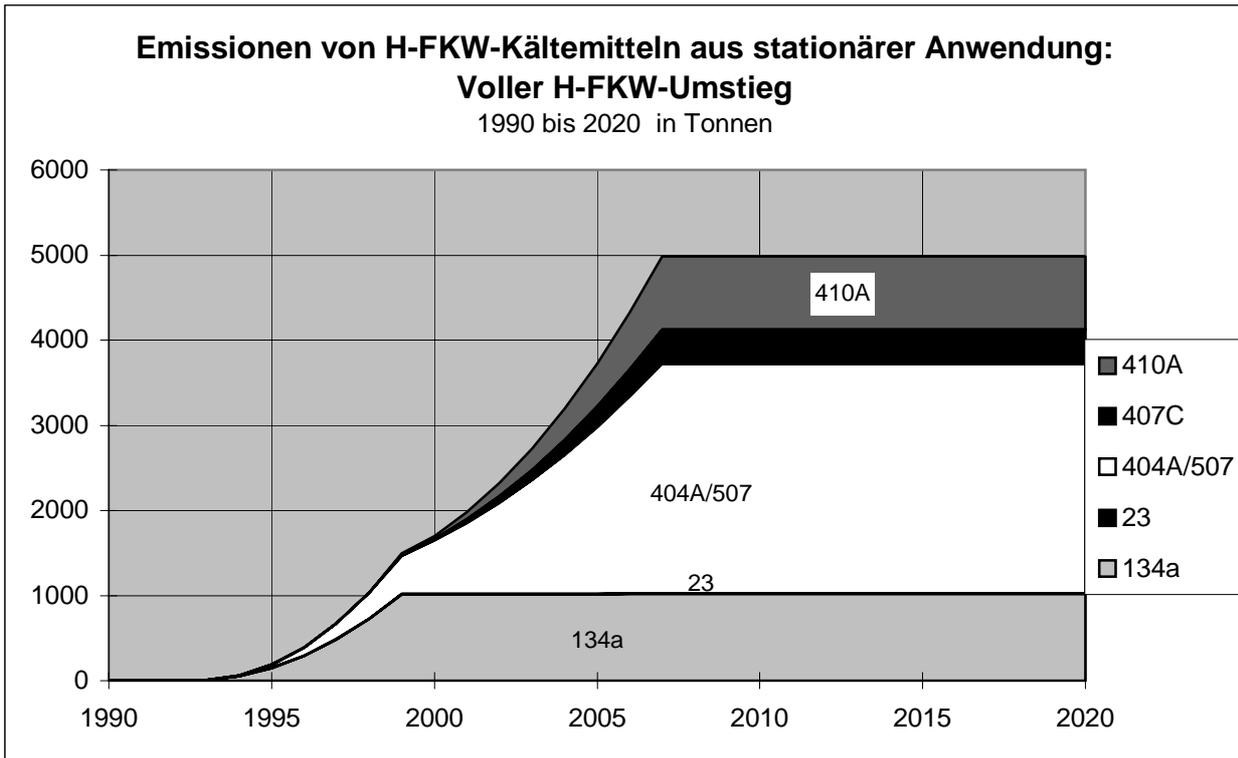


Diagramm 27: Emissionen von H-FKW-Kältemitteln aus stationärer Anwendung. Prognose bis 2020 bei vollem H-FKW-Umstieg. Bis 2000 überwiegen die Emissionen des R12-Nachfolgers R134a, der bereits 1998 eine konstante Linie bei ca. 1000 Tonnen erreicht. Danach setzen die Emissionen der Mischungen 404A/507, 407C und 410A bis 2007 zu einem steilen Anstieg auf ca. 4000 Jahrestonnen an, ein Niveau, auf dem sie - voraussetzungsgemäß - bleiben.

Als bevorzugter chlorfreier Ersatzstoff für R12 realisiert R134a seinen Anstieg zur konstanten Emissionslinie, die bei ca. 1010 Tonnen liegt, bereits 1999. Die drei Kältemischungen, die den länger erlaubten R22 ersetzen, erreichen ihre Maximalemissionen später - hier 2007. Zusammen kommen sie dann auf fast 4000 Tonnen. Das Tiefstkältemittel R23 fällt mengenmäßig den "großen Vier" gegenüber kaum ins Gewicht. Im Diagramm 27 sind seine Emissionen kaum darstellbar.

Relativierend ist anzumerken, daß es sich vom Standpunkt des Klimaschutzes nicht um neue Belastungen handelt, sondern daß von 1993 bis 2007 die klimawirksamen FCKW durch die - ihnen gegenüber weniger klimawirksamen - H-FKW ausgetauscht werden. Anzumerken bleibt aber, daß durch die H-FKW-Einführung die Chance eines Totalausstiegs aus treibhauswirksamen Stoffen im Kältesektor vertan wird.

B: Modell Partieller H-FKW-Umstieg

1.4 Trend zu Ammoniak und Kohlenwasserstoffen

Ein 100%-iger Ersatz der FCKW- und H-FCKW-Kältemittel durch H-FKW ist keine realistische Prognose. Lediglich im Bereich neuer Gebäudeklimaanlagen (Komfortklima) sind R134a und R407 C die Regel (Trane 1996, Carrier 1996) und das Kältemittel Ammoniak die Ausnahme (Sulzer-Escher-Wyss 1996).

Dagegen ist seit Mitte der 90er Jahre in der Gewerbekälte eine Hinwendung zu Kältemitteln festzustellen, die weder wegen Ozonschicht- noch Klimabelastung unter Kritik stehen. Im verbrauchernahen Bereich der Gewerbekälte (vor allem Lebensmittelmärkte, kk 6/1996, 390), werden bei Neubauten zunehmend indirekte Kühlsysteme installiert, deren Primärkreislauf mit Kohlenwasserstoffen (Propan, Propen) oder Ammoniak (NH_3) betrieben wird. Der Vorteil ist stets eine Verringerung der Kältemittelmenge - und damit der Emissionen um ca. 90% gegenüber dem Direktverfahren. Denn der lange und leckageanfällige Weg des Kältemittels durch das weitverzweigte Rohrleitungsnetz der Verbundkälteanlage entfällt. Der Kältetransport geschieht durch eine Kühlsole aus Wasser mit organischen oder anorganischen Zusätzen (zur Senkung des Gefrierpunkts) oder neuerdings mit dem latenten Kälteträger Flo-Ice (Paul 1996, 284).

Damit ist bei indirekter Kühlung auch das TEWI (Total Equivalent Warming Impact), d.h. die Summe aus direktem Beitrag (emittiertes Kältemittel) und indirektem Beitrag (Stromverbrauch) zum Treibhauseffekt, niedriger als bei direkter Kühlung, und zwar selbst im Fall von etwas höherem Energieverbrauch. Mehr Energie beim indirekten System wird mit dem Wärmeübergang zwischen erstem und zweitem Kreislauf in Verbindung gebracht. Die Meinungen zur zusätzlichen Energie sind geteilt. Vertreter der Direktverdampfung halten ihn oft für naturgesetzlich, während ihn Experten für indirekte Systeme als Problem der technischen Entwicklung (Linde Kältetechnik) oder gar als praktisch nicht existent betrachten (Integral 1996; Peters 1996). Letzteres legt eine Praxisstudie aus Schweden nahe (Johansson 1992). Eine optimistische Haltung zur Energiefrage ist nicht ganz unberechtigt, da die Entwicklung indirekter Systeme im gewerblichen (mittelgroßen) Leistungsbereich noch jung und keineswegs technologisch abgeschlossen ist. Das gilt für den primären und für den sekundären Kreislauf.

Im großtechnischen Bereich der Industriekälte, wo professionelles Personal vorhanden ist und außerdem kein Kältemittelkontakt mit Lebensmitteln vorkommt, herrscht seit Jahrzehnten direkte Ammoniakkühlung vor. Gegenwärtig zeichnet sich auch in den übrigen industriellen Kälte- und Klimabereichen ein Trend zu Ammoniak ab, und zwar mit indirekter Kühlung unter häufiger Verwendung von Wasser als Kälteträger. "Aufgrund der jahrzehntelangen positiven Erfahrung mit NH_3 ist dieses Kältemittel eindeutig als R 22-Ersatz favorisiert", stellte der VDKF 1995 zur Industriekälte fest.

Experten schätzen den Trend zu NH_3 in künftigen Neuanlagen der Industrie (Kälte und Klima) auf 85 bis 95% (York International 1996; Linde Kältetechnik 1996a; Ilka Mafa 1996). Für die Gewerbekälte wird das NH_3 - und Kohlenwasserstoff-Potential auf 30% geschätzt (Linde Kältetechnik 1996a; FKW 1996a; Peters 1996)¹⁸. Am wenigsten Konkurrenz durch Kohlenwasserstoffe oder NH_3 erhalten H-FKW in der Gebäudeklimatisierung: Zu 90% wird ihnen der Ersatz der FCKW selbst bei indirekten Systemen zuge-

¹⁸ In Schweden arbeiteten 1995 bereits 1000 Lebensmittelmärkte mit indirekter Kühlung (Bendtsen/Vieth 1995, 308). Die Kühlnorm von 1994 erfordert den Umbau der restlichen 4000 Märkte in 6 bis 7 Jahren.

rechnet (Sulzer-Escher- Wyss 1996; York International 1996; Trane 1996; Carrier 1996). Allerdings gibt es Fachleute, die den Trend zu NH₃ und Adsorptionsanlagen mit Lithiumbromid stärker einschätzen: auf 30% (FKW 1996b, 74).

Im Modell "Teilweiser H-FKW-Umstieg" gelten als Ersatzquoten durch H-FKW bei

- Gebäude- und Raumklimatisierung: 90%,
- Gewerbekälte und industrieller Klimatisierung: 70%,
- Industriekälte: 10%.

Aus diesen Quoten lassen sich die partiellen Zielbestände nach Anwendungsbereichen und Kältemitteln in absoluten Größen ermitteln. Vgl. Tabelle 41.

Tab. 41: Zielbestände für H-FKW-Kältemittel in stationärer Anwendung bei vollem und bei teilweisem H-FKW-Umstieg nach Anwendungen in Tonnen				
H-FKW-Typ	Anwendungs-Sektor	Zielbestand bei vollem Umstieg	Ersatz- quote	Zielbestand bei Teilumstieg
134a	Gewerbe	5000	70%	3500
	Industrie	4000	10%	400
	Klima (allg.)	1000	90%	900
	Klima (Indust.)	350	70%	245
407C	Klima	2000	90%	1800
	Gewerbe	2000	70%	1400
	Industrie	1000	10%	100
404A/507	Gewerbe	14000	70%	9800
	Industrie	10000	10%	1000
410A	Gewerbe	4000	70%	2800
	Industrie	4300	10%	430
23	Industrie (TK)	350	100%	350
Summe		48000	47,3%	22725

Quellen: Tabelle 39 für vollen Zielbestand. Ersatzquoten: s. Text des Abschnitts.

Nach dem Modell B werden weniger als die Hälfte der früheren FCKW durch H-FKW ersetzt. Statt 48 000 t sind nur 22 725 t erforderlich (Tabelle 41), insbesondere durch den starken Zuwachs von NH₃ in der Industriekälte. Entsprechend niedriger sind auch die notwendigen jährlichen Neuverbräuche von H-FKW. An dieser Stelle geht es nicht mit den veränderten Neuverbräuchen weiter, sondern gleich mit den Emissionen im Modell B. Dabei gelten dieselben Emissionsraten wie im Modell A (vgl. Tabelle 39).

1.5 Emissionen von Kältemitteln bei partiellem H-FKW-Umstieg

Bei Anwendung der in Gewerbe, Industrie und Gebäudeklima sehr unterschiedlichen Emissionsraten auf die jeweils erreichten Kältemittelbestände ergeben sich 1995, 2000, 2005 und 2010 verschieden hohe Emissionen in Tonnen. (Vgl. Tabelle 42.) Die Emissionen betragen nach Erreichen des Zielbestands (2007 bzw. 2010) insgesamt 2807 t. Das sind gegenüber dem vollen H-FKW-Umstieg (4982 t) nur noch 56%.

Tab. 42: Emissionen der verschiedenen FKW-Kältemittel 1995 bis 2010 - Schätzungen in Tonnen - partieller H-FKW-Umstieg

Kälte-Mittel	1995		2000		2005		2010	
	Bestand	Emission	Bestand	Emission	Bestand	Emission	Bestand	Emission
134a	1288	149	4820	567	4954	570	5045	572
404/507	319	36	2582	361	7861	1113	10800	1530
410A	0	0	133	18	1903	263	3230	446
407C	36	1	474	15	2189	152	3300	252
23	50	1	350	7	350	7	350	7
Summe	1693	187	8359	969	17258	2105	22725	2807

Quellen: Eigenberechnungen unter Verwendung der Werte von Tabelle 39 und 41.

Die Emissionen sind nicht so niedrig (56%), wie die neuen Zielbestände (47%) erwarten lassen. Dies liegt daran, daß H-FKW in der Gewerbekälte, die mit 15% die höchste Emissionsrate hat, zu 70% die FCKW ersetzen, während in der Industriekälte (nur 6% Emissionsrate) nur noch 10% H-FKW gegenüber dem Modell A vorhanden sind. Im Modell B dominieren relativ die emissionsträchtigeren H-FKW-Anwendungen.

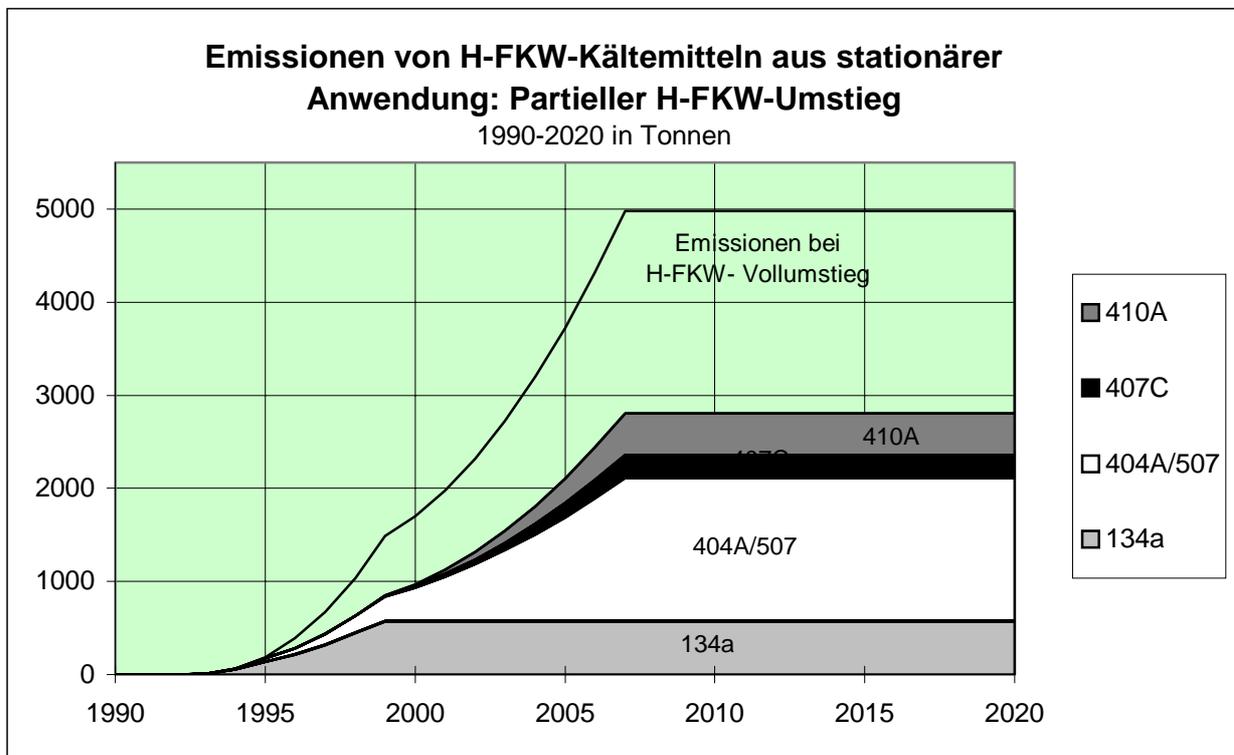


Diagramm 28: Emissionen von H-FKW-Kältemitteln aus stationärer Anwendung: Partieller H-FKW-Umstieg. Wie beim vollen H-FKW-Umstieg überwiegen die Emissionen von R404A/507 vor R134a, R410A und R407. Die oberste Kurve markiert das Emissionsniveau des Modells des vollen H-FKW-Umstieges - aus Diagramm 27 übernommen.

Grafisch sind die Emissionsbeiträge der einzelnen Kältemittel sowie der Emissionsabstand zum "Modell A" im Diagramm 28 dargestellt: Die Gesamt-Emissionen des vollen H-FKW-Umstieges (aus Diagramm 27) markieren als oberste Kurve den Emissionsabstand zwischen partiellem und vollem H-FKW-Umstieg. Sie sind jetzt um ca. 45% niedriger. Die Reihenfolge der Kältemittel nach Emissionsmengen ist gleichgeblieben, die Proportionen zwischen den Kältemitteln sind nur unwesentlich verschoben.

C: Beitrag zum Treibhauseffekt im Vergleich

Der partielle FCKW-Ersatz durch H-FKW führt gegenüber dem vollen H-FKW-Umstieg in der stationären Kältetechnik zu einer Entlastung beim Treibhauseffekt, die der Wirkung von 5,34 Mio. t CO₂ entspricht.

Die in den Tabellen 40 und 42 in metrischen Tonnen dargestellten Emissionen der einzelnen Kältemittel zeigen nach Multiplikation mit ihren spezifischen GWP-Werten ihr Treibhauspotential (s. Tabelle 43). Bei Vollumstieg auf H-FKW emittieren 2010 rd. 12,3 Mio. t CO₂-Äquivalente, bei Partialumstieg im gleichen Jahr nur knapp 7,0 Mio. t.

Tab. 43: Beitrag zum Treibhauseffekt durch H-FKW-Emissionen aus der stationären Kälte 1995 bis 2010 - in Mio. t CO₂-Äquivalente

H-FKW	GWP	Voller H-FKW-Umstieg				Partieller H-FKW-Umstieg			
		1995	2000	2005	2010	1995	2000	2005	2010
134a	1300	0,194	1,314	1,319	1,322	0,194	0,738	0,741	0,743
404A/507	3268	0,117	2,052	6,405	8,824	0,117	1,179	3,636	5,000
410A	1725	0	0,061	0,872	1,480	0	0,032	0,453	0,769
407C	1525,5	0,001	0,031	0,365	0,610	0,001	0,023	0,233	0,384
23	11700	0,012	0,082	0,082	0,082	0,012	0,082	0,082	0,082
Summe		0,324	3,539	9,043	12,318	0,324	2,053	5,145	6,979

Quellen: Berechnungen auf der Grundlage der Werte von Tabelle 40 und 42. Das GWP von 404A/507 (3268) wurde durch Gewichtung 80% (404A) zu 20% (507) ermittelt.

Diagramm 29 zeigt, wie von 1995 bis 2007 die Kurven der CO₂-Äquivalente für beide Modelle zunehmend auseinandergehen. Nach der Umstellung von FCKW und H-FCKW im Jahr 2007 sind daraus zwei Gerade im Abstand von 5,34 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente (43% Differenz) geworden.

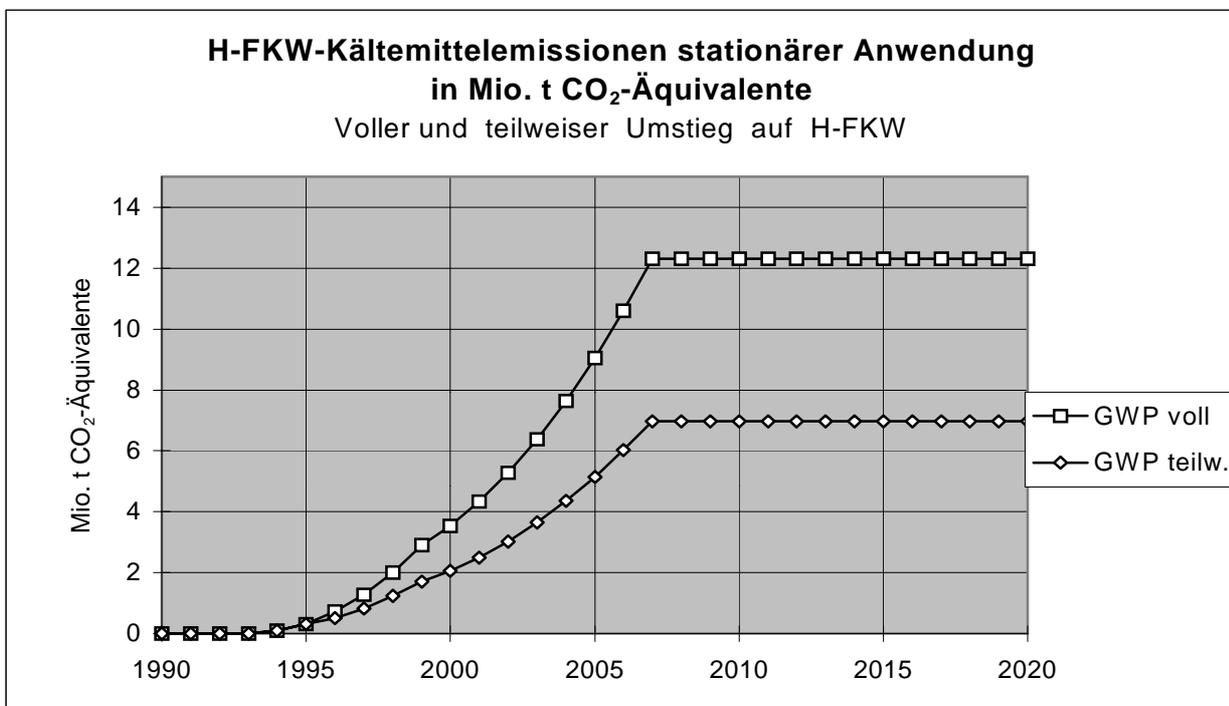


Diagramm 29: Beitrag zum Treibhauseffekt durch H-FKW-Kältemittlemissionen stationärer Anwendung in Mio. t CO₂-Äquivalente: Voller und partieller H-FKW-Umstieg. Im Maximum, ab 2007, beträgt die klimawirksame Differenz der Emissionen beider Modelle 5,34 Mio. t.

2. Kältemittel in mobilen Anwendungen

Vor allem dank der Pkw-Klimaanlagen ist die Mobil- oder Fahrzeugkälte anders als die stationäre Kälte stark expandierend. Der FCKW-Altbestand genügt darum zwar in einigen Teilbereichen, nicht aber im Hauptbereich der Fahrzeugklimatisierung, als Richtmaß für den H-FKW-Zielbestand und - davon abgeleitet - für die Emissionen.

A: Modell Voller H-FKW-Umstieg

Für die hier zu entwickelnden Szenarien heißt "Voller H-FKW-Umstieg" (Modell A) nicht, daß hier genausoviel H-FKW wie früher FCKW zum Einsatz kommen, sondern daß die neuen Kältemittel ausschließlich H-FKW sind. Entsprechend heißt "Partieller H-FKW-Umstieg" (Modell B), daß - auf einem steigenden Markt - außer H-FKW auch andere Kältemittel vorkommen.

2.1 Bestands- und Verbrauchsentwicklung in der Mobilkälte

2.1.1 Pkw-Klimaanlagen

Während 1989 erst 6% der inländischen Pkw-Neuzulassungen der deutschen Hersteller werkseitig klimatisiert waren (Öko-Recherche 1996, 22), betrug diese Ziffer 1995 bereits über 31%. Auch bei den Importfahrzeugen wurden 1995 schon 14% der Neuzulassungen mit einer Klimaanlage ausgerüstet (Befragung Pkw-Klima). Eine Klimaanlage gilt nicht mehr als Zubehör von Luxus- und Exportfahrzeugen. Sie ist sogar schon beim Gebrauchtwagenkauf mitentscheidend.

Neun Annahmen für die Modellrechnung "Kältemittel in Pkw-Klimaanlagen"

1. Die jährlichen Pkw-Neuzulassungen steigen im Mittel um 3,552 Mio. Stück und erhöhen den Pkw-Bestand von 40,7 Mio. (1995) bis auf 49,9 Mio. Fahrzeuge in 2017 (Shell-Szenario).
2. Die 1995er Aufteilung der Neuzulassungen nach ihrer Herkunft, nämlich 68% aus inländischer Produktion und 32% Importe (VDA), gilt auch in den folgenden Jahren.
3. Die Klimatisierungsquote der Neuzulassungen steigt jährlich um 4% bis auf 56% in 2003:
 - bei Fahrzeugen aus inländischer Herstellung von 31,4% (1995) bis auf 61% (2003),
 - bei Importfahrzeugen von 14% (1995) bis auf 44% (2003).
4. Als Lebensdauer einer Klimaanlage und eines Fahrzeugs gelten 12 Jahre.
5. Der Austausch von über 1 Mio. FCKW-haltigen Klimaanlagen im Bestand vollzieht sich 1996 bis 1998. Diese umgerüsteten Klimaanlagen scheidet in den Jahren 2002 bis 2006 (Verschrottung mit Kältemittel-Rückgewinnung) aus dem Bestand wieder aus.
6. Die durchschnittliche Füllmenge der neuen Klimaanlagen sinkt jährlich um 1% von 0,86 kg (1995) auf 0,67 kg bis 2020. Bei Neuzulassungen inländischer Herkunft sinkt sie von 0,88 kg auf 0,67 kg, in neuen Importautos im gleichen Zeitraum von 0,79 kg auf 0,61 kg.
7. Die jährliche Emissionsrate auf den umlaufenden Kältemittelbestand beträgt konstant 13%. In ihr sind die laufenden Kältemittelverluste aus dem Betrieb (Fahrzeuge inländischer und ausländischer Herkunft) sowie die trotz Rückgewinnung bei der Altautoentsorgung anfallenden Verluste von ca. 25% der Erstbefüllungsmenge integriert.
8. Trotz der Integration der Verschrottungsemissionen gilt eine 100-prozentige Kältemittel-Rückgewinnung aus den nach 12 Jahren Lebensdauer entsorgten Pkw-Klimaanlagen. Ihre Füllmenge geht vollständig in die jährliche Bruttozufuhr ein und verringert die Nettozufuhr (Neuverbrauch) um ihren Eigenumfang.
9. Der inländische Kältemittelverbrauch für Exportfahrzeuge beträgt konstant 730 Tonnen.

Anhaltend hohe Wachstumsraten

Die Wachstumsrate bei klimatisierten Pkw-Neuzulassungen liegt jährlich um 4% über derjenigen des Vorjahrs. So ist absehbar, wann die 50%-Marke überschritten wird. In der Tat erwartet der größte inländische Hersteller von Pkw-Klimaanlagen eine Sättigung erst bei 50% - und zwar nicht schon bezogen auf Neuzulassungen, sondern erst in Bezug auf den gesamten inländischen Pkw-Bestand (Behr 1996).

Der FCKW-Altbestand wurde bereits 1996 von dem seit April 1991 in Deutschland erstmals (S-Klasse von Mercedes-Benz) und seit 1993 weltweit als Standard-Kältemittel eingesetzten R134a übertroffen. Für Verbrauchs- und Emissionsabschätzung von Autoklima-Kältemitteln ist ein komplexes Modell erforderlich, das die anhaltende Dynamik sowohl bei der Klimatisierung als auch beim Fahrzeugbestand berücksichtigt, aber auch die rückläufigen Füllmengen neuer Klimaanlagen. Die wichtigsten neun Annahmen listet der vorstehende Kasten auf.

Anstieg des Neuverbrauchs bis 2005 auf 3500 Tonnen

Der jährliche Neuverbrauch setzt sich in den ersten zwölf Jahren, von 1993 bis 2005, aus drei Faktoren zusammen.

Erstens: Befüllung der inländischen Neuzulassungen einschl. Nachrüstungen.

Zweitens: Emissionsersatz für Kältemittelverluste aus dem Fahrzeugbestand inländischer und ausländischer Herkunft.

Drittens: Befüllung von Neufahrzeugen für den Export.

Zufuhr und Neuverbrauch sind bis 2005 identisch. Diagramm 30 zeigt: Gemäß den "neun Annahmen" steigt der Neuverbrauch ab 1993 steil bis auf das Maximum von über 3500 t im Jahr 2005 an. (Absolute Zahlenwerte zum Neuverbrauch enthält die Tabelle 46.) In dieser ersten Phase liegt der Verbrauch weit mehr als die festen 730 Export-Tonnen (s. "neun Annahmen") über der Emissionskurve. (Der kleine "Berg" 1997/98 geht auf Zusatzbedarf für den Austausch R12-haltiger Klimaanlagen zurück.)

Ab 2006 sinkt der Neuverbrauch absolut. Der Hauptgrund dafür ist nicht, daß die Klimatisierungsquote der Neuzulassungen nicht mehr weitersteigt (sie bewegt sich bereits seit 2003 auf ihrem Maximum von 61%). Oder daß das spezifische Füllvolumen um jährlich 1% sinkt (das ist seit 1993 der Fall). Der Hauptgrund ist vielmehr, daß ab 2005 die ersten Rückläufe von Kältemitteln aus der Altautoentsorgung einsetzen, die zwar nicht die Bruttozufuhr, aber doch den Nettoverbrauch neuer Kältemittel reduzieren. Von Jahr zu Jahr fließen mehr rückgewonnene Alt-Kältemittel zurück, und zwar sowohl aus Klimaanlagen von im Inland produzierten Fahrzeugen als auch aus Importautos, so daß der Neuverbrauch von Kältemitteln im Sinne von "Neuproduktion" sinkt.¹⁹

¹⁹ Das Modell zur Ermittlung des Neuverbrauchs von Kältemitteln berücksichtigt nicht, daß viele Fahrzeuge, insbesondere solche mit gehobener Ausstattung, erst als Gebrauchtwagen exportiert werden und daß diese Entwicklung (aufgrund des Wohlstandsgefälles zwischen West- und Osteuropa) noch lange andauern wird. Das Kältemittel in den Klimaanlagen dieser Fahrzeuge wird bei der Altautoentsorgung nicht zurückgewonnen, sondern emittiert im Land der Fahrzeugverschrottung.

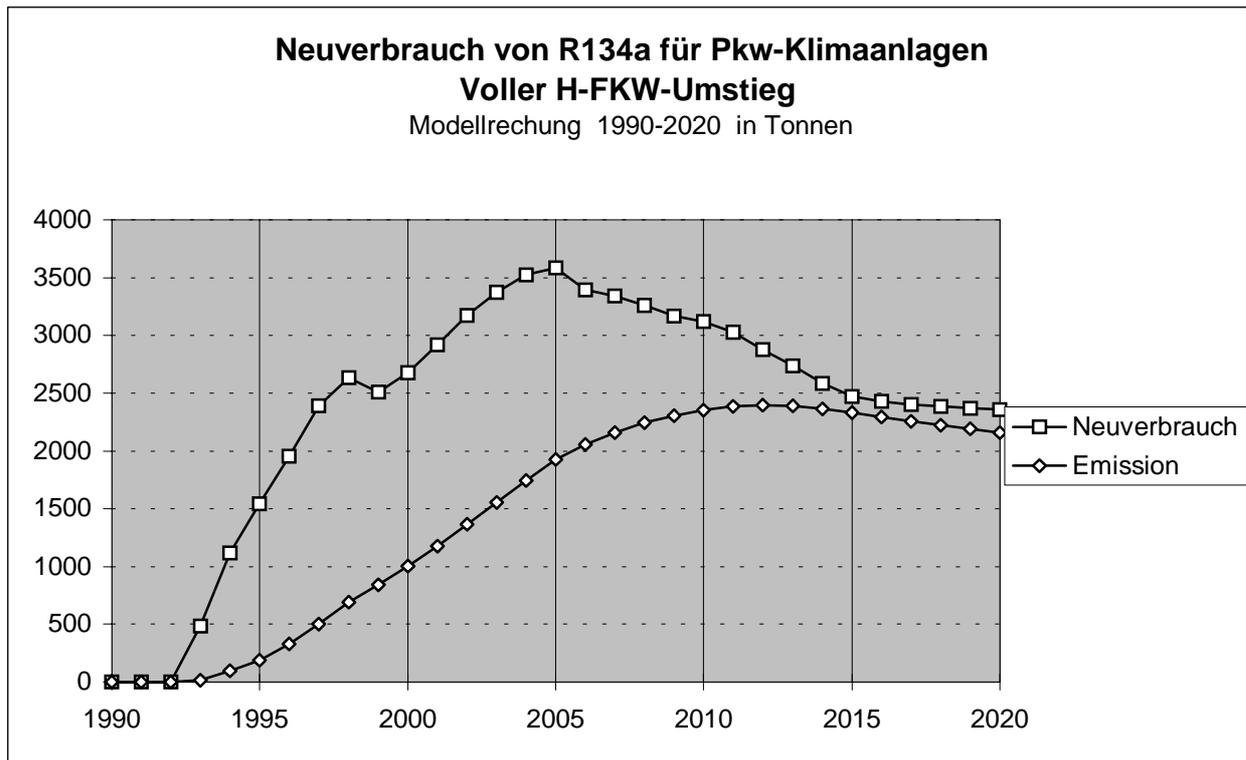


Diagramm 30: Modellrechnung für Neuverbrauch und Emissionen von 134a aus Pkw-Klimaanlagen 1993-2020. Der Neuverbrauch (inländische Neubefüllung und Emissionsausgleich) steigt schneller und höher als die inländischen Emissionen, zumal im Neuverbrauch die Kältemittel in Exportautos enthalten sind. Ab 2005 sinkt der Neuverbrauch wegen des Rückflusses von Altkältemitteln aus entsorgten Fahrzeugen. Die Emissionen erreichen ihr Maximum bei 2400 Tonnen. (Alle Werte gültig nur im Rahmen der "neun Annahmen" des Prognosemodells.)

Daß die Neuverbrauchskurve dauerhaft oberhalb der Emissionskurve verläuft, liegt am Außenhandel. Ohne die jährlich 730 Tonnen Kältemittel für den Export würde die Kurve des Neuverbrauchs die Emissionskurve nicht nur berühren, sondern bald unterschreiten. Denn die Importfahrzeuge im Bestand liefern bei ihrer inländischen Verschrottung Kältemittel für das Recycling; die Befüllung neuer Importfahrzeuge geschieht jedoch im Ausland und hebt den Inlandsverbrauch nicht. Daß die Neuverbrauchskurve über der Emissionskurve verläuft, ist Ausdruck davon, daß Deutschland mehr Kältemittel in klimatisierten Neufahrzeugen exportiert als einführt.

2.1.2 Sonstige Mobilkälte

Gemessen an den Pkw-Klimaanlagen handelt es sich bei den Kältemitteln für die übrige mobile Kälte um geringe Bestands- und Verbrauchsmengen. Es geht dabei erstens um Klimatisierung von beweglichen Räumlichkeiten für Personen, zweitens um Kühlung von verderblichen Waren beim Transport.

- Klimatisierung betrifft:

Kraftomnibusse im Bestand von 86 000 zugelassenen Fahrzeugen, für die innerhalb der nächsten zehn Jahre ein Anstieg der Klimatisierungsquote für Reisebusse (40% des Bestands) von 80 auf 100% und für Linienbusse (60% des Bestands) von 10 auf 75% angenommen wird (Sütrak 1996).

Lkw-Fahrerkabinen im Bestand von 250 000 Fahrzeugen über 16 Tonnen Gesamtgewicht, für die eine Zunahme der Klimatisierung von 15% (1995) auf 95% in zehn Jahren unterstellt wird (Webasto 1996).

Schienefahrzeuge im Bestand von 2100 klimatisierten Personenwaggons der Deutschen Bahn AG, deren Kältemittelaustausch von R12 durch R134a von 25% (1995) bis zum Jahr 1998 vollständig abgeschlossen sein soll.²⁰ Zu beachten ist, daß zunehmend auch innerstädtische Schienefahrzeuge (U- und Straßenbahnen) mit Klimaanlage ausgerüstet werden (Konvekta 1996).

Handelsschiffe im Dienst deutscher Reedereien bzw. Marineschiffe im Bestand von 1500 bzw. 100 Einheiten, deren Kältemittel R22 in den nächsten zehn Jahren durch chlorfreie Kältemischungen ersetzt werden dürften (Hochhaus 1996b; Noske-Kaeser 1996).

- Kühlung betrifft:

Kühl-Lkw im Gesamtbestand von 60 000 Fahrzeugen, von denen ca. 25 000 im "Frischdienst" fahren und auf R134a umgestellt werden, während die übrigen 35 000 teilweise oder vollständig tiefkühlen und vorwiegend auf R404A wechseln (Euram 1996; Frigoblock 1996).

Vollkühlschiffe (ca. 30 Einheiten), Kühlcontainerschiffe (ca. 45 Einheiten) und verarbeitende Hochseefischereischiffe (14 Einheiten) im Dienst deutscher Reeder, bei denen R22 in den nächsten zehn Jahren durch R404A ersetzt wird, sofern sich nicht Ammoniak durchsetzt (Verb. d. dt. Hochseefischereien 1996; Hochhaus 1995; Linde Kältetechnik 1996b; Verband Deutscher Reeder 1996).²¹

Kühl-Container mit integriertem Kälteaggregat im Bestand von 100 000 von weltweit 520 000 Stück, die gemäß dem ca. 20% betragenden Anteil Deutschlands am Welthandel mit verderblichen Gütern über See dem Inland zugerechnet werden. Bei ihnen wird vornehmlich R12 durch R134a ersetzt, wobei die nationale Umstellungsfrist 1998 wegen der internationalen Container-Zirkulation um mindestens 2 Jahre hinausgeschoben werden dürfte. (Containerisation International 1996; Carrier Transicold 1996; Hochhaus 1996a)

Eisenbahn-Kühlwaggons im Bestand von ca. 125 dem inländischen Verkehr zuzurechnenden Fahrzeugen, die innerhalb von zehn Jahren das Kältemittel R22 vorwiegend durch R404A ersetzen (intercontainer-interfrigo 1996).

Verbrauchsentwicklung bei sonstiger Mobilkälte

Der jährliche Verbrauch von H-FKW-Kältemitteln für die sonstige Mobilkälte ist in der Anfangsphase im wesentlichen durch zwei Faktoren bestimmt. Erstens durch die Höhe des Altbestands an FCKW-Kältemitteln, die ersetzt werden müssen, und zweitens durch den gesetzlich vorgeschriebenen Zeitraum, in dem der Ersatz durch chlorfreie Kältemittel stattfinden muß. Im Falle der Bus- und Lkw-Fahrerkabinen-Klimatisierung wird abweichend von den anderen Anwendungen ein wachsender Ausstattungsgrad mit Klimaanlage unterstellt, was den Jahresverbrauch in diesen Bereichen länger und höher als den FCKW-Altbestand wachsen läßt. Nach der Anfangsphase ist der Verbrauch in erster Linie dazu da, die laufenden Emissionen auszugleichen.

Tab. 44: Daten zur Klimatisierung und Kühlung von Fahrzeugen außer Pkw

²⁰ Später wird luftgestützte Klimatisierung eingesetzt werden - nach gegenwärtigen Stand erstmals für die Triebwagen des ICE 3 (Dt. Bahn AG 1996).

²¹ Dazu kommen noch 45 t in Proviantkühlanlagen d. Passagier- und Frachtschiffe (Hochhaus 1996b).

Anwendung	Einheiten	spez. Füllmenge	Ziel-Bestand	Ziel-Jahr	E-miss.-Quote	Kältemittel
Omnibusse	86000	11 kg	785 t	2006	12%	134a
Lkw-Kabinen	250000	0,8 kg	200 t	2006	13%	134a
Schienenfahrz.	2200	17 kg	40 t	1998	5%	134a
Handelsschiffe	1600	70 kg	110 t	2007	5%	407C
Kühl-Container	100000	6 kg	600 t	2000	15%	134a
Frischdienst-Lkw	25000	3 kg	75 t	1998	15%	134a
Tiefkühl-Lkw	35000	6 kg	210 t	2007	15%	404A
Kühlschiffe	90	4000 kg	360 t	2007	10%	404A

Quellen siehe Text; außerdem: Öko-Recherche 1995; FKW 1995. Das Zieljahr 2006 in der Zeile Omnibusse und Lkw-Kabinen bedeutet keine Verzögerung des gesetzlich vorgeschriebenen R12-Austauschs durch R134a bis 1998, sondern bezeichnet die Erwartung, daß die Klimatisierungsquote bis zum Jahr 2006 weiterhin ansteigen wird.

Die absoluten Zielbestände (stationäre und dynamisierte) sind in Tabelle 44 eingetragen. Wie bei den bisherigen Modellrechnungen wird ein Totalrecycling der bei der Verschrottung anfallenden Kältemittel unterstellt, so daß - nach Erreichen des Zielbestands - der jährliche H-FKW-Neuverbrauch im Sinne neuproduzierter Kältemittel niedriger als die jährliche Bruttozufuhr in neue Kälte- und Klimaanlage ist und sich - vom Export abgesehen - mit den Emissionen deckt. Diagramm 31 gibt die errechnete Verbrauchskurve für die Mobilkälte wieder. (Als Vorgriff ist zum Vergleich schon die Emissionskurve eingetragen.)

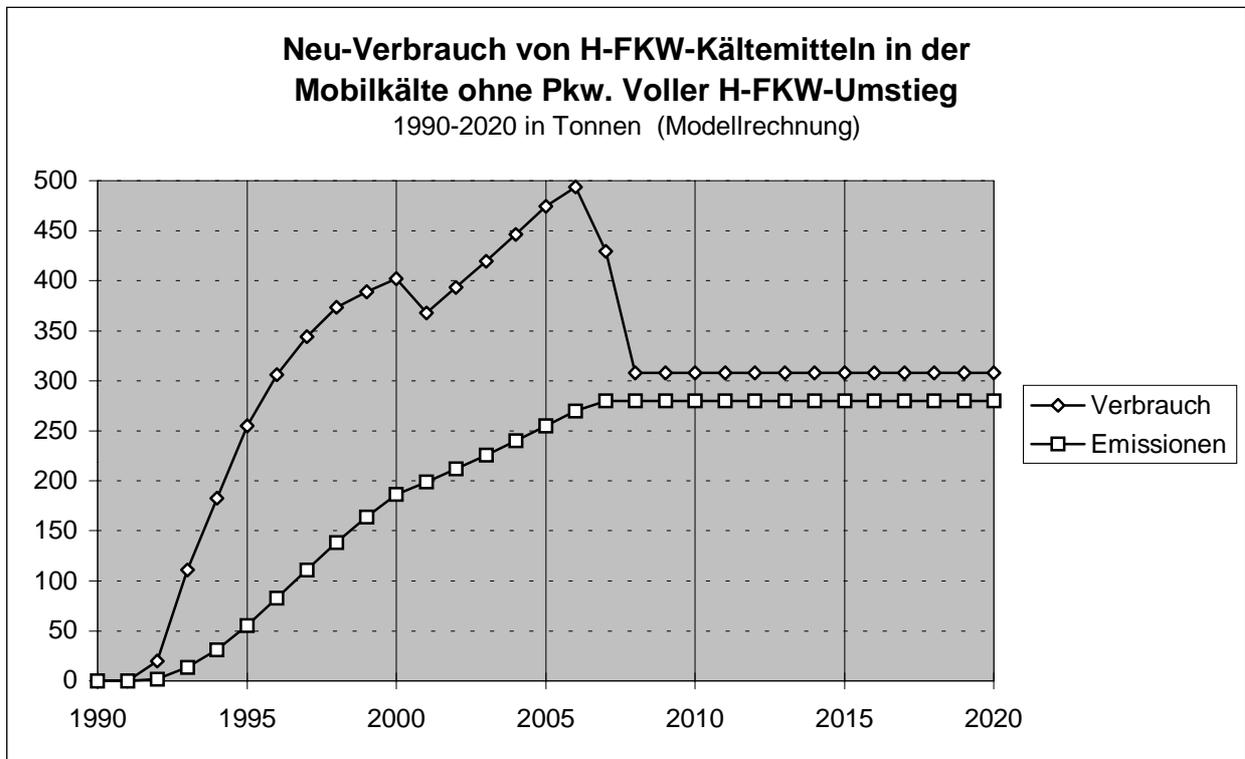


Diagramm 31: Kältemittelverbrauch und -emissionen aus der Mobilkälte ohne Pkw 1990 bis 2020. Die Verbrauchskurve verläuft bis 2006 deutlich steiler und höher als die Emissionskurve, weil zunächst die Bestände aufgefüllt werden. Die Emissionen stabilisieren sich ab 2007 bei 280 Tonnen. Der Verbrauchsüberschuß über die Emissionen nach 2007 ist exportbedingt. Der Anstieg des Jahresverbrauchs ist zwischen 1992 bis 1998 sehr steil, weil in diesem Zeitraum der Austausch von R12 durch R134a stattfindet. Wegen der angenommenen

zweijährigen Verzögerung des R12-Ersatzes bei Kühlcontainern steigt die Kurve noch bis zum Jahr 2000. Nach einem kurzen Rückgang erreicht sie ihr Maximum 2006, wenn die Klimatisierung von Omnibussen und Lkw-Fahrerkabinen gesättigt ist. Dann beträgt der Kältemittelbestand der sonstigen Mobilkälte über 2000 Tonnen. (Zum Vergleich: Der R134a-Bestand in Pkw-Klimaanlagen steigt lt. Tabelle 46 auf über 18 000 t.)

Nach Kältemitteltypen gliedert sich der Jahresverbrauch wie folgt (Tabelle 45) auf:

Kältemittel	1995	2000	2005	2010 ff.
R134a	253	356	337	250
R404A	2	38	119	52
R407C	0	8	18	6

Beim Neuverbrauch herrscht ein klares Übergewicht von R134a gegenüber den Kältemischungen. Bei den Autoklimaanlagen ist R134a das ausschließliche, und in der sonstigen Mobilkälte ist es das eindeutig dominierende Kältemittel auf H-FKW-Basis.

2.2 Emissionen aus der Mobilkälte

2.2.1 Emissionen aus Pkw-Klimaanlagen bis fast 2400 Tonnen

Die Emissionsrate bei Pkw-Klimaanlagen ist mit 13% hoch (Nonnenmann 1992). Aber sie ist schon ein großer Fortschritt gegenüber Anlagen aus der FCKW-Zeit. 20% waren damals wenig, 30% normal. Denn Autoklimaanlagen sind keine ortsfesten Anlagen mit geschlossenen Verdichtern oder verlöteten Kältemittelleitungen. Außerdem sind sie ständigen Vibrationen des Fahrzeugmotors ausgesetzt, der den Verdichter antreibt.

Jahr	spez. Füllmenge in kg	Inl. Neuverbrauch in t	Bestand in t	Emissionen in t
1990		0	0	0
1995	0,88	1542	1472	191
2000	0,82	2678	7730	1005
2005	0,77	3584	14839	1929
2010	0,74	3118	18124	2356
2015	0,70	2472	17926	2330
2020	0,67	2360	16625	2161

Quellen: Modellrechnung auf der Basis der Befragung von Automobilunternehmen und Klimaanlagenherstellern, des Shell-Pkw-Szenarios sowie der "neun Annahmen" (s.o.).

Einen großen Fortschritt in der Emissionsminderung stellten zeitgleich mit der Einführung von R134a neue Schläuche und neue Wellendichtungen dar. Dabei sind nach Herstellerangaben besonders die Schläuche aus Polyamid statt aus Gummi wichtig, die "um den Faktor 50 diffusionsdichter" sind (Behr 1996). Vergleichbar durchgreifende Verbesserungen werden für die nächsten zwanzig Jahren nicht erwartet, wohl aber kontinuierliche Verminderungen der Anlagendimensionen, der Korrosionsanfälligkeit und der Zahl der Schnittstellen. Dem trägt das Modell mit einer Verringerung des Füll-

gewichts um jährlich 1% von 860 (1995) auf 670 Gramm pro Klimaanlage (2020) Rechnung, was einer Verringerung der spezifischen Emissionen pro Fahrzeug um 22 Prozent gleichkommt (Tabelle 46).

Diagramm 30 und Tabelle 46 zeigen: Die Emissionen aus Pkw-Klimaanlagen nehmen zunächst mit deren Verbreitung stark zu. Die Zahl der R134a-Klimaanlagen steigt in den 15 Jahren von 1995 bis 2010 von 1,74 Mio. (1995) bis auf 25,36 Mio. Stück an - um das 14-fache. Die Klimatisierungsquote des Bestands hat dann erstmals die 50%-Marke überschritten. Der umlaufende Kältemittelbestand hat zugleich sein Maximum mit 18 395 Tonnen erreicht. Folglich nehmen auch die Emissionen nicht mehr weiter zu. Sie sind von 191 Tonnen (1995) auf 2 356 Tonnen angestiegen - um das 12-fache (vgl. Tabelle 46). Wegen der jährlich leicht sinkenden spezifischen Füllmengen gehen der Bestand und damit die Emissionen nach 2013 wieder leicht zurück.

2.2.2 Emissionen aus der sonstigen Mobilkälte

Die Spanne der Emissionsraten reicht nach Tabelle 44 je nach Anwendung von 5% (Schienenfahrzeuge) bis zu 15% (Straßenkühlfahrzeuge) und liegt im Mittel für die sonstige Mobilkälte bei 12,3%. Den Verlauf der Emissionskurve zeigte Diagramm 12. (Absolute Zahlenwerte enthält Tabelle 47). Nach einem fast linearen Anstieg bis ins Jahr 2007 bleiben die Emissionen auf einer Höhe von ca. 280 Tonnen.

Kältemittel	1995	2000	2005	2010 ff.
R134a	55	176	215	221
R404A	0	9	36	53
R407C	0	1	4	6
Summe	55	186	255	280

Wie nach der Gliederung der einzelnen Kältemitteln beim Verbrauch nicht anders zu erwarten ist, handelt es sich auch bei den Emissionen vorwiegend um R134a.

2.2.3 Die Emissionen aus der gesamten Mobilkälte

Die Mobil- oder Fahrzeugkälte ist zwar in der Anwendung recht vielfältig, da sie die Klimatisierung und Kühlung auf der Straße, der Schiene und zu Wasser umfaßt. Doch die zusammengefaßten Kältemittlemissionen sind zu 90% durch die Entwicklung bei Autoklimaanlagen geprägt. Diese sind die Hauptursache dafür, daß die Gesamtemissionen bis 2012 auf den Spitzenwert von 2680 Jahrestonnen ansteigen. Sie gehen danach wieder leicht zurück, weil - wie das Modell annimmt - die spezifische Füllmenge der Pkw-Klimaanlagen, nicht ihre Gesamtzahl weiter abnimmt. Das ausschließliche Kältemittel ist R134a.

R134a dominiert auch in den anderen mobilen Kälteanlagen, auf die insgesamt nur 10% der Emissionen entfallen. Klimaanlage von Omnibussen und integrierte Kühlcontainer sind die R134a-Hauptemittenten der sonstigen Mobilkälte. Größte Emittentengruppe von Kältemischungen (R404A) sind Schiffe mit Kühleinrichtungen, die zwar nicht zahlreich sind, aber Füllmengen zwischen 2 t (Vollkühlschiffe) und 15 t (verarbeitende Hochseefischereifahrzeuge) pro Fahrzeug aufweisen (Hochhaus 1996).

Tab. 48: Emissionen von H-FKW-Kältemitteln aus der gesamten Mobilkälte (in t)				
Kältemittel	1995	2000	2005	2010 ff.
R134a	247	1181	2144	2578
R404A	0	9	36	53
R407C	0	1	4	6
Summe	247	1191	2184	2637

Diagramm 32 zeigt die Dominanz von R134a noch deutlicher. 98% der Kältemittlemissionen aus der gesamten Mobilkälte bestehen aus diesem H-FKW.

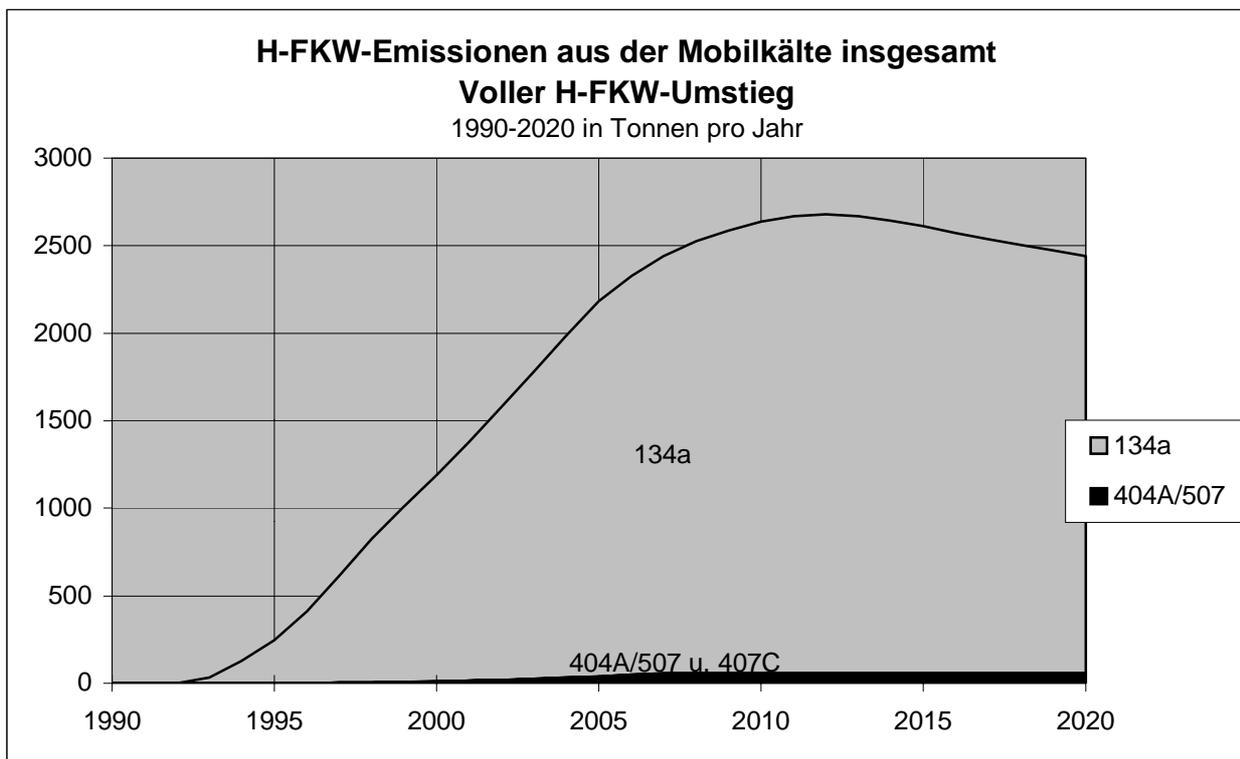


Diagramm 32: H-FKW-Emissionen aus der Mobilkälte insgesamt 1990-2020. Die Mobilkälte ist zu 98% durch Emissionen von R134a geprägt, die ihrerseits zu 90% aus Pkw-Klimaanlagen stammen. Die Emissionskurve aus Pkws, d.h. der lineare Anstieg der zusammengefaßten Kältemittlemissionen bis 2012 auf 2680 Jahrestonnen, bestimmt die Gesamtkurve der Emissionen aus der Mobilkälte. Der leichte Rückgang nach 2012 geht auf - im Modell unterstellte - kontinuierliche Reduzierung des Füllvolumens der Pkw-Klimaanlagen zurück.

Das - bisher behandelte - Modell des vollen (und zugleich dynamisierten) H-FKW-Umstieges ist durch den Trend bei den Pkw-Klimaanlagen bestimmt.

Im nachfolgenden Modell des partiellen H-FKW-Umstieges wird die Bedeutung der Pkw-Klimaanlagen noch deutlicher.

B: Modell Partieller H-FKW-Umstieg

2.3 Kältemittel CO₂

Anders als bei der stationären Kälte, wo Naturgase in wachsende Konkurrenz zu H-FKW-Kältemitteln treten, hat sich in der Mobilkälte R134a als R12-Nachfolger bislang fest etabliert. Allerdings experimentierte die Automobilindustrie seit der ökologischen Kritik an R12 auch mit anderen Kältemitteln wie Kohlenwasserstoffen oder anderen Verfahren wie dem Stoffpaar Zeolith-Wasser. Dem Zeolith-Wasser-System werden allerdings wenig Zukunftschancen im Auto eingeräumt, u.a. weil der Zeitraum vom Einschalten des Fahrzeugmotors bis zum Eintreten eines Kühleffekts als zu lang gilt. Propan und Butan werden wegen der erhöhten Brandgefahr bei austretendem Kältemittel aus beschädigten Anlagen, insbesondere nach Unfällen, und wegen des Explosionsrisikos im Fahrgastraum skeptisch bewertet.

Aussichtsreichster Kandidat für den Wiederausstieg aus dem wegen seiner Klimawirkung umstrittenen R134a ist das Kältemittel CO₂, auf dem gegenwärtig der Forschungsschwerpunkt der europäischen Autoindustrie liegt. Von der EU gefördert wird das 1994 gestartete RACE-Projekt (Refrigeration and Automotive Climate Systems under Environmental Aspects), in dem folgende Partner kooperieren: die Autohersteller Mercedes-Benz, Volkswagen, BMW, Rover und Volvo sowie die Komponentenhersteller Behr, Valeo, Danfoss und Siemens (Wertenbach u.a. 1996, 856). Auch ein Hersteller von Bus-Klimaanlagen arbeitet an CO₂-Anlagen (Konvekta 1996).

Der wichtigste physikalische Unterschied zum konventionellen Kaltdampfprozeß liegt darin, daß das Kältemittel in der Abkühlung keinen Phasenwechsel durchmacht. Die Wärmeabgabe nach außen führt nicht zur Verflüssigung, sondern zur Zunahme der Gasdichte. Statt eines Kondensators ist im Kältekreislauf ein Gaskühler installiert (Sonekalb/Köhler 1996, 825-827). Technisch zu bewältigen sind u.a. hohe Anlagendrücke über 100 bar in spezifisch hoch beanspruchten Komponenten und besondere Lösungs- und Diffusionseigenschaften des CO₂. Die Versuchsergebnisse in der Autoindustrie sind ermutigend. Innerhalb des RACE-Projekts erfolgen 1996/97 Direktvergleiche mit 134a-Klimaanlagen. Unterstellt man, daß technische Lösungen für die anlagenseitigen Probleme gefunden, noch vorhandene Effizienzdefizite beseitigt, physiologische Bedenken ausgeräumt werden, könnten schrittweise ab 2005 neue Pkw-Serien mit CO₂- statt mit H-FKW-Anlagen ausgerüstet werden (Wertenbach 1996). Für die europäische und besonders für die deutsche Autoindustrie existiert eine wichtige nicht-technische Randbedingung für die Realisierung von CO₂-Klimaanlagen, nämlich die durch die Handels- und Produktionsverflechtungen bedingte Notwendigkeit eines weltweit abgestimmten Vorgehens. Zudem sind erhebliche Widerstände von Seiten der Chemischen Industrie zu erwarten, die den Kältemittelmarkt nicht verlieren möchte (Konvekta 1996).

2.4 Rückgang von R134a-Verbrauch und -Emissionen ab 2005

Das Modell "partieller H-FKW-Umstieg" konzentriert sich auf Pkw-Klimaanlagen. Es unterstellt: Ab 2005 haben Neuwagen für den inländischen und ausländischen Markt sowie importierte Fahrzeuge sukzessive CO₂-Klimaanlagen. Fahrzeugbestand, Klimatisierungsgrad usw. bleiben wie im Szenario des vollen H-FKW-Umstieges. (Die ersten fünf der "neun Anahmen" gelten auch nach 2005.) 2005 werden nur 90% der klimatisierten Neufahrzeuge mit einer 134a-Anlage ausgerüstet, 2006 sind es 80%, 2007 noch 60%, 2008 noch 40%, 2009 noch 20%, und 2010 nutzen alle neuen Pkw-Klimaanlagen CO₂. Der Emissionsersatz der 134a-Anlagen geht noch 12 Jahre weiter.

Zugleich fließt aufgefangenes R134a aus der inländischen Anlagenverschrottung zurück, das zunehmend den Emissionsersatz solcher Anlagen übersteigt. Per Saldo

kommen bereits 2013 aus dem Pkw-Klimaanlagen-Bereich mehr H-FKW-Kältemittel zurück, als zum Emissionsersatz und zur inländischen Neubefüllung gebraucht werden - zumal auch die Exportfahrzeuge für H-FKW wegfallen. Tabelle 49 zeigt die Umkehr bei Neuverbrauch, Bestand und Emissionen von R134a nach dem Jahr 2005:

Tab. 49: Kältemittel in Pkw-Klimaanlagen: Neuverbrauch, Bestand, Emission Modell Partieller H-FKW-Umstieg (CO₂ ab 2005)				
Jahr	spez. Füllmenge in kg	Inl. Neuverbrauch in t	Bestand in t	Emissionen in t
1990		0	0	0
1995	0,88	1542	1472	191
2000	0,82	2678	7730	1005
2005	0,77	3367	14679	1908
2010	0,74	657	13462	1750
2015	0,70	-812	6297	819
2020	0,67	-551	428	56

Quellen: Modellrechnung auf der Basis der vorausgehenden Annahmen zusammen mit der Annahme der sukzessiven Einführung von CO₂ als Kältemittel ab 2005.

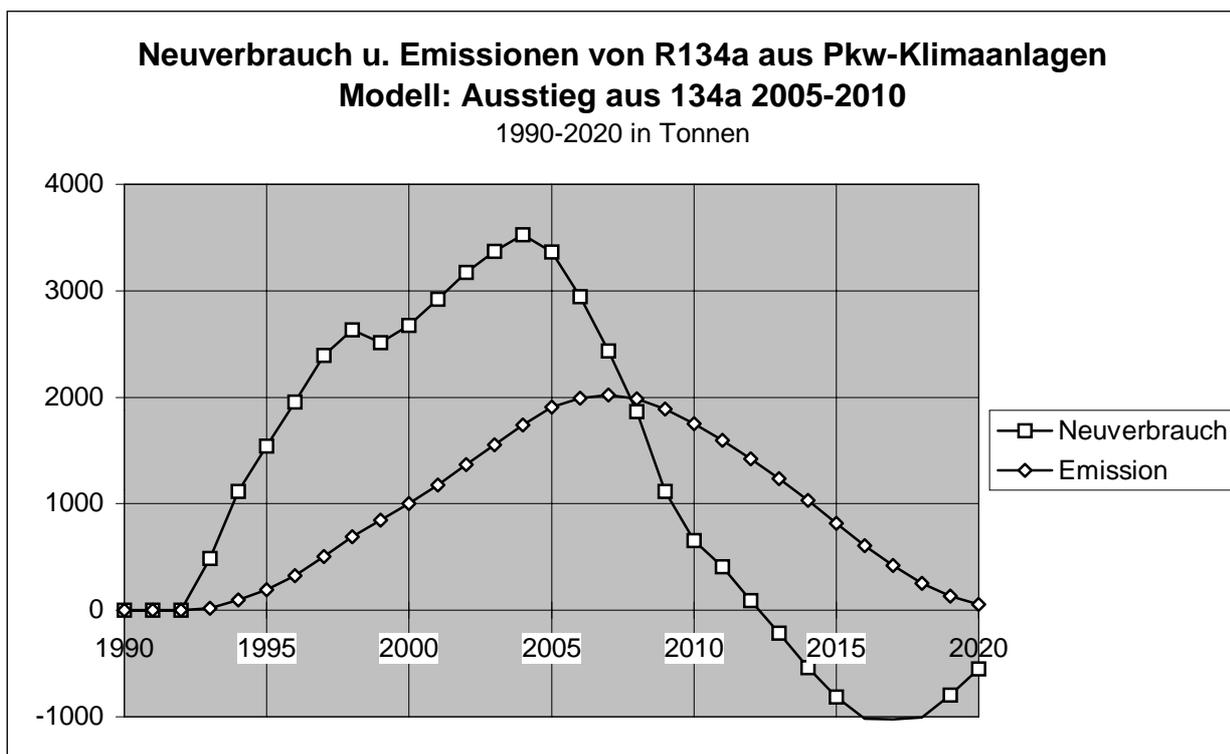


Diagramm 33: Neuverbrauch und Emissionen von R134a aus Pkw-Klimaanlagen bei Wechsel von R134a auf CO₂ ab dem Jahr 2005. Die Emissionen sinken nach dem Maximum bei ca. 2000 t bis zum Jahr 2020 wieder fast auf Null, während der Neuverbrauch ab 2013 sogar negativ wird, d.h. daß Überschüsse aus der Kältemittel-Rückgewinnung anfallen.

Negative Werte für die Neuverbräuche ab 2015 drücken aus, daß die Rückgewinnung von H-FKW-Kältemitteln aus Altfahrzeugen den Bedarf für Emissionsersatz und Neubefüllung (letztere findet ab 2011 nicht mehr statt) übersteigt. Der Sektor der Pkw-Klimaanlagen wird damit zum R134a-Nettolieferanten. Gegenüber dem Szenario "Voller H-FKW-Umstieg", wo die 134a-Emissionen bis maximal 2400 t (2012) steigen, liegt das Maximum beim "134a-Ausstieg ab 2005" bei 1919 t und bereits im Jahr 2007. Die

Emissionen sinken bis zum Jahr 2020 auf fast Null, während sie im ersten Modell dann noch 2161 t betragen.

2.5 Weniger H-FKW-Emissionen in der gesamten Mobilkälte

Die Modelle "Vollumstieg" und "Teilumstieg" unterscheiden sich nicht bei der "sonstigen Mobilkälte", sondern nur bei Pkw-Klimaanlagen. Bis zum Jahr 2005 sind die Emissionskurven nach beiden Modellrechnungen gleich. Danach streben sie - wegen des Wechsels von R134a zu CO₂ in Autoklimaanlagen - stark auseinander. Genauer: Während beim "Vollumstieg" die Gesamtemissionen nahezu unverändert hoch bleiben, sinken sie beim "Teilumstieg" bis zum Jahr 2020 steil ab. Vgl. Diagramm 34.

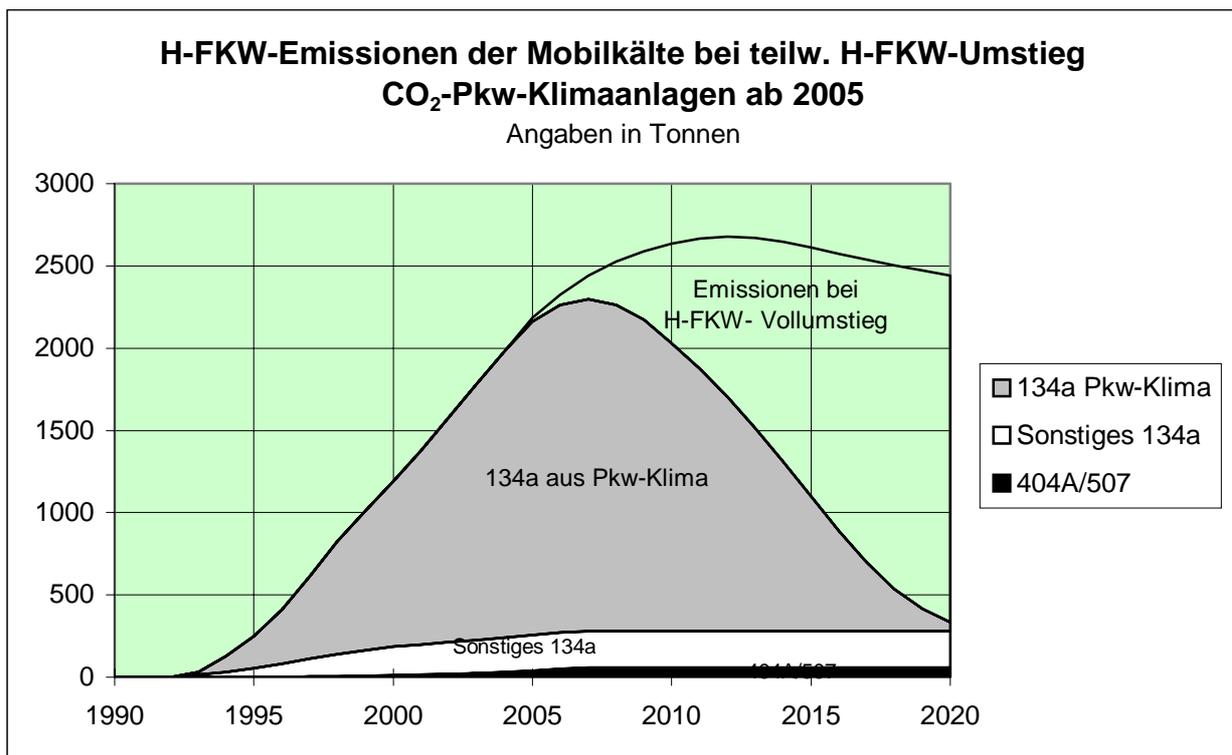


Diagramm 34: H-FKW-Emissionen aus der gesamten Mobilkälte bei partiellem H-FKW-Umstieg bzw. bei Pkw-Klimaanlagen mit CO₂ ab 2005. Die Gesamtemissionen sind durch Pkw-Klimaanlagen bestimmt. Ab 2005 vermindern sich die Gesamtemissionen stark, so daß sie bis 2020 unter 500 t absinken. Zum Vergleich ist die Kurve der Gesamtemissionen aus Diagramm 32 ("Voller H-FKW-Umstieg") eingetragen. Damit wird der Emissionsabstand zwischen Partial- und Vollumstieg deutlich sichtbar. Er beträgt im Jahr 2020 über 2000 t.

Absolute Zahlen enthält Tabelle 50. Die Summe aus "1. Sonstige Mobilkälte" und "2. Pkw (Teilumstieg)" ergibt die Gesamtemissionen bei partiellen H-FKW-Umstieg mit dem Rückgang von R134a ab 2005. Die Summe aus "1. Sonstige Mobilkälte" und "3. Pkw (Vollumstieg)" ergibt die Gesamtemissionen bei vollem FCKW-Ersatz durch H-FKW. Bis 2005 unterschieden sich beide Summen nicht und im Jahr 2010 noch wenig. Doch im Jahr 2020 emittieren aus Pkw-Klimaanlagen beim "Teilumstieg" nur noch 56 t, während es beim "Vollumstieg" 2161 t sind.

Zusammen betragen die Kältemittlemissionen im Jahr 2010 beim Teilumstieg 2030 t, beim Vollumstieg 2636 t. Zehn Jahre später hat sich die Differenz zwischen beiden Modellen viel stärker bemerkbar gemacht: Zusammen betragen die Kältemittlemissio-

nen 2020 beim Teilumstieg nur noch 336 t, bei Vollumstieg dagegen 2 441 t (jeweils Tabelle 50, Spalte 1+2 gegen Spalte 1+3).

Tab. 50: H-FKW-Emissionen der Mobilkälte. Partial- und Vollumstieg auf H-FKW					
	1. sonstige Mobilkälte			2. Pkw (Teilumstieg)	3. Pkw (Vollumstieg)
	134a	404A	407C	134a	134a
1995	55	0	0	191	191
2000	176	9	1	1005	1005
2005	215	36	4	1908	1929
2010	221	53	6	1750	2356
2020	221	53	6	56	2161

C: Beitrag zum Treibhauseffekt im Vergleich

Werden die in Tabelle 50 als metrische Tonnen dargestellten Emissionen der einzelnen Kältemittel mit ihrem spezifischen GWP-Wert gewichtet, erhält man ihren Beitrag zum Treibhauseffekt.

Der Unterschied der Klimawirkung beider Modelle (vgl. Diagramm 35 und Tabelle 51) ist deutlich: Im Jahr 2020 beträgt die Differenz über 2,77 Mio. t CO₂-Äquivalente oder 84%.²²

Tab. 51: Beitrag zum Treibhauseffekt durch H-FKW -Emissionen aus der Mobilkälte 1995 bis 2010 - Schätzungen in Mio. t CO₂-Äquivalente									
		Voller H-FKW-Umstieg				Partieller H-FKW-Umstieg			
H-FKW	GWP	1995	2005	2010	2020	1995	2005	2010	2020
134a	1300	0,32	2,79	3,35	3,10	0,32	2,76	2,56	0,36
404A/507	3268	0,00	0,12	0,17	0,17	0,00	0,10	0,14	0,14
407C	1525,5	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
Summe		0,32	2,91	3,53	3,28	0,32	2,87	2,71	0,51

Quellen: Berechnungen auf Grundlage von Tabelle 50. Das GWP von 404A/507 (3268) wurde durch Gewichtung 80% (404A) zu 20% (507) ermittelt. Das Jahr 2000 fehlt aus Platzgründen.

²² Dem Modell "Teilweiser H-FKW-Umstieg" liegen gleiche Leistungsziffern der R134a- und der CO₂-Klimaanlagen zugrunde. Ein bei der Nutzung ev. verbleibendes Effizienzdefizit des transkritischen Kältekreislaufs im Vergleich zu R134a-Anlagen, deren Effizienz sich künftig weiter steigern dürfte, würde zu höherem Kraftstoffverbrauch und damit höherem indirektem Treibhauseffekt führen.

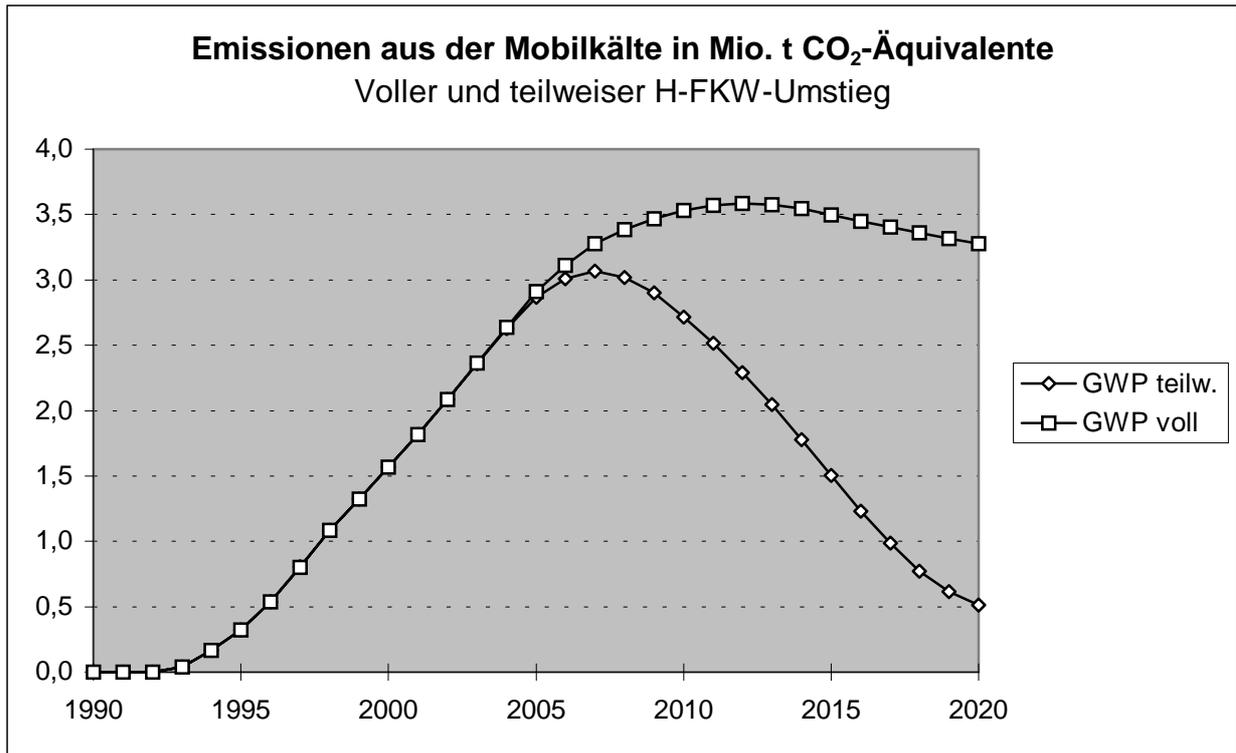


Diagramm 35: Beitrag zum Treibhauseffekt durch H-FKW-Emissionen der Mobilkälte bei vollem und partiellem H-FKW-Umstieg. Ab 2005 beginnt eine starke Auseinanderentwicklung. 2020 beträgt die Differenz 84% oder 2,77 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente.

3. Treibmittel für PU-Montageschaum

Polyurethan- oder PU-Montageschaum aus der Sprühdose wird seit Mitte der 70er Jahre verarbeitet, und zwar meist von Handwerkern und mehr oder weniger professionellen Heimwerkern beim Innenausbau der Wohnung. Mit dem zähflüssigen und schnellhärtenden Material werden u. a. Fenster- und Türrahmen und Rolladenkästen befestigt, Installationsschlitze, Decken- und Wanddurchführungen verfüllt usw. (Arbeitskreis PU o.J.). Wärmedämmung spielt nur bei Außenwänden eine Rolle und ist gegenüber der relativ einfachen und zugleich stabilen Hohlraumausfüllung sekundär.

3.1 Die Funktion der fluorierten Treibmittel

Zur Bildung und Aushärtung des Schaumes reicht die Luftfeuchtigkeit aus. Doch für die Beförderung des Schaums aus der Dose sind Treibmittel erforderlich. Dafür werden seit dem Verbot von H-FCKW (1.1.1993) wie bei anderen Druckgaspackungen preiswerte Kohlenwasserstoffe (Propan, Butan, Dimethylether) eingesetzt. Da aber anders als z.B. ein Haarspray der PU-Schaum nicht in vielen Einzeldosierungen, sondern möglicherweise in einem Arbeitsgang ganz entleert wird, ist bei der Anwendung in kleinen Räumen ein Explosionsrisiko durch die leicht brennbaren Treibmittel im Zusammenhang mit der hitzebildenden Schaumreaktion nicht auszuschließen.

Darum haben sich die europäischen PU-Dosen-Abfüller und -Vermarkter darauf geeinigt, leicht brennbare Kohlenwasserstoffe auf 50 Gramm pro 750 ml-Dose zu begrenzen (COCON 1996, 3) und den restlichen Treibmittelbedarf durch nichtbrennbare oder schwerbrennbare Stoffe zu decken. Diese Stoffe sind bei den inländischen Abfüllern hauptsächlich der - nichtbrennbare - H-FKW 134a. Bei ausländischen Abfüllern, die nach Deutschland liefern, überwiegt der - schwerbrennbare - H-FKW 152a. H-FKW-Treibmittel machen im Durchschnitt 14 Gewichtsprozent des Dosengewichts aus. (Befragung PU-Schaum)

3.2 Markt und Außenhandel

In Deutschland werden jährlich, je nach Konjunktur, zwischen 18 und 25 Millionen PU-Schaumdosen befüllt - im langfristigen Mittel 20 Millionen (Befragung PU-Schaum). Davon wird zwar ca. die Hälfte exportiert, aber gleichzeitig wird eine gleichgroße Menge importiert. Nur die Zahl der Dosen betrachtet, entspricht daher die inländische Abfüllung mengenmäßig dem inländischen Verbrauch von 20 Millionen Stück.

Der Außenhandel hat jedoch einen Einfluß auf die Struktur der im Inland versprühten Treibgase. Inländische Abfüller verwenden in der Hauptsache R134a, während importierte PU-Schaumdosen hauptsächlich R152a enthalten. Letzteres deshalb, weil sich der mit Abstand größte europäische Abfüller und größte Lieferant für den deutschen Markt, die Schweizer Fa. Rathor AG, auf R152a als ausschließliches H-FKW-Treibmittel festgelegt hat (Rathor 1996). Da die inländischen Hersteller zwei Drittel ihrer Dosen mit R134a und ein Drittel mit R152a befüllen (es sind keine Gemische, sondern verschiedene Dosen), während es bei den Importen gerade umgekehrt ist, ist davon auszugehen, daß die im Inland verwendeten Dosen tendenziell je zur Hälfte R134a bzw. R152a als Treibgas enthalten. R152a weist mit dem GWP von 140 (Betrachtungszeitraum: 100 Jahre) ein weit geringeres Treibhauspotential als R134a (GWP: 1300) auf, wenngleich es nicht so schwer brennbar wie R134a ist.

3.3 Übereinstimmung von Verbrauch und Emission

Montageschaumdosen werden in unterschiedlichen Größen angeboten. Das Füllvolumen reicht von 300 bis 750 ml, wobei die größeren Dosen überwiegen, so daß die Durchschnittsgröße bei 550 ml liegen dürfte (Befragung PU-Schaum). Das sind bei einer Dichte von 1,1 ca. 600 Gramm Füllgewicht pro Dose. Die 14 Gewichtsprozent H-FKW-Treibmittel machen pro Dose folglich rechnerisch 84 Gramm aus. Für die jährlich 20 Millionen Schaumdosen werden insgesamt somit 1680 Tonnen H-FKW verbraucht.

Es stellt sich die Frage, ob bei den Treibmitteln Verbrauch und Emission im Falle der PU-Schaumdosen genauso gleichzusetzen sind wie bei anderen Aerosol-Sprays. Dazu sind zwei Besonderheiten zu beachten.

1. Von dem beim Verschäumen austretenden Treibgas gelangen ca. 70% direkt in die Atmosphäre, 30% bleiben in den Poren des erzeugten Schaums eingeschlossen und tragen zur Erhöhung seines Dämmvermögens bei. Da es beim Montageschaum keine Diffusionssperren aus Alu-Folie o.ä. gibt, sind die H-FKW aus den Schaumporen jedoch relativ schnell, d.h. innerhalb von 5 bis 10 Jahren ausgegast (Henkel 1996).
2. Seit 1994 gibt es in Deutschland eine zentrale Recyclinganlage für gebrauchte PU-Schaumdosen, die P.D.R. im fränkischen Thurnau (Aerosol and SprayReport, Vol. 34, No. 4/95, 192/193). Wegen ihres Restgehaltes an Isocyanat erhalten die PU-Dosen nicht den Grünen Punkt von der DSD GmbH, sondern müssen anders als gängige Spraydosen als Sonderabfall entsorgt werden. Die P.D.R. will den größten Teil der von professionellen Anwendern benutzten Dosen, das sind etwa zwei Drittel des Gesamtverbrauchs, und perspektivisch auch die von Heimwerkern bei lokalen Sondermüll-Sammelstellen abgegebenen Dosen zurückgewinnen (P.D.R. 1996a). In diesem Zusammenhang ist der nichtversprühte H-FKW-Restgehalt von Belang. Er beträgt nach P.D.R.-Angaben noch 8% der ursprünglichen Menge bzw. 7 Gramm pro Dose (P.D.R. 1996b). Die Treibmittel werden als H-FKW/KW-Gemisch über eine Kältefalle zurückgewonnen; das Gemisch wird danach für technische Aerosole mit niedrigen Ansprüchen an die Treibmittelzusammensetzung verwendet. Dabei gelangen die H-FKW endgültig in die Atmosphäre.

Die beim Versprühen nicht direkt in freigesetzte H-FKW-Treibmittel gelangen - zeitversetzt - doch vollständig in die Atmosphäre. Dies gilt sowohl für die Treibmittel, die zunächst im verarbeiteten Schaum eingeschlossen sind, als auch für die Treibmittel, die als Rest in der benutzten Dose verbleiben. In Kenntnis der Sachverhalts, daß ein gewisser Teil der versprühten Treibmittel nicht schon im Verbrauchsjahr in die Atmosphäre gelangt, sondern später, werden die jährlichen Verbrauchsmengen aus Gründen der Vereinfachung hier trotzdem mit jährlichen Emissionen gleichgesetzt²³.

A: Emissionsmodell 50 zu 50

Abgesehen von jährlichen Schwankungen werden im Inland ca. 1680 Tonnen H-FKW-Treibgase aus PU-Schaumdosen versprüht. Es handelt sich dabei zu einem Teil um

²³ Eine weitere mögliche Differenz zwischen Verbrauch und Emissionen sind Befüllungsverluste. Diese betragen nach Herstellerangaben 0,4 bis 0,5 Gramm pro Dose. Das sind bei 20 Mio. Stück zwischen 8 und 10 Tonnen jährlich. Angesichts der generellen Unschärfe bei der Verbrauchsermittlung wird diese Menge nicht gesondert, sondern als im Gesamtverbrauch eingeschlossen behandelt.

R134a, zum anderen Teil um R152a. Eine effektive 50:50-Zusammensetzung der Emissionen dürfte bis 1999 gegeben sein. Anfang der 90er Jahre wurde noch mehrheitlich R134a eingesetzt, weil erstens die Produktionskapazität für R152a noch zu gering war und zweitens noch erhebliche Vorbehalte seitens der Abfüller gegen diesen Stoff wegen möglicher Brandgefahr bestanden. 1995 machte R152a aber schon 40% des Gesamtverbrauchs aus, 1996 schon 44% (Befragung PU-Schaum).

Das Szenario nach Emissionsmodell A, das hier wegen seiner ab 2000 hälftigen Treibmittelstruktur "50 zu 50-Modell" heißt, unterstellt, daß es längerfristig bei der Zusammensetzung von 50% R134a und 50% R152a bleibt. Im übrigen nehmen auch die Branchenexperten (Befragung PU-Schaum) weder eine schnelle Änderung beim inländischen Gesamtverbrauch noch bei der Treibmittelzusammensetzung an. In Tabelle 52 pendeln sich die Treibmittel bei jeweils 840 t jährlich ein. Im Diagramm 36 gibt es daher ab dem Jahr 2000 nur noch horizontale Emissionskurven für die beiden Treibgase.

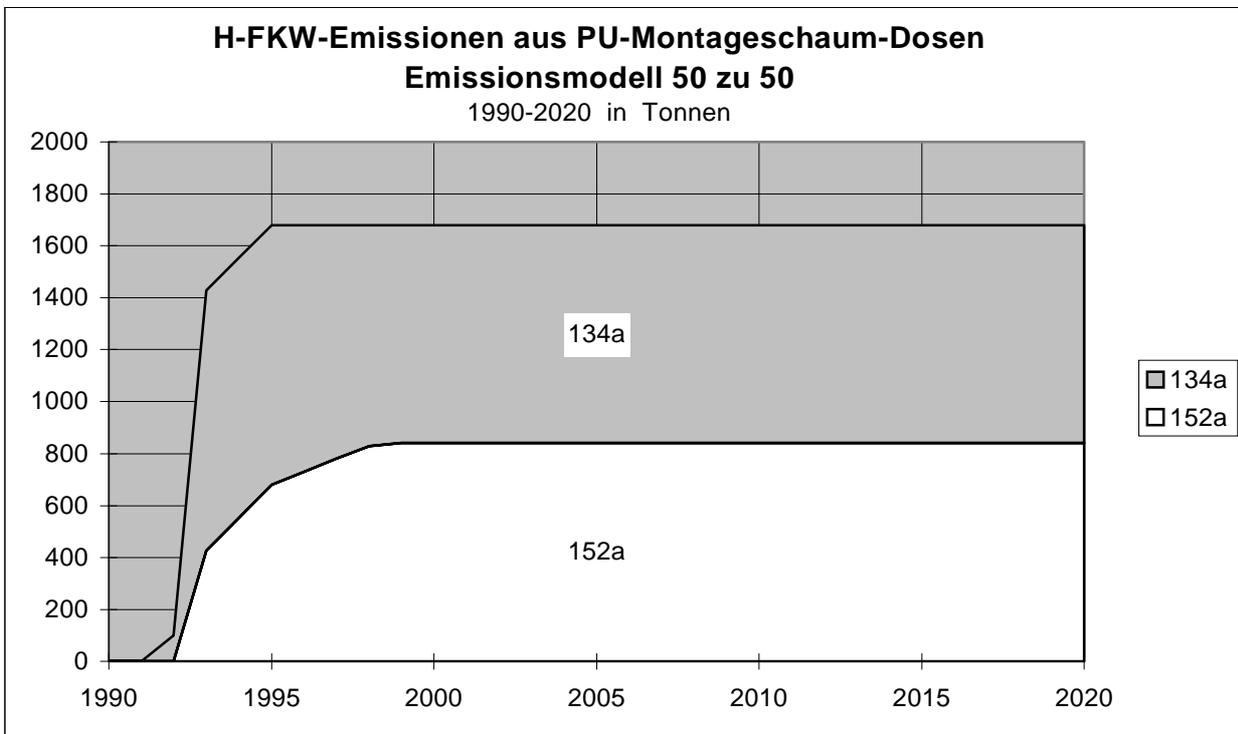


Diagramm 36: H-FCKW-Emissionen aus PU-Montageschaum-Dosen 1992-2020 im Modell 50 zu 50. Nachdem in den Anfangsjahren bis 1995 R134a als Treibmittel im Inlandsverbrauch noch überwog, teilen sich R134a und R152a von 1999 an den Markt und damit die Emissionen jeweils zur Hälfte, d. h. jeweils zu 840 Tonnen.

Tab. 52: Emissionen von H-FKW 134a und 152a aus PU-Montageschaum-Dosen Emissionsmodell 50 zu 50. Angaben in Tonnen				
H-FKW-Typ	1990	1995	2000	2010
134a	0	1000	840	840
152a	0	680	840	840
Summe	0	1680	1680	1680

Quelle: Befragung PU-Schaum.

B: Emissionsmodell 0 zu 100

Wegen der hohen Verarbeitungsbequemlichkeit von PU-Montageschaum haben die Alternativen Spritzkork, Mineralwolle oder Gips seinen Markt bislang kaum verringern können, zumal ihr Anwendungsspektrum nicht so breit ist.

Das Szenario nach Alternativmodell B nimmt darum keinen "Teilumstieg" auf Nicht-H-FKW an wie bei den Kältemitteln. Es geht davon aus, daß der inländische Gesamtverbrauch von PU-Dosenschaum und damit die Emissionsmenge fluoriierter Treibmitteln langfristig konstant bleiben. Vom Standpunkt des Klimaschutzes aus ist aber innerhalb der PU-Schaum-Anwendung ein weiterer Trend zu R152a sinnvoll, weil sein spezifisches Treibhauspotential (GWP: 140) nur 11 Prozent des Wertes von R134a (GWP: 1300) beträgt. An der technischen Machbarkeit besteht kein Zweifel.

Im Emissionsmodell 0 zu 100 wird mit einer Fortsetzung des Wachstumstrends zugunsten von R152a auf Kosten von R134a um jährlich 50 Tonnen ab 1995 gerechnet.

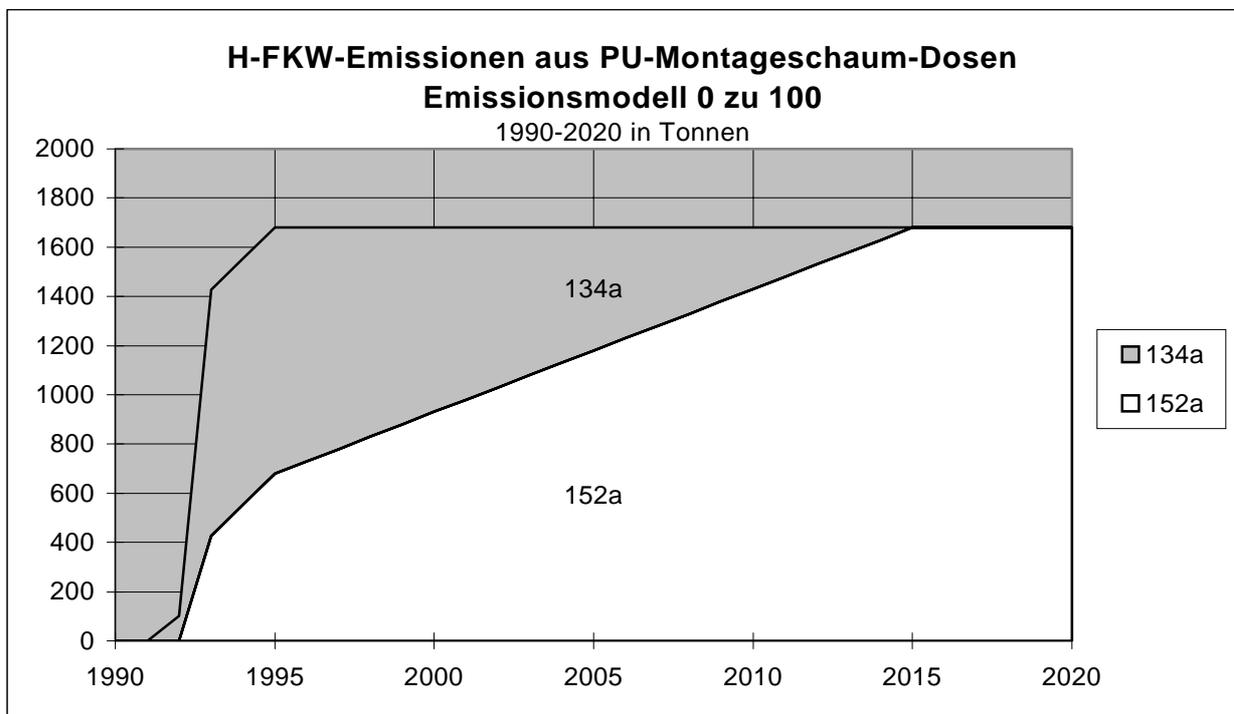


Diagramm 37: H-FKW-Emissionen aus PU-Montageschaum-Dosen 1992-2020 nach Emissionsmodell 0 zu 100. Wird der Trend - 50 t jährlich mehr R152a auf Kosten von R134a - ab 1995 extrapoliert, bestehen die Treibmittel ab 2015 ausschließlich aus R152a (Anteil 100%).

Diagramm 37 und Tabelle 53 zeigen, daß im Falle einer jährlichen Verschiebung der Treibmittelanteile um 50 t zugunsten von R152a im Jahr 2015 nur noch dieser H-FKW als Treibmittel versprüht wird, kein R134a mehr (Anteile: 100 zu 0).

Tab. 53: Emissionen von H-FKW 152a und 134a aus PU-Montageschaum-Dosen Emissionsmodell 0 zu 100. Angaben in Tonnen						
H-FKW-Typ	1990	1995	2000	2005	2010	2015 ff.
134a	0	1000	750	500	250	0
152a	0	680	930	1180	1430	1680
Summe	0	1680	1680	1680	1680	1680

Quelle: Tabelle 52. Ab 1995 jährliches Wachstum um 50 t bei 152a auf Kosten von 134a.

C: Beitrag zum Treibhauseffekt im Vergleich

Der Interessensverband der PU-Dosenschäumhersteller wirbt damit, daß die Schäume zur Senkung des Treibhauseffekts beitragen: Der Treibhauseffekt durch das freiwerdende Treibmittel werde infolge der schaumbedingten Wärmedämmung "bereits nach kurzer Zeit durch die Einsparung fossiler Brennstoffe mehr als wettgemacht" (Arbeitskreis PU o.J). Die angeforderten Belegmaterialien enthalten fertige, aber nicht nachprüfbar Resultate, die zudem nur den Anwendungsbereich Außendämmung berücksichtigen, ohne ihn innerhalb des Gesamtverbrauchs zu gewichten. Vorliegende Studie beschäftigt sich ihrer Aufgabenstellung gemäß nur mit dem direkten Treibhausbeitrag durch H-FKW-Treibmittel.

Was bringt eine bis 2015 erfolgende komplette Umstellung der Treibmittel auf R152a (Modell 0 zu 100) an Entlastung für den Treibhauseffekt gegenüber dem Modell 50 zu 50, bei dem die Treibmittel je zur Hälfte aus R134a bzw. R152a bestehen?

Tab. 54: Beitrag zum Treibhauseffekt durch H-FKW-Emissionen aus PU-Montageschaumdosen - Schätzungen in Mio. t CO₂-Äquivalente

		Emissionsmodell 50:50				Emissionsmodell 0:100			
H-FKW	GWP	1995	2005	2010	2015	1995	2005	2010	2015
134a	1300	1,30	1,09	1,09	1,09	1,30	0,65	0,33	0
152a	140	0,10	0,12	0,12	0,12	0,10	0,17	0,20	0,24
Summe		1,40	1,21	1,21	1,21	1,40	0,82	0,52	0,24

Quellen: Mengenwerte aus Tabelle 15 und 16. (Das Jahr 2000 fehlt aus Platzgründen).

Nach Tabelle 54 vermindert sich der Beitrag zum Treibhauseffekt in CO₂-Äquivalenten erheblich. Er entspricht im Zieljahr 2015 nicht 1,21 Mio. t CO₂, sondern nur 20 Prozent davon, nämlich 0,24 Mio. t CO₂. Das heißt, daß durch den stofflichen Austausch von R134a durch R152a fast 1 Mio. t CO₂-Äquivalente eingespart werden kann.

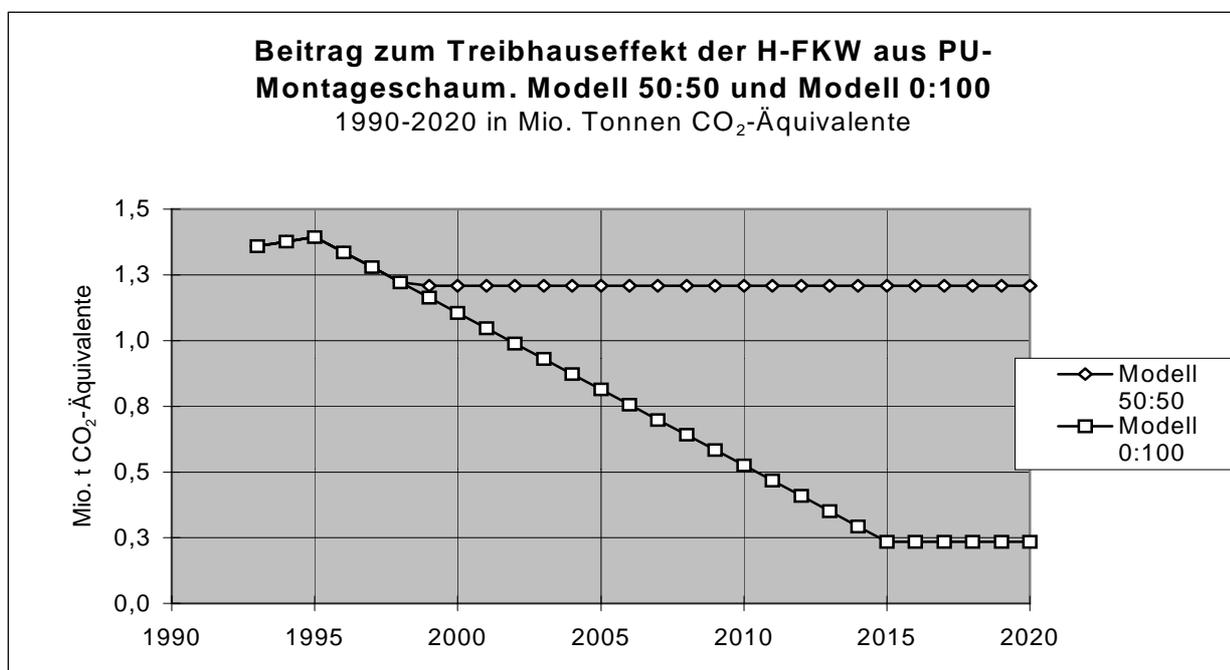


Diagramm 38: Beitrag zum Treibhauseffekt durch H-FKW aus PU-Montageschaum in Mio. t CO₂-Äquivalente. Die 100%-ige Verwendung von R152a als Treibmittel (untere Kurve) zeigt sich klar klimagünstiger als die Verwendung von je 50% R134a und R152a (obere Kurve).

4. Asthmasprays

Inhalationssprays gegen Asthma sind als "essential uses" die derzeit einzige legale Aerosolanwendung vollhalogener FCKW. Ein zwischen 6 und 20 ml großes Asthmaspray enthält im Durchschnitt 1% bronchialerweiternde oder entzündungshemmende Arzneistoffe und 99% komprimierte FCKW als Treibgas. FCKW wird verwendet, weil es nicht humantoxisch ist und während der gesamten Nutzung des Medikamentes konstanten Sprühdruck für die üblichen 80 bis 300 Einzeldosen garantiert.

Die inländischen Verbrauchs- bzw. Abfüllmengen von FCKW unterliegen seit 1995 internationaler Regulierung durch EU- und UNO-Behörden, die jährlich über die beantragten Kontingente der Pharmaunternehmen befinden. Die von der EG für 1995 genehmigte FCKW-Menge für die europaweite Abfüllung von Asthmasprays betrug 8800 Tonnen (Amtsblatt EG 1994, 130). Mittelfristig wird die Durchsetzung FCKW-freier Inhalationsgeräte (H-FKW-Sprays und Pulverinhalatoren) die FCKW-Ausnahmegenehmigungen überflüssig machen.

4.1 Die Vorzüge der Inhalationstherapie und das Sprayverfahren

Der Vorteil der inhalativen gegenüber der oralen Anwendung besteht darin, daß die Zufuhr des Wirkstoffs über die Atemwege seine direkte und schnelle Deposition in der Lunge als Wirkort ermöglicht. Das erhöht den Wirkungsgrad des Arzneistoffs, weil im Vergleich zu Tabletten weniger Zeit und weniger Wirkstoff erforderlich sind, das Medikament direkt an den Wirkort gelangt und daher kaum Nebenwirkungen für den Körper eintreten.

Inhalative Anwendung ist nicht identisch mit Sprayverfahren. Fast alle für die Akut- und Dauertherapie (die zwei Elemente der Asthmatherapie) erforderlichen Wirkstoffe lassen sich sowohl mit Sprays als auch mit Pulvergeräten inhalieren. Die bis Anfang der 90er Jahre in Deutschland gängigen Pulvergeräte waren allerdings nur für die kleine Gruppe von Patienten mit Unverträglichkeiten gegenüber Sprays (z.B. Kältereiz) bestimmt, technisch wenig entwickelt und relativ umständlich zu handhaben. Als sog. "single-dose-units" vom Kapsel- oder Blistertyp geben solche Geräte vor der Neubeladung maximal acht Dosen ab, manche auch nur eine Dosis (Vidgren 1996). Demgegenüber gewährleistet ein Treibgas-Spray bis zu 300 Sprühstöße mit gleichgroßer Wirkstoffmenge²⁴. Vor allem aufgrund des praktischen Vorteils für die Patienten bilden die diskret und einfach zu handhabenden Sprays weltweit das Standardverfahren der inhalativen Asthmatherapie.

Vor diesem Hintergrund und dem sich abzeichnenden Bann über FCKW bemühten sich seit Anfang der 90er Jahre die meisten auf dem Gebiet der Atemwegserkrankungen international führenden Pharmaunternehmen um neue Aerosol-Treibmittel. In zwei Konsortien - IPACT 1 und IPACT 2²⁵ - untersuchten sie die HFKW 134a und 227 auf ihre Tauglichkeit als FCKW-Ersatzstoffe und unterwarfen sie bis 1994/95 den für neue Arzneimittelformulierungen erforderlichen Toxizitätsstudien. Danach folgten klinische Prüfungen mit H-FKW-Sprays. Mit einer breiten Markteinführung für die wichtigsten

²⁴ Daher die international gebräuchliche Bezeichnung MDI für Treibgas-Inhalatoren, nämlich "Metered Dose Inhaler", weil mehrfache und zugleich exakt bemessene Dosierung nur durch Sprays möglich war.

²⁵ IPACT = International Pharmaceutical Aerosol Consortium for Toxicology Testing. IPACT 1 testete H-FKW 134a von Du Pont, IPACT 2 testete den H-FKW 227 von Hoechst.

Wirkstoffgruppen durch die marktbedeutenden Unternehmen ist nach Einschätzung des Weltmarktführers Glaxo-Wellcome erst in den Jahren 1998 bis 2000 zu rechnen (Atkins 1996); die vollständige FCKW-Substitution dürfte sich bis nach 2005 hinziehen.

Seit 1995 ist auf dem internationalen und seit April 1996 auch auf dem deutschen Markt ein erstes H-FKW-getriebenes Dosieraerosol vertreten. Es wurde von dem US-Konzern "3M", der nicht nur starke Aktivitäten bei Fluorchemikalien, sondern auch in der Spraytechnologie aufweist, entwickelt und wird von "3M Medica" und "Asta Medica" auf dem deutschen Markt angeboten (3M Medica 1996). Damit ist der Umstieg von FCKW auf H-FKW in Gang gekommen, auch wenn er bisher zögerlich verläuft (Befragung Asthmasprays).

4.2 Pulverinhalation begrenzt das Marktpotential für Sprays

Im Jahre 1995 wurden in Deutschland 1000 t FCKW abgefüllt (Umwelt 1996, 78), und zwar in ca. 70 Mio. Asthmasprays. Da mit "Boehringer-Ingelheim" in Deutschland eines der weltweit größten Unternehmen für Asthmamedikamente produziert, ist der Exportanteil sehr hoch. Der aus Eigenproduktion und Importen gebildete Inlandsverbrauch lag bei 400 t, worunter sich 180 t FCKW in Spraydosen befanden, die im Ausland abgefüllt wurden (Befragung Asthmasprays).

Insgesamt boten 1995 über 20 Unternehmen FCKW-haltige Dosieraerosole in einer oder mehreren Wirkstoffgruppen an. Die Hauptmasse des Inlandsverbrauchs, nämlich 325 t oder 83% der versprühten FCKW, wurde in Sprays der fünf Firmen verkauft, die Mitglied der AIDA (Arbeits- und Informationsgruppe Dosier-Aerosole) sind: "Boehringer Ingelheim", "Glaxo Wellcome", "RPR/Fisons", "Asta Medica" und "3M Medica".

Da bei Sprays Benutzung und Emission gleichgroß sind, betragen die inländischen Emissionen 1995 gleichfalls 400 t. Diese Menge ist die Bezugsgröße für die Abschätzung der künftigen Inlandsemissionen von H-FKW im Modell "Voller H-FKW-Umstieg".

Aus zwei, wenngleich gegenläufigen, Gründen ist der inländische Gesamtmarkt der inhalativen Asthmatherapie allerdings keine dauerhaft statische Größe.

Erstens rechnen die Experten mit einem gleichbleibenden Trend der Rate von Neuerkrankungen von ca. 4-5% jährlich. Damit wächst auch der Markt für die inhalative Therapie.

Zweitens nimmt der Anteil von treibgasfreien Pulverinhalatoren seit 1990 stetig zu.

4.2.1 Mehrfach dosierbare Pulverinhalatoren seit 1990

Die angesichts des drohenden FCKW-Verbots Ende der achtziger Jahre forcierte Suche nach FCKW-freien und dennoch gleichwertigen Stoffen und Verfahren führte auch in der Asthmatherapie zu einem "Innovationsschub" (Matthys 1995), der auf eine Optimierung der Pulverinhalation hinauslief. Dabei war die skandinavische Pharmaindustrie besonders aktiv (Vidgren 1996). 1990 brachte das schwedische Unternehmen "Astra" erstmals einen Pulverinhalator auf den deutschen Markt, der 200 Einzeldosen eines bronchialerweiternden Wirkstoffs für die Akuttherapie abgibt. 1993 folgte das gleiche

Gerät mit einem Steroid-Wirkstoff für die Basistherapie (Astra 1996). 1995 und 1996 folgte auf dem deutschen Markt die aus Finnland stammende "Orion Pharma" mit einem neuartigen, weil dem Spray-Gerät ähnlichen Pulverinhalator für ebenfalls 200 Einzeldosen, der für beide Wirkstoffgruppen verfügbar ist (Orion 1996). Seit Anfang 1996 bietet auch der weltgrößte Pharmakonzern "Glaxo Wellcome" neben seinen FCKW-haltigen Sprays einen Pulverinhalator für 60 Einzeldosen an, ebenfalls für bronchialerweiternde und entzündungshemmende Wirkstoffe. In Vorbereitung sind drei weitere vielfach dosierbare Pulverinhalatoren (Köhler 1995, 1402).

Damit gibt es auch in Deutschland einen gewissen Pulvertrend, der das Marktpotential für Treibgas-Inhalatoren begrenzt. Gegenüber anderen Industrieländern ist der Pulveranteil, bezogen auf die inhalativ therapierten Patienten, gering. Er lag 1992 erst bei 3,7%, während damals die Niederlande 57,2%, Norwegen 40,8% und Schweden 60% aufwiesen. Auf den beiden weltgrößten Pharmamärkten, in den USA und in Japan, spielen Pulverinhalatoren mit 0,6 bzw. 0,7% eine noch geringere Rolle (UNEP IE 1994, 2-101)²⁶. Im Jahre 1996 erreichte in Deutschland der Pulveranteil bereits 10% (s.u.). In Schweden liegt er heute bei etwa 90%.

Nach Einschätzung der AIDA-Mitgliedsfirmen werden zwar die H-FKW 134a und 227 in Zukunft die "FCKW 1:1 substituieren können. Allerdings wird der Anteil von Pulverinhalatoren durch weitere Neuentwicklungen in den nächsten Jahren kontinuierlich zunehmen, so daß davon auszugehen ist, daß sich der Anteil der H-FKW entsprechend verringert. Nach Schätzungen der AIDA-Firmen ist zu erwarten, daß sich der Anteil der Pulverinhalatoren im Jahr 2000 auf 20-30%, im Jahr 2005 auf 30-40% und im Jahr 2010 auf 40-45% belaufen wird." (AIDA 1996) Die Pharmafirmen, die gegenwärtig hauptsächlich Sprays herstellen, sind also der Meinung, daß in den nächsten 15 Jahren genausoviel H-FKW aus Asthmadosieraerosolen versprüht werden wie heute FCKW, daß aber der Marktzuwachs von 30-35% durch Pulverinhalatoren gedeckt wird.

Diese Prognose liegt dem Modell A "Voller H-FKW-Umstieg" zugrunde.

4.3 Medizinisches Pro und Contra Pulverinhalation

Die medizinische Debatte "Spray versus Pulver" ist in Deutschland vor allem durch den internationalen Pulvertrend und dadurch in Gang gekommen, daß ein Unternehmen nach Einführung seines Pulverinhalators als bisher einziger Atemwegsspezialist ganz auf FCKW- oder H-FKW-Sprays verzichtet hat ("Orion Pharma").

Die medizinischen Befürworter des Sprayverfahrens führen im wesentlichen zwei Argumente gegen die Pulverinhalation an:

1. Anders als bei Dosieraerosolen (Spraystoß) sei zum Einatmen des Pulvers ein minimales Atemzugsvolumen erforderlich. Nicht alle Patienten könnten dieses Atemzugsvolumen aufbringen.
2. Bei hoher Luftfeuchte, etwa in den Tropen, sowie bei Bedienungsfehlern der Patienten (Hineinblasen) könne das Pulver "verklumpen". (Dt. Atemwegsliga 1995).

²⁶ "An intense technical development of dry powder inhalers is going on, which might further enhance the possibilities for this non-CFC alternative. There was a relative increase in the global use of dry powder inhalers of about 5% between 1990 and 1992, reaching approximately 15% of inhaled medicines in 1992." (UNEP 1994, 65)

3. Nicht bei allen Pulvergeräten könne der Patient die eingeatmete Wirkstoffmenge kontrollieren.

Die medizinischen Befürworter der Pulverinhalation weisen auf folgendes hin:

1. Die Lungendeposition des Wirkstoffs sei dank des aktiven Einatmens des Patienten besser als bei Sprays. Die bei Sprays notwendige, aber schwierige Koordination zwischen Auslösen des Sprühstoßes und Einatmung entfällt (u.a. Matthys 1995, 1007).
2. Der hohe Anteil der Pulverinhalation von über 80% bei einzelnen Wirkstoffgruppen in Schweden, Norwegen oder den Niederlanden beweist ihre praktische Möglichkeit.
3. Der Anteil der Patienten, die keine Pulverinhalation anwenden können, wird auf wenige Prozent geschätzt (Schultze-Werninghaus 1996, 20).

Das anfänglich starre "Entweder-Oder" löst sich heute in eine differenzierte Betrachtung auf. Beispiel dafür ist die Konsensposition eines Bonner Fachgesprächs aller beteiligten Kreise vom November 1996 mit Lungenfachärzten, Patientenorganisationen, Pharmaindustrie, Krankenkassen, Umweltverbänden (Fachgespräch Atmosphärenschutz 1996). Hier wurde konstatiert, daß einzelne Patientengruppen auf ein Treibgas-Spray angewiesen sind. Die große Mehrheit der Patienten ist sowohl mit Pulver als auch mit Sprays zu therapieren. Nach Ansicht der Diskussionsteilnehmer besteht die Möglichkeit, den "Marktanteil der umweltfreundlichen Pulver-Inhalatoren von jetzt 10% auf 50-70%" zu erhöhen (Ergebnisprotokoll 1996). Allerdings bleibt zu bedenken, daß Faktoren wie Marktverhältnisse (Stärke der einzelnen Pharmaunternehmen), Auffassung der verordnenden Ärzteschaft, Kosten usw. für die Realisierung einer solchen medizinischen Möglichkeit entscheidend sind.

Die Position, nämlich 70% Pulveranteil am wachsenden Gesamtmarkt, liegt dem Modell B: "Partieller H-FKW-Umstieg" zugrunde.

4.4 Aktuelle FCKW-Mengen im Bereich der gesamten Inhalationstherapie

Nach Untersuchungen im Rahmen dieser Studie wurden in den zwölf Monaten von Mitte 1995 bis Mitte 1996 in Deutschland 24 Mio. Inhalatoren zur Asthmatherapie an Patienten abgegeben, davon 2,5 Mio. Stück auf Pulverbasis (Befragung Asthmasprays). Die 21,5 Mio. Inhalationsprays enthielten ihrerseits 400 Tonnen FCKW.

Wäre die in den 2,5 Mio. Pulverinhalatoren enthaltene Wirkstoffmenge mittels FCKW-haltiger Dosieraerosole verabreicht worden, dann wären hierfür 41 Tonnen FCKW nötig gewesen²⁷. 1995/96 betrug das maximale Potential für FCKW-haltige Dosieraerosole demnach 441 Tonnen, von denen aber 41 Tonnen durch Pulverinhalatoren ersetzt wurden. So gerechnet lag der Pulveranteil bei 41 von 440 Tonnen oder bei knapp 10 Prozent. (Diese 41 Tonnen sind nicht das Gewicht des Pulvers, sondern das Gewicht der FCKW, die durch Pulverinhalation ersetzt wurden.)

²⁷Die Umrechnung beruht darauf, daß es 1995/96 für jeden Pulverinhalator vom selben Hersteller noch ein wirkstoffgleiches Dosieraerosol gab.

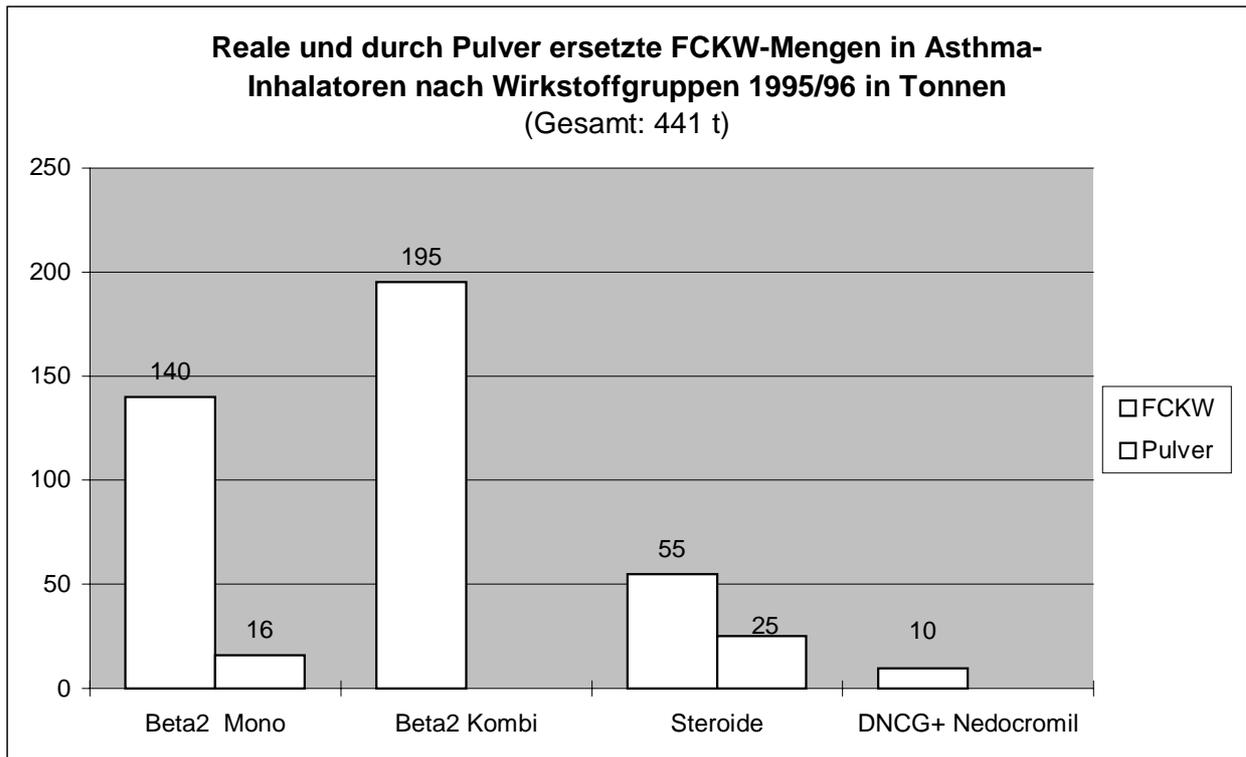


Diagramm 39: Reale und durch Pulver ersetzte FCKW-Mengen in Asthma-Inhalatoren nach Wirkstoffgruppen 1995/96 in Tonnen. Der Pulveranteil bei bronchialerweiternden Wirkstoffen (Beta-2) ist weit geringer als bei den entzündungshemmenden Wirkstoffen (Steroide). Insgesamt beträgt die durch Pulver ersetzte FCKW-Menge 41 t; reale FCKW waren es 400 t.

Diagramm 39 zeigt den durch Umrechnung der Pulverinhalation auf (ersetzte) FCKW ermittelten Treibgas- und Pulveranteil nach den vier Wirkstoffgruppen der inhalativen Asthmatherapie. Der Pulveranteil in der größten Wirkstoffgruppe (Beta-2-Kombipräparate) beträgt Null. Dagegen liegt er in der drittgrößten Wirkstoffgruppe (Steroide) bei über 31% (25 t zu 80 t in Diagramm 39). Dies hängt damit zusammen, daß Steroide nicht für den Notfall bestimmt sind, bei dem es auf schnelle und sichere Applikation ankommt. Für letztere gilt heute das Treibgas-Sprays als verlässlicher.

Beta-2-Mimetika und andere Wirkstoffe

Bei den Wirkstoffen "Beta-2-Mono" und "Beta-2-Kombi" handelt es sich um bronchialerweiternde Wirkstoffe: Beta-2-Sympathomimetika als Einzelwirkstoffe oder in Kombination mit einem anderen Wirkstoffen. Steroide sind nicht für den akuten Fall anzuwenden, sondern als entzündungshemmende Dauermedikamente. DNCG (Dinatriumcromoglycat) und Nedocromil sind leichte, nichtsteroidale Entzündungshemmer. Bei Beta-2-Kombis gibt es keine Pulverausführung, bei inhalativem DNCG und Nedocromil fällt Pulver nicht ins Gewicht.

A: Modell Voller H-FKW-Umstieg

Gelten die FCKW des Jahres 1995 als Richtmaß für künftig erforderliche H-FKW, dann setzt die Asthmatherapie im Inland mittelfristig 400 Tonnen H-FKW frei. Von den H-FKW kommen R134a und R227 als Treibgas infrage. Dabei wird der weitaus größere Teil R134a sein (Fachgespräch Atmosphärenschtz 1996). Das Szenario nimmt eine Zusammensetzung von zwei Drittel R134a und einem Drittel R227 an (Annahme beim Fachgespräch Atmosphärenschtz). Da der steigende Markt für die inhalative Asthmatherapie der AIDA-Einschätzung zufolge an die Pulverinhalation geht, ist der FCKW-Ausgangsbestand zugleich der H-FKW-Zielbestand.

Nach Expertenschätzungen wird die Masse der Dosieraerosole im Zeitraum 1998 bis 2000 umgestellt, schwierigere Rezepturen kommen noch bis 2005 auf den Markt. Eine einfachere Formulierung ist bereits seit 1996 auf dem deutschen Markt. Die unterschiedlich starken Schübe bei der Markteinführung berücksichtigt Tabelle 55.

Tab. 55: H-FKW-Treibgase aus Asthmasprays 1996-2010 in Tonnen						
Modell Voller H-FKW-Umstieg						
	1996	1998	1999	2000	2005	2010 ff.
R134a	<1	33	100	200	270	270
R227	0	17	50	100	130	130
Summe	1	50	150	300	400	400

Quelle: Befragung Asthmasprays; Atkins 1996.

Diagramm 40 zeigt: Nach Modell A ist die Umstellung im Jahr 2000 zu 75% und im Jahr 2005 zu 100% abgeschlossen. Die inländische Emissionen betragen dann jährlich 400 t.

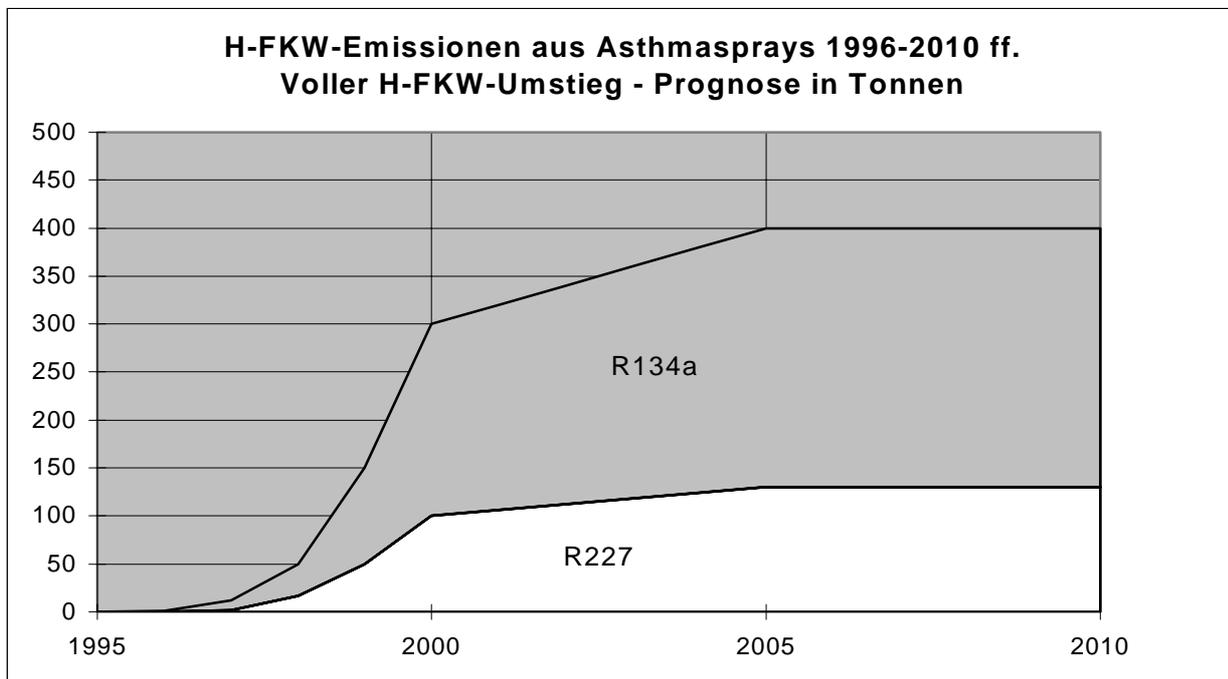


Diagramm 40: H-FKW aus Asthmasprays 1996-2010 ff. bei vollem Austausch der FCKW durch H-FKW. Nach dem Modell ist die Umstellung im Jahr 2000 zu 75% und 2005 ganz abgeschlossen. Die inländischen Emissionen betragen dann 400 t jährlich.

B: Modell Partieller H-FKW-Umstieg

Im alternativen Prognose-Modell B werden nicht alle FCKW durch H-FKW ersetzt. Die Modellrechnung nimmt an, wie im Abschnitt 4.3 erwähnt, daß der Anteil der Pulverinha-

lation an der gesamten inländischen inhalativen Therapie auf mindestens 70% steigt. Dieser Relativwert sagt noch nichts über absolute Beträge, solange die Größe des Marktes für inhalative Therapeutika nicht bekannt ist. Der Markt ist den Branchenexperten zufolge nicht stagnierend, sondern expansiv. Jährliche Wachstumsraten von 4-5% werden bis mindestens 2005 angenommen. Danach, zwischen 2005 und 2010, gilt eine jährliche Zunahme von 1% als Untergrenze. (Befragung Asthmasprays)

Ausgehend von einem Marktpotential für die inhalative Therapie von 441 Tonnen Treibgas im Jahre 1995 (FCKW und Pulver zusammengerechnet) steigt der Gesamtmarkt bis 2000 auf 550 t, bis 2005 auf 670 t und bis 2010 auf insgesamt 700 t an. Bei einem 70%-igen Pulveranteil machen H-FKW dann nur noch 210 t aus. Das ist etwas mehr als die Hälfte der heutigen FCKW-Menge in Asthmasprays (400 t). Geht die Markteinführung der H-FKW-Sprays wie im Modell A vor sich, entwickeln sich die Emissionen wie in Tabelle 56 bzw. Diagramm 41.

**Tab. 56: H-FKW-Treibgase in Asthmasprays 1996-2010 in Tonnen
Prognosemodell "Partieller H-FKW-Umstieg"**

	1996	1998	1999	2000	2005	2010 ff.
R134a	1	18	53	106	140	140
R227	0	9	27	54	70	70
Summe	1	27	80	160	210	210

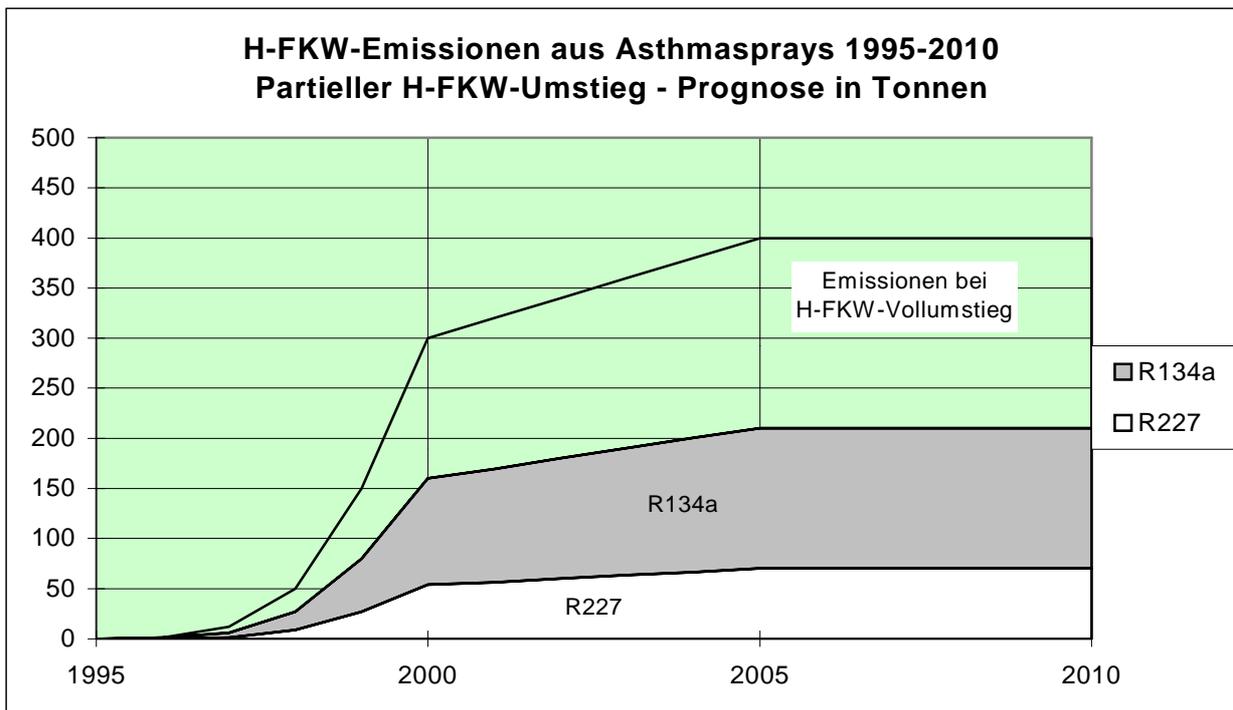


Diagramm 41: H-FKW aus Asthmasprays 1995-2010 ff. bei partiellem Ersatz der FCKW durch H-FKW. Gegenüber dem Niveau des vollen H-FKW-Umstieges (als oberste Linie eingetragen) betragen die Emissionen nach der Totalumstellung nur 210 statt 400 t - etwas über die Hälfte.

C: Beitrag zum Treibhauseffekt im Vergleich

Die in den Tabellen 55 und 56 als metrische Tonnen aufgeführten Emissionen der beiden H-FKW aus Asthma-Dosieraerosolen werden durch Multiplikation mit ihren spezifischen GWP-Werten in ihr Treibhauspotential umgerechnet (Tabelle 57).

Tab. 57: Beitrag zum Treibhauseffekt durch H-FKW aus Asthasprays 1996 bis 2005 ff. - in Tsd. Tonnen CO₂-Äquivalente									
		Voller H-FKW-Umstieg				Partieller H-FKW-Umstieg			
H-FKW	GWP	1996	1999	2000	2005 ff.	1996	1999	2000	2005ff.
134a	1300	1,3	130	260	351	1,3	68,9	137,8	182
227	2900	0,0	145	290	377	0,0	78,3	156,6	203
Summe		1,3	275	550	728	1,3	147,2	294,4	385

Quellen: Berechnungen auf Grundlage der Tabellen 55 und 56. GWP (110 Jahre): IPCC 1995.

Nach einem Vollumstieg von FCKW auf H-FKW entspricht im Jahr 2005 der Beitrag zum Treibhauseffekt durch Emissionen aus Asthasprays, die noch 60% der inhalativen Therapie ausmachen, der Wirkung von 728 Tsd. Tonnen CO₂.

Im Szenario entsprechend dem Alternativmodell B, bei dem wegen des viel höheren Pulveranteils nur noch 30% der Inhalationstherapie mit Treibgasen durchgeführt werden ("Partieller H-FKW-Umstieg"), entspricht die Klimawirkung 385 Tsd. Tonnen CO₂. Das Einsparpotential (partieller H-FKW-Umstieg durch Pulverinhalation) beträgt 343 Tonnen CO₂-Äquivalente oder 47%. Dies zeigt auch Diagramm 42:

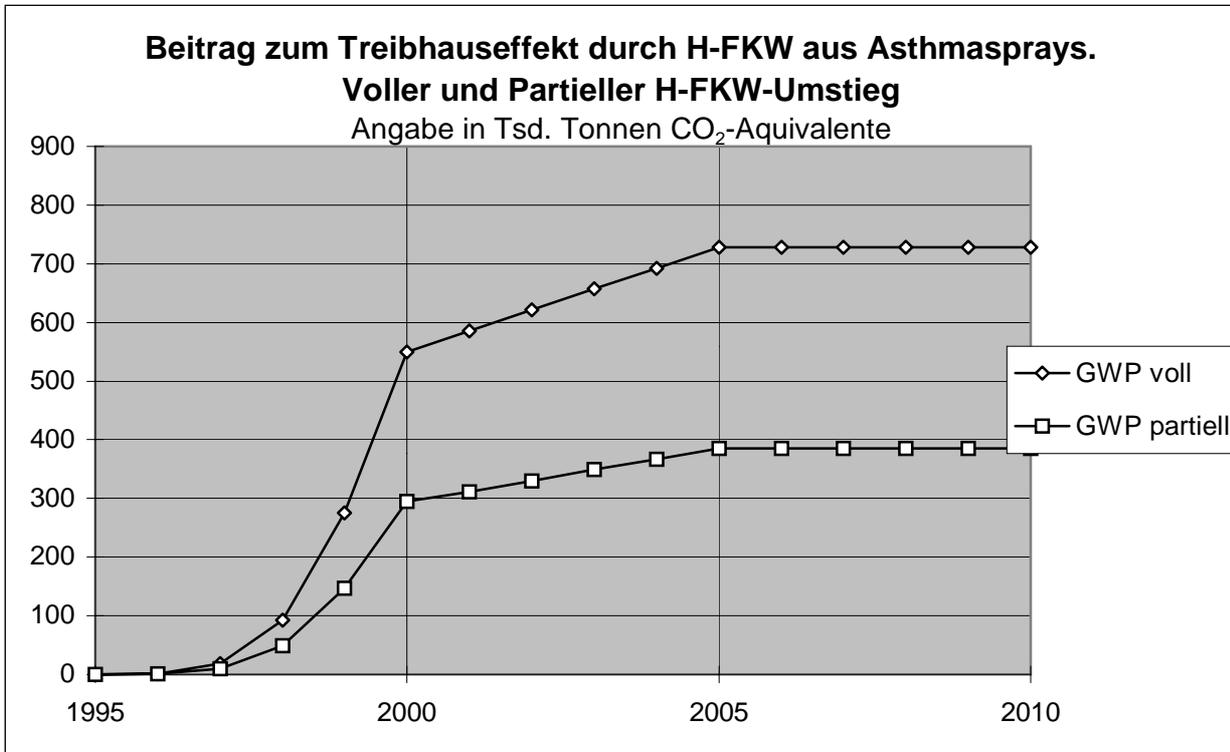


Diagramm 42: Treibhauseffektbeitrag der H-FKW aus Asthasprays bei vollem und bei partiellem H-FKW-Umstieg (Prognosen). Das Einsparpotential des Modells B (GWP partiell) beträgt 343 Tsd. Tonnen CO₂-Äquivalente oder 47% gegenüber dem Modell A (GWP voll).

5. Sonstige H-FKW

Zu sonstigen H-FKW zählen vor allem die bis Mitte 1995 angefallenen unerwünschten R23-Emissionen aus der R22-Herstellung, die seitdem aufgefangen und thermisch gespalten werden. Mengenmäßig mit weitem Abstand folgen die Emissionen von R23 aus der Halbleiterfertigung sowie Emissionen von H-FKW als Feuerlöschmittel ab dem Jahr 2000. Tabelle 58 zeigt ihre Größenordnungen. Anzumerken ist, daß gerade in diesem Restbereich Prognosen für die nächsten zwanzig Jahre mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Denn es werden nicht nur ständig neue H-FKW entwickelt, sondern auch neue Anwendungen für sie vorgeschlagen.

Tab. 58: Sonstige H-FKW-Emissionen nach Herkunft in Tonnen pro Jahr						
<i>Herkunft</i>	<i>H-FKW</i>	<i>1990</i>	<i>1995</i>	<i>2000</i>	<i>2005</i>	<i>2010 ff.</i>
1. R22-Nebenreaktion	23	<200	<100*	0	0	0
2. Ätzgas	23	3,4	2,2	0,7	0,2	0,2
3. Feuerlöschmittel	227	0	0	1	1	1
<i>Summe**</i>		<i>200</i>	<i>100</i>	<i>1,7</i>	<i>1,2</i>	<i>1,2</i>

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

** Für 1990 und 1995 sind die Werte "200" bzw. "100" nicht genau die Summe aus Zeile 1 und 2. Angesichts der Unschärfe bei der Abschätzung der R-22-Nebenreaktion würde dadurch eine unangemessene Exaktheit vorgetäuscht.

5.1 H-FKW als unerwünschtes Nebenprodukt

Unerwünschte H-FKW-Emissionen gab es bereits vor 1992, dem Jahr der ersten gezielten H-FKW-Herstellung in Deutschland. Der H-FKW 23 (Trifluormethan) fiel als Nebenprodukt des als Kältemittel und als Zwischenprodukt für den Kunststoff PTFE (Hostaflon) hergestellten H-FCKW 22 (Chlordifluormethan) an. Nach Angaben der Hoechst AG (Hoechst 1996) handelte es sich um ca. 1-2% des Frankfurter H-FCKW-22-Ausstoßes, mithin um knapp 200 t pro Jahr, die in die Atmosphäre entwichen.

Bei Solvay in Bad Wimpfen, wo ebenfalls R22 hergestellt wird, wurde der Stoff nach Firmenangabe (Solvay 1996a) stets aufgefangen und im Ausland zu anderen Produkten weiterverarbeitet.

Seit Inbetriebnahme der Spaltanlage für FCKW im Jahre 1995 wird auch in Frankfurt das überschüssige R23 aus der R22-Herstellung nicht mehr in die Atmosphäre entlassen, sondern der Verbrennung zu Flußsäure zugeführt.

Eine - nicht in den 200 t enthaltene - Teilmenge von ca. 10 t R23 wurde aber auch in Frankfurt stets zur Weiterverarbeitung aufgefangen.

Davon wurde der größte Teil (8-9 t) bei Atochem in Frankreich durch Bromierung zu "Frigen 13 B 1" weiterverarbeitet, das von der Hoechst AG als Kältemittel für die Tiefst Kühlung, nicht als Feuerlöschmittel (Halon 1301), vermarktet wurde. Seit 1995 wird dieses R23 nicht mehr bromiert, aber weiterhin als Tiefst kühlmittel vermarktet, chemisch unverändert als R23. (Inlandsverbrauch und -emissionen von R23 als Kältemittel sind im Abschnitt 1 über die Stationäre Kälte aufgeführt.)

Der kleinere Teil der aufgefangenen 10 t R23 (1-2 t) wird einer weitergehenden destillativen Reinigung unterzogen und gelangt als Ätzgas für die Halbleiterindustrie (CHF_3) auf den Markt.

5.2 H-FKW als Halbleiter-Ätzgas

R23 (CHF_3) wird als Ätzgas in der Halbleiterherstellung eingesetzt. Zusammen mit anderen fluorierten Gasen wird es in dem selbständigen Kapitel IV behandelt. Daraus stammen die Daten zur Emissionsentwicklung in der Tabelle 58. (Die unter 5.1 genannte R-23-Produktion der Hoechst AG ist mit dieser Größe nicht identisch: Erstens weil ein Teil von R23 für die Halbleiterindustrie aus dem Ausland stammt; zweitens weil die eingesetzten Mengen wegen chemischer Umsetzung nicht vollständig emittieren.)

5.3 H-FKW 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, CO_2 oder Schaum (BMU 1994, 16).

Der gegenwärtig in den USA erwogene Halonersatz durch H-FKW wie R23 und R236fa (Anbieter: Du Pont) und R227 (Anbieter: Great Lakes Chemical) oder durch PFC (Anbieter: 3M) dürfte sich in Deutschland auf diejenigen Bereiche beschränken, in denen heute noch Ausnahmegenehmigungen gemäß § 6 Abs. 2 der FCKW-Halon-Verbotsverordnung erteilt werden. Das sind im Grunde nur Schiffe und die zivile und militärische Luftfahrt, weil hier die Ausnahmetatbestände vorliegen, daß Menschen einen zu löschenden Innenraum nicht verlassen können ("essential uses").

Wegen ihres hohen Treibhauspotentials (GWP: 7000) dürften PFC (Handelsnamen: CEA-410, CEA-308) vor den deutschen Zulassungsbehörden kaum bestehen, ebenso wenig der H-FKW R23 (Handelsname: FE-13), dessen GWP 11 700 beträgt. Auch der R236fa (Handelsname: FE-36) weist ein sehr hohes GWP (6300) auf. Die meisten Chancen als Halonersatz für unverzichtbare Anwendungen könnte daher der H-FKW 227 haben (GWP: 2900), der in Deutschland als FM-200 von der Fa. Kidde-Deugra angeboten wird und sich 1996 noch im Zulassungsverfahren befand.

Die für den Halonersatz infragekommenden H-FKW-Löschmittel dürften einen Gesamtbestand von 200 t nicht überschreiten - militärische und zivile Luftfahrt, Seeschiffe und Kleinbereiche wie Motorsport, Brandschutz in Kernkraftwerken zusammengenommen (Eigenschätzungen, u.a. auf Basis BMU 1994, 17-22).

Laut Firmenangabe beträgt die jährliche Freisetzung durch Feuerlöschen, Fehllarm und Anlagenschwund etwa 0,5% des Löschmittelbestands (Kidde-Deugra 1996). Demzufolge könnte künftig pro Jahr 1 t H-FKW 227 aus Feuerlöschanlagen emittieren. (Voraussetzungen: Anwendung nur bei "essential uses", R227 als einziger Halon-Ersatz). Als erstes Emissionsjahr wird hier das Jahr 2000 angesetzt.

5.4 H-FKW als Reinigungs-Lösemittel

Ebenfalls aus den USA stammt ein vielfältiges Angebot von neuen fluorierten Verbindungen für die Präzisions- und Elektronik-Reinigung. Der Grund dafür liegt darin, daß in den USA die in großen Mengen eingesetzten Lösemittel FCKW 113 und 1,1,1-Trichlorethan erst seit Anfang 1996 verboten sind (Verbot in Deutschland bereits seit 1.1.1993). Als Alternativen werden von der Chemischen Industrie vor allem halogenierte Stoffe angeboten: H-FKW (R43-10), H-FCKW (R141b, R225), PFC und Hydrofluor-ether. Der H-FKW 43-10 ($C_5H_2F_{10}$) wird unter dem Handelsnamen "Vetrel" vom Hersteller Du Pont seit Juni 1995 in den USA verkauft und ist auf dem europäischen Markt seit 1996 präsent (Du Pont 1996a). Es ist zu erwarten, daß demnächst auch andere fluorierte Lösemittel in Europa angeboten werden, allerdings kaum in Deutschland.

In Deutschland haben sich als Ersatzstoffe für R113 und 1,1,1-Trichlorethan wäßrige Reiniger und halogenfreie Lösemittel wie Alkohole und entaromatisierte Kohlenwasserstoffe durchgesetzt (UBA 1994). Da gemäß der 2. BImSchV ausdrücklich "keine anderen leichtflüchtigen Halogenkohlenwasserstoffe" als die chlorierten Lösemittel Tetrachlorethen, Trichlorethen und Dichlormethan zugelassen sind, sind fluorierte Lösemittel in Deutschland von der Anwendung ausgeschlossen.

Bei unveränderter Immissionsschutz- Gesetzgebung sind Einsatz und Emissionen von fluorierten Lösemitteln in Deutschland nicht möglich.

5.5 Beitrag zum Treibhauseffekt

Die Umrechnung der sonstigen H-FKW-Emissionen auf ihren Beitrag zum Treibhauseffekt enthält Tabelle 59.

Tab. 59: Beitrag zum Treibhauseffekt durch sonstige H-FKW-Emissionen in Tsd. Tonnen CO₂-Äquivalente						
<i>H-FKW</i>	<i>GWP</i>	<i>1990</i>	<i>1995</i>	<i>2000</i>	<i>2005</i>	<i>2010 ff.</i>
R23	11700	2340	1170	8,2	2,3	2,3
R227	2900	-	-	2,9	2,9	2,9
<i>Summe</i>		<i>2340</i>	<i>1170</i>	<i>11,1</i>	<i>5,2</i>	<i>5,2</i>

Quelle: Tabelle 58. GWP-Werte: IPCC 95 (Zeithorizont: 100 Jahre).

Bis zum Jahre 1995 war der Beitrag zum Treibhauseffekt durch sonstige H-FKW-Emissionen aufgrund des hohen GWP von R23 bedeutend. Seit der thermischen Spaltung des R23 aus der R22-Synthese ist mittelfristig nicht mehr mit vergleichbaren Beiträgen zum Treibhauseffekt durch sonstige H-FKW-Emissionen zu rechnen, wenn sich die Freisetzungen von H-FKW im prognostizierten Rahmen bewegen.

Nachweise zu H-FKW

- 3M Medica, Borken, pers. Mitt. 12.11.1996;
- AFEAS (Alternative Fluorocarbons Environmental Acceptability Study: Production and Sales of Fluorocarbons, Washington D.C., October 1995 (Update);
- AIDA (Arbeits- und Informationsgruppe Dosieraerosole), Ingelheim am Rhein, schriftliche Stellungnahme vom 25. September 1996;
- Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften vom 31.12.94, Nr. L 350/126-137;
- Arbeitskreis PU-Dämm- und Montageschäume (Hg.), Wichtige Informationen über PU-Schäume, Tilburg/Stuttgart o.J.;
- Astra (pharma stern), Wedel, pers. Mitt. 11.11.1996;
- Atkins (Glaxo England), CFC Allocations During the Transition, Vortrag am 23.10.1996 auf der International Conference on Ozone Protection Technologies, October 21-23, 1996, Washington, D.C.;
- Befragung Asthmasprays: Schriftliche und mündliche Befragung von Herstellern inhalativer Medikamente der Asthmatherapie:
- AIDA als Ansprechpartner von ASTA Medica AG, Boehringer Ingelheim KG, RPR/Fisons Arzneimittel GmbH, Glaxo Wellcome GmbH und 3M Medica GmbH;
 - Astra (pharma stern), Wedel, 11.11.1996;
 - Orion Pharma, Hamburg, 29.10. 1996;
 - Klinge Pharma GmbH, München 6.11.1996;
 - 3M Medica, Borken, 12.11.1996;
- Befragung Kältemittel. Direkte und telefonische Befragung zur langfristigen Perspektive chlorfreier Kältemittel für stationäre Anwendung.
1. Chemieunternehmen:
 - Ausimont Deutschland GmbH, Eschborn, 5.8.1996;
 - Deutsche ICI GmbH, Frankfurt, 7.8.1996;
 - Du Pont Deutschland GmbH, Bad Homburg, 5.8.1996;
 - Elf Atochem Deutschland GmbH, Düsseldorf, 9.8.1996;
 - Hoechst AG, Frankfurt, 25.3.1996
 - Solvay Fluor und Derivate GmbH, Hannover, 7.8.1996;
 2. Verdichterhersteller:
 - Bitzer Kühlmaschinenbau, Sindelfingen, 6.8.1996;
 - Bock Kältemaschinenfabrik, Frickenhausen, 6.8.1996;
 - Copeland Deutschland GmbH, Frankfurt, 8.8.1996;
- Befragung Pkw-Klima. Schriftliche Befragung zum Inlandsabsatz und Klimatisierungsgrad 1995 und der Füllmengen nach Fahrzeugmodellen bei den inländischen Autoherstellern Audi, BMW, Ford, Mercedes, Opel, Porsche, Volkswagen und bei den Importeuren Alfa Romeo, Citroen, Fiat, Honda, Hyundai, Lancia, Mazda, Mitsubishi, Nissan, Peugeot, Renault, Rover, Saab, Seat, Skoda, Suzuki, Toyota, Volvo. Befragungszeitraum 22.5. bis 27.7. 1996;
- Befragung PU-Schaum. Schriftliche und telefonische Befragung der drei führenden inländischen und des größten europäischen PU-Schaum-Abfüllers und des größten inländischen Vertreibers:
- Ara Werk Krämer GmbH, Unterensingen, 11.4.1996;
 - Czewo Aerosole GmbH, Donaustauf, 2.10.1996;
 - Hago Chemotechnik Vertriebs GmbH, Landsberg, 28.5.1996;
 - Henkel KGaA, Düsseldorf), 23.5.1996;
 - Rathor AG, Appenzell, 12.6.1996;
- Behr GmbH & Co., Stuttgart, pers. Mitt. 10.6.1996, 12.6.1996;

- Bendtsen, Ch., Vieth, H., Indirekte Kühlung in SB-Märkten - Temperaturregelung und Abtauung, in: Ki Luft- und Kältetechnik 7/1995, 308-311;
- Bitzer Kühlmaschinenbau: Kältemittel-Report 4, Sindelfingen 10/95;
- Blomberg-Werke, Ahlen, pers. Mitt. 12.6.1996;
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit), Dritter Bericht der Bundesregierung an den Deutschen Bundestag über Maßnahmen zum Schutz der Ozonschicht, Reihe Umweltpolitik, Bonn, August 1994;
- Carrier GmbH, Frankfurt, pers. Mitt. 13.11.1996;
- Carrier Transicold, Rotterdam, pers. Mitt. 23.9.1996;
- 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;
- Containerisation International, Sonderheft Market Analysis: More Cool Growth, January 1996, 29-32;
- Deutsche Atemwegsliga: Positionspapier zu Treibgasen in Dosieraerosolen (Stand: Juni 1995), Verfasser: Prof. Dr. R. Wettengel, Bad Lippspringe, in: Medizinische Klinik, 90 (1995), 617 (Nr. 11);
- Deutsche Bahn AG, Frankfurt am Main, pers. Mitt. 23.9.1996;
- Du Pont Europe, Fluoroproducts, Genf, pers. Mitt. 17.6. u. 25.11.1996;
- Ergebnisprotokoll des Fachgesprächs "Atmosphärenschutz und Asthmasprays" am 15.11.1996, Umwelt- und Klimareferat/AK II der Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen, Bonn, 21.11.1996;
- Euram GmbH Thermoking, Haan, pers. Mitt. 9.8. und 24.9.1996;
- Fachgespräch Atmosphärenschutz und Asthmasprays, 15.11. im Bonner Bundeshaus, auf Einladung der Bundestagsfraktion "Bündnis 90/Die Grünen". Teilnehmer: Ärzteverband Deutscher Allergologen, Deutscher Allergie- und Asthmabund e.V., Atemwegsliga in der Dt. Gesellschaft für Pneumologie, Patientenliga Atemwegserkrankungen, AIDA, 3M Medica, Orion Pharma, AOK Bundesverband, Greenpeace Deutschland, Öko-Recherche.
- FKW (Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen): Statusbericht Ersatz von R12 in bestehenden Kälte-, Klima- und Wärmepumpenanlagen in der Bundesrepublik Deutschland durch Kältemittel mit geringerem Ozonabbaupotential, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin, Hannover, November 1995;
- FKW (Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen), Hannover, pers. Mitt., 3.12.1996a;
- FKW (Research Centre for Refrigeration and Heat Pumps), Hannover: Natural Fluid Based Refrigeration. Trends in Natural Fluid Based Technologies for Domestic and Other Refrigeration Applications, presented at Eco-Refrigeration - International conference in New Delhi, India on February 13/14, 1996b;
- Frigoblock Großkopf GmbH, Essen, pers. Mitt. 23.9.1996;
- Haaf, S., Mall, K., Rinne, F. (Linde AG), Natürliche Stoffe in der Kältetechnik, in: KK Die Kälte und Klimatechnik 2/1996, 83-91;
- Henkel KGaA, Düsseldorf, pers. Mitt. 11.6.1996;
- Hochhaus, K.H., Kühlschiffahrt 1994/95: Neubaulisten kurz - Abwracklisten lang, in: Schiff & Hafen, 8/95, 10-15;

- Hochhaus, K.-H. (TU Hamburg-Harburg, Arbeitsbereich Hilfsmaschinen und Automation), pers. Mitt. 30.9.1996a;
- Hochhaus, K.-H. (TU Hamburg-Harburg, Arbeitsbereich Hilfsmaschinen und Automation), Schreiben vom 6.12.1996b;
- Ilka Mafa Kältetechnik GmbH, Döllnitz, pers. Mitt. 13.11.1996;
- Integral Energietechnik GmbH, Flensburg, pers. Mitt. 12.7.1996;
- intercontainer-interfrigo, Basel, Schreiben vom 27.9.1996;
- IPCC = Intergovernmental Panel on Climate Change, Second Assessment Report: Climate Change 1995, Cambridge University Press, Cambridge 1995;
- Johansson, L.-O. (Kylteknik AB, Helsingborg), Indirekte Kühlsysteme - Technische Lösungen und Wirtschaftlichkeit, Vortrag auf dem Jahrestreffen über Kältetechnik in Norwegen, 27.03.1992 (Übersetzung aus dem Schwedischen);
- KIDDE-DEUGRA Brandschutzsysteme GmbH, pers. Mitt. 26.11.1996;
- KK Die Kälte und Klimatechnik 7/1996: DuPont ändert Zusammensetzung von H-FCKW-Ersatzkältemittel, red. Meldung auf S. 447;
- KKW Kulmbacher Klimageräte-Werk GmbH, Kulmbach, pers. Mitt. 12.6.1996;
- Köhler, D., Wirksamkeit und Akzeptanz von Pulverinhalatoren, in: DMW 1995, 120. Jg., Nr. 41, 1401-1404;
- Konvekta AG, Schwalmstadt, pers. Mitt. 19.11.1996;
- Linde AG Kälte- und Einrichtungstechnik, Köln, pers. Mitt. 11. 11. und 13.11.1996a;
- Linde AG Kälte- und Einrichtungstechnik, Hamburg, pers. Mitt. 24.9.1996b;
- Lotz (Verf.): Beitrag der deutschen Kälte-, Klima- und Wärmepumpentechnik zur Verringerung der Treibhausbelastung bis zum Jahre 2005, DKV-Statusbericht des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins, Nr. 13, Stuttgart, April 1993;
- Matthys, H., Asthmatherapie mit topisch wirksamen Steroiden, in: Internist (1995) 36; 1005-1009;
- Minimax GmbH, Bad Oldesloe, pers. Mitt. 25.11.1996;
- Nonnenmann, M., Stellungnahme der Behr GmbH & Co., Stuttgart, zum Teilaspekt Kraftfahrzeug-Klimaanlagen, in: Stellungnahmen der Sachverständigen zum Fragenkatalog für die öffentliche Anhörung am 3. und 4. Dezember 1992 zu dem Thema "Ökobilanz/Produktlinienanalyse am Beispiel des FCKW-Ersatzstoffes R 134a und anderer Ersatzstoffe bzw. -technologien", Deutscher Bundestag, Enquete-Kommission "Schutz des Menschen und der Umwelt", Kommissionsdrucksache 12/6b, 17. November 1992, S.42-57;
- Noske-Kaeser GmbH, Hamburg, pers. Mitt. 24.9.1996;
- Öko-Recherche, Keine Entwarnung für Ozonschicht und Erdklima. Verbrauchsprognose 1995 für FCKW, H-FCKW und FKW (Greenpeace-Studie), Hamburg 1995;
- Orion Pharma, Hamburg, pers. Mitt. 29.10.1996;
- P.D.R. (Polyurethan Dosen Recycling), Pressemappe, Wiesbaden 1.10.1996a;
- P.D.R. GmbH+Co. Betriebs KG, Thurnau pers. Mitt. 12.6.1996b;
- Paul, J., Kühlung in Lebensmittelmärkten, in: Ki Luft- und Kältetechnik 6/1996, 284;
- Peters, J. (Bundesfachschule Kälte-Klima Technik) Maintal, pers. Mitt. 18.11.1996;
- Rathor AG, Appenzell, pers. Mitt. 28.5.1996;
- Renz, H., Ersatzstoffe für R 22, in: KK Die Kälte und Klimatechnik, 4/1996, 212-216;
- Schultze-Werninghaus, G., 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, 18-20;
- 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;

- Solvay Fluor und Derivate GmbH, Fachgespräch mit B. Wilkes (Leiter Produktions-Koordination), M. Ruhland (Ökologie), H. Bräutigam, H. Bruhns (Leiter Verkauf Fluorspezialitäten), Hannover 23.4.1996a;
- 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;
- Sulzer-Escher-Wyss GmbH, Lindau, pers. Mitt. 13.11.1996;
- Sütrak Transportkälte GmbH, Renningen, pers. Mitt. 23.9.1996;
- TOTAL WALTHER Feuerschutz GmbH, Köln, pers. Mitt. 9.2.1996;
- Trane Deutschland GmbH, Niederlassung Frankfurt, pers. Mitt. 13.11.1996;
- UBA (Umweltbundesamt): Verzicht aus Verantwortung: Maßnahmen zur Rettung der Ozonschicht, Berichte 7/89, Berlin 1986;
- UBA (Umweltbundesamt), Metalloberflächenreinigung mit CKW, KW und wässrigen Reinigern (Verfasser: Leisewitz, A., Schwarz, W.), Texte 65/94, Berlin 1994;
- Umwelt Nr. 2/1996 (Hrsg. BMU), Verwendung von FCKW in Asthmasprays. Antwort der Bundesregierung auf Parlamentarische Anfrage;
- UNEP IE (United Nations Environment Programme Industry and Environment): Use of DPIs in Each of 20 Major Industrialized Countries in 1992 (% of patient days treatment satisfied by DPIs), Information Paper, Paris, May 1994;
- UNEP, Report of the Technology and Economics Assessment Panel: Summary of the Report of the Aerosols, Sterilants, Miscellaneous Uses and Carbon Tetrachloride Technical Options Committee, Nairobi, October 1994;
- VDA (Verband der Automobilindustrie), Pressedienst, Zur Situation der Automobilindustrie 1995, Frankfurt 31.01.1996;
- VDKF (Verband Deutscher Kälte-Klima-Fachbetriebe e.V.): Aktuelles aus der Kältetechnik - Presseinformation zur IKK 95 in Essen, 19.10.1995;
- Verband der deutschen Hochseefischereien, Cuxhaven, pers. Mitt. 24.9.1996;
- Verband Deutscher Reeder, Hamburg, pers. Mitt. 24.9.1996;
- Vidgren, M. (Astra Pharmaceuticals), The Role of Dry Powder Inhalers in the CFC Phaseout, Vortrag am 23.10.1996 auf der International Conference on Ozone Protection Technologies, October 21-23, 1996, Washington, D.C.;
- Webasto AG Fahrzeugtechnik, Stockdorf, pers. Mitt. 23.9.1996;
- Wertenbach, J., Stuttgart, pers. Mitt. 11.12.1996;
- 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;
- York International GmbH, Mannheim, pers. Mitt. 13.11.1996.

IV. Fluorierte Gase in der Halbleiterfertigung

Vorbemerkung

Von den fünf wichtigsten fluorierten Gasen der Halbleiterindustrie wird nur NF_3 hier erstmalig erwähnt. Stickstofftrifluorid ist farblos, nicht brennbar, aber im Unterschied zu den anderen fluorierten Gasen sehr giftig. Sein US-Expositionsgrenzwert (threshold limit value) beträgt 10 vpm (Sicherheitsdatenblatt 1993). Die anderen Gase wurden in vorhergehenden Kapiteln behandelt: SF_6 in einer Vielzahl von Anwendungen, CF_4 , C_2F_6 und CHF_3 als Nebenprodukte - der Aluminiumelektrolyse bzw. R22-Herstellung,.

Die erneute und gesonderte Behandlung dieser vier Gase zusammen mit NF_3 gründet darin, daß jedes einzelne von ihnen als - gegenseitig weitgehend austauschbares - Ätzgas in der plasmaunterstützten Halbleiterfertigung dient und dazu besondere Reinheitsgrade (bis 99,999 Vol.-%) aufweisen muß, die weit über die Normen für "technische Gase" hinausgehen. Dazu kommt, daß alle fünf Gase der gleichen Dynamik der Verbrauchs- und Emissionsentwicklung unterliegen.

1. Plasmaätzen mit fluorierten Gasen

Die fünf fluorierten Gase werden in der Halbleiterfertigung zum sogenannten Trockenätzen im Niederdruckplasma eingesetzt. Erstens, um feinste Strukturen auf siliziumhaltigen Scheiben (Wafers) nach Maßgabe eines die Oberfläche des Wafers bedeckenden strukturierten Fotolacks abzutragen. Zweitens, um die Reaktorkammern periodisch von abgeschiedenen Beschichtungsmaterialien zu reinigen, soweit sich diese nicht auf dem Wafer, sondern an den Kammerwänden niedergeschlagen haben. In diesem Sinne unterscheidet sich Strukturätzen von Kammerätzen (Kammerreinigen).

1.1 Der Plasmaprozeß

In evakuierten Prozeßkammern werden fluorierte Gase eingeleitet, die durch Entladungen von Hochfrequenzwellen in den Plasmazustand überführt werden. Aus an sich inerten Gasmolekülen entstehen positive und negative Ionen sowie neutrale und reaktive Radikale, die sonst nur bei sehr hohen Temperaturen von 1000 bis 2000 °C durch thermische Dissoziation gebildet würden (Franz 1990, 164-169). Niederdruck unter 100 Pa senkt die Prozeßtemperaturen auf Werte zwischen 50 und 700 °C ab. Für die Ätzreaktion sind die molekularen Bruchstücke mit freien Bindungen, die reaktiven Radikale ausschlaggebend (Theirich 1996). Diese reagieren chemisch mit dem siliziumhaltigen oder metallischen Schichtmaterial und wandeln die Feststoffe in flüchtige Fluoride um, die aus der Kammer als Abgase abgepumpt werden können. In einem Plasma aus CF_4 entstandene freie Radikale (z.B. nach $\text{CF}_4 + e^- \rightleftharpoons \text{CF}_3\cdot + \text{F}\cdot + e^-$) können sich so mit festem Siliziumoxid (SiO_2) zu flüchtigem SiF_4 und zu CO_2 umsetzen. Die energiereichen Ionen des Plasmas wirken prozeßunterstützend (Theirich 1996).

1.2 Strukturätzen

Zu etwa 60 Prozent werden fluorhaltige Ätzgase zur selektiven Erzeugung feinsten Strukturen auf Chipoberflächen eingesetzt (Hascher 1996).

Beim Strukturätzen handelt es sich darum, auf zwischen 0,1 und 1 µm dünnen Siliziumoxid- und Siliziumnitrid-Passivierungsschichten der Halbleiterscheibe feine Bahnen

in einer Breite im Sub-Mikron-Bereich ($< 0,5 \mu\text{m}$) freizuätzen. Außer den isolierenden Oxid- und Nitridschichten werden mit fluorierten Gasen auch leitende Schichten strukturgeätzt, allerdings nur solche aus Wolfram. Der Ätzprozeß verwandelt die hauchdünne Metallschicht in den vom Fotolack nicht geschützten Bereichen in flüchtiges Wolframfluorid, während er die eigentlichen metallischen Leiterbahnen unter dem gehärteten Lack bestehen läßt.

Als Gase für eine chemische Ätzreaktion auf der Halbleiterbeschichtung aus Oxiden, Nitriden oder aus Wolfram kommen grundsätzlich alle fünf Fluorgase infrage. Lediglich NF_3 , das erst in den vergangenen zehn Jahren in die Fertigung eingeführt wurde, wird wegen seiner äußerst schnellen Reaktion bisher erst in Ansätzen zum Strukturätzen verwendet. Von untergeordneter Bedeutung ist noch Oktafluorpropan (C_3F_8), das als Substitut für C_2F_6 angeboten wird (Linde Industriegase 1996).

1.3 Kammerreinigung nach CVD-Beschichtung

Zu etwa 40 Prozent werden fluorhaltige Gase zur periodischen plasmaunterstützten Reinigung der Reaktoren verwendet.

Die Reinigung ist nötig, weil die Beschichtungsmaterialien bei der abwechselnden Deposition von Leiter- und Isolierfilmen nicht nur bestimmungsgemäß auf dem Wafer, sondern als Kruste auch an den Wänden der Plasmakammer abgeschieden werden.

Die Oxid- wie die Nitridschicht und die manchmal erforderliche Schicht aus Polysilizium sind durch den sogenannten Silanprozeß im CVD-Verfahren (Chemical Vapour Deposition) auf das Substrat aufgebracht worden. Das hochreaktive und darum stark mit Inertgas verdünnte Silan (SiH_4) zersetzt sich im Plasma mit Sauerstoff zu SiO_2 , mit Ammoniak zu Nitrid (Si_3N_4) und ohne Zusätze zu Polysilizium (vgl. Ruge/Mader 1991, 179 ff.). Auch metallische Leiterschichten aus Wolfram werden im CVD-Verfahren abgeschieden (Kücher 1992, 259/260). Dazu enthält das Gasgemisch Wolframhexafluorid (WF_6), das als solches nicht zum Treibhauseffekt beiträgt.

Die Reinigung besteht darin, in der leeren Kammer ein fluorhaltiges Plasma zu zünden, das die störenden Silizium- und Wolframverbindungen wegätzt und zu abgasfähigen Fluoriden verflüchtigt.

Da auch die Kammerreinigung ein Ätzprozeß ist, können grundsätzlich dafür alle genannten Fluorgase eingesetzt werden. Allerdings geben die Anwender bei der Kammerreinigung dem C_2F_6 und dem NF_3 den Vorzug.

2. Der Markt

Eine im Rahmen dieser Studie durchgeführte Befragung der fünf die Halbleiterindustrie mit Ätzgasen fast vollständig beliefernden Unternehmen (Befragung Elektronikgase) nach ihren Inlandsverkäufen erbrachte zusammengefaßt die Verbrauchsmengen für 1990 und 1995 sowie Prognosen ab dem Jahr 2000. Angenommen wird, daß der Verbrauch bis 2005 gegenüber 1995 die doppelte Menge erreicht und danach auf konstantem Niveau verbleibt.

Tab. 60 Jahresverbrauch der deutschen Halbleiterindustrie an fluorierten Ätzgasen 1990 bis 2005 ff. - Angaben in Tonnen				
Gas	1990	1995	2000	2005 ff.
SF ₆	5	6	7,5	9,5
CF ₄	8	10	13	16,6
CHF ₃	4	5	6,5	8,3
NF ₃	1	3	5	7,3
C ₂ F ₆	12	18	30	38,3
Summe	30	42	62	80

Quellen: Befragung Elektronikgase 1996; für 2005 ff. eigene Hochrechnung.

Die jährliche Steigerungsrate von 1990 bis 1995 betrug 6 Prozent. Mit mindestens der gleichen Wachstumsrate wird auch für das Jahrfünft 1996 bis 2000 gerechnet (vgl. Handelsblatt 1995). Da aufgrund fortschreitender Miniaturisierung mit erhöhter Reinheit in der Kammer gearbeitet werden muß, rechnen einige befragte Experten für die typischen Reinigungsgase C₂F₆ und NF₃ jedoch mit höherem - 10-prozentigem - jährlichem Wachstum (Linde Industriegase 1996; CS-GmbH 1996).

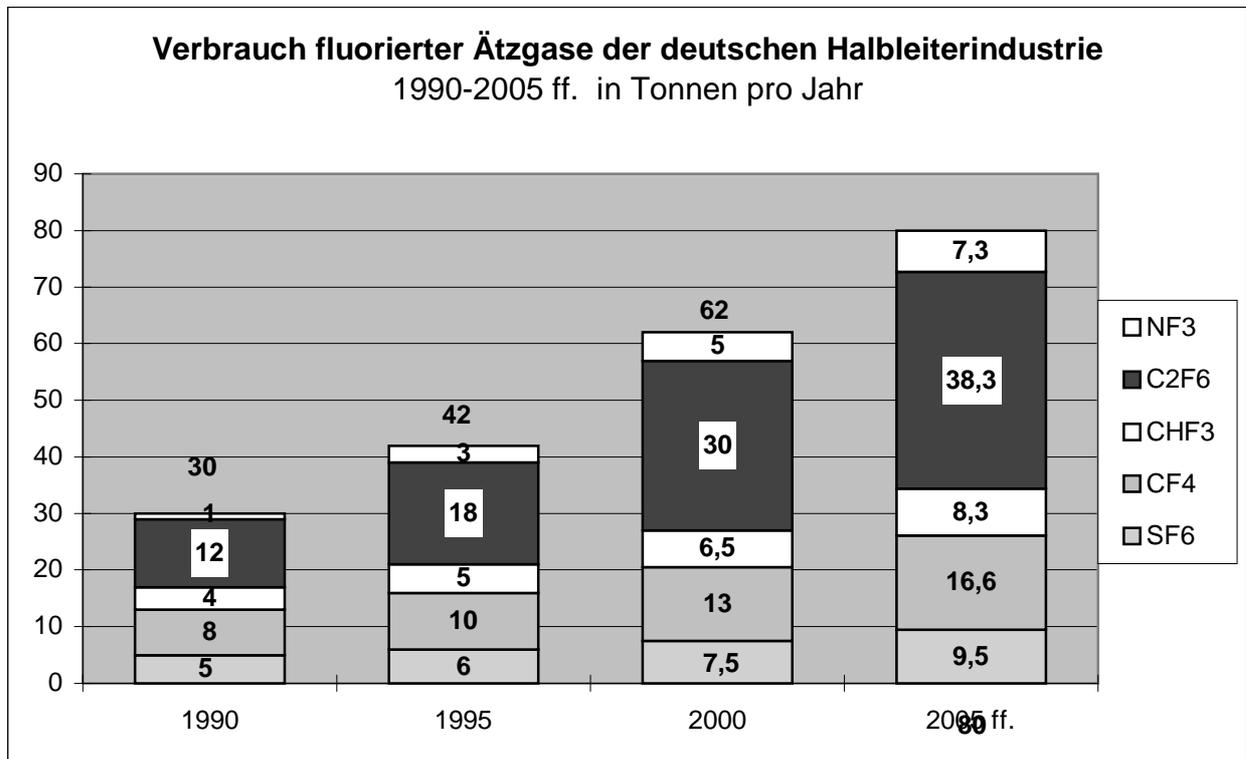


Diagramm 43: Verbrauchsentwicklung fluoriertem Ätzgasen der deutschen Halbleiterindustrie 1990-2005 in Tonnen. Die zwei spezifischen Ätzgasen zur Kammerreinigung (NF₃ und C₂F₆) wachsen im Verbrauch schneller als die anderen Ätzgasen, erkennbar am größer werdenden Anteil an den Mengensäulen (von links nach rechts).

Während der Verbrauch der fünf Hauptgasen von 1990 bis 1995 um 12 Tonnen (von 30 auf 42) stieg, nimmt er der Prognose zufolge zwischen 1996 und 2000 um 20 Tonnen (von 42 auf 62) zu. An diesem Zuwachs haben mit 14 Tonnen (oder 70 Prozent) die Reinigungsgase C₂F₆ und NF₃ den Hauptanteil. (Diagramm 43 macht dieses überproportionale Wachstum sichtbar.) Ab dem Jahr 2005 wird mit einer Sättigung der Nachfrage gerechnet. Dann ist mit 80 Tonnen das doppelte Verbrauchsniveau des Jahres

1995 erreicht. Zwischen 2001 und 2005 wird noch einmal eine gleichmäßige jährliche Wachstumsrate von 5% unterstellt, die danach auf 0% sinkt.

2.1 Produktion und Außenhandel

Fast 90 Prozent des Inlandsverbrauchs hochreiner fluoriertes Ätzgase waren 1995 US-amerikanischer oder japanischer Herkunft. C_2F_6 stammte zu fast 100 Prozent aus den USA (Du Pont), NF_3 kam je zur Hälfte aus den USA (Air Products) und aus Japan (Mitsui). Japanischen Ursprungs sind über 60 Prozent des hochreinen CF_4 und SF_6 .

Aus Europa stammten 1995 nur Teile der Lieferungen von CF_4 (Air Liquide) und von SF_6 (Ausimont). Dazu kamen aus Deutschland 1-2 Tonnen CHF_3 , die bei der H-FCKW-Herstellung der Hoechst AG als Nebenprodukte anfielen und nach Reinigung durch Messer-Griesheim vermarktet wurden (vgl. Kap. III,5).

1990 hatte darüber hinaus die Hoechst AG noch 6-8 Tonnen CF_4 produziert und für Elektronikanwendungen gereinigt (Hoechst 1996). Da dieses Gas als Nebenprodukt der FCKW-Herstellung im Abgas anfiel, wovon es abgetrennt wurde, war der FCKW-Stopp im April 1994 auch das Ende inländischer CF_4 -Produktion (vgl. Kap. II).

3. Emissionen

Wie im ersten Abschnitt angemerkt, ist für die Ätzreaktion die Bildung gasförmiger Reaktionsprodukte typisch, die abgepumpt werden. Die Ätzgase werden der Plasmakammer aber im Überschuß zugeführt. Darum enthält das Abgas der Kammer weniger chemisch veränderte Gase als solche, die im Prozeß nicht umgesetzt wurden.

3.1 Das Bezugsjahr 1990

Die Abgasbehandlung des Jahres 1990 war ausschließlich auf die Reaktionsprodukte ausgerichtet. Etwa 40 Prozent der damals in Deutschland installierten Ätzkammern waren mit Naßwäschern ausgerüstet (Centrotherm 1996). Diese konnten die wasserlöslichen Abgase SiF_4 , SiH_4 , $SiOF_2$, COF_2 , SO_2 usw. in einer wäßrig-alkalischen Lösung zwar weitgehend zurückhalten. Doch die im Reaktor nicht umgesetzten - durchweg wasserunlöslichen - fluorierten Gase ließen sie ungehindert passieren. Ebenso wenig hielten sie perfluororganische Nebenprodukte wie C_3F_6 , C_4F_6 zurück oder das hochtoxische Perfluorisobuten ($i-C_4F_8$), das unter bestimmten Bedingungen aus CHF_3 entsteht (Tiller u.a. 1992; Merten u.a. 1990).

Abgassysteme zur Spaltung der überschüssigen oder nach der Spaltung wieder re-kombinierten Ätzgase werden erst seit 1993 eingesetzt. Die Emissionen waren daher 1990 noch ausschließlich durch die Differenz zwischen der der Plasmakammer zugeführten und der darin umgesetzten Menge bestimmt.

Über diese "primären" Umsetzungsraten ("conversion efficiencies") der einzelnen Ätzgase gibt es keine allgemein verbindlichen Werte. Schätz- und Meßergebnisse hängen von den konkreten Reaktionsbedingungen im Plasmareaktor wie Volumen und Bauart der Kammer, Temperatur, Druck, Gasdurchfluß pro Zeiteinheit u. dgl. ab (Applied Materials 1996). Dennoch sind sich die Experten darin einig, daß der PFC-Umsatz in der Kammer im Durchschnitt bei nicht mehr als einem Drittel (30-40%) liegt (Latt 1996, 190;

Markert u.a. 1996, 2). Zu den wenigen Gaseunternehmen, die darüber hinausgehend spezifische Umsetzungsraten für einzelne Ätzgase unter typischen Bedingungen auf-führen, zählt Air Products (s. Tabelle 61).

Tab. 61: Umsetzungsraten der einzelnen Ätzgase in der Plasmakammer - nach Air Products		
Fluor-Gas	Anwendungsfall	Umsetzungsrate
SF ₆	Wolfram-Ätzen	27 ± 2%
CF ₄	Siliziumoxid-Ätzen	15 ± 1%
CHF ₃	Siliziumoxid-Ätzen	15 ± 1%
C ₂ F ₆	Oxid-Reinigung	30 ± 5%
NF ₃	Nitrid-Reinigung	57 ± 7%
NF ₃	Wolfram-Reinigung	68 ± 5%

Quelle: Air Products 1996, Anhang. Generell wird nicht berücksichtigt, daß sich ca. 10% des zugeführten C₂F₆ im Plasma in CF₄ verwandeln (Latt 1996, 190).

Dem Schema zufolge ist die Umsetzung bei CF₄ und CHF₃ mit 15% Mittelwert am geringsten und bei NF₃ mit 57% bzw. 68% (Durchschnitt: 60%) am höchsten. Dazwischen liegen SF₆ und C₂F₆ mit jeweils ca. 30%. Die Differenzen sind Ausdruck der unterschiedlich hohen molekularen Stabilität.

Tab. 62: Zufuhr, Umsetzung und Emissionen fluorierter Ätzgase 1990 in Tonnen			
Gas	Zufuhr 1990	Umsetzung	Emissionen
SF ₆	5	27%	3,7
CF ₄	8	15%	6,8
CHF ₃	4	15%	3,4
NF ₃	1	60%	0,4
C ₂ F ₆	12	30%	8,4
Summe	30	(25%)	22,7

Quellen: Tabelle 60 und Tabelle 61.

Eine Abschätzung der 1990er Emissionen ergibt sich aus dem Verbrauch eines Gases (Tabelle 60) abzüglich seines im Prozeß umgesetzten Anteils (Tabelle 61). Nach Tabelle 62 emittierten von den im Jahr 1990 zugeführten 30 t knapp 23 t unverändert in die Atmosphäre. Sieben Tonnen gelangten chemisch verändert und nicht mehr klimawirksam in Abgaswäscher oder unbehandelt in die Atmosphäre.

3.2 Emissionen 1995 und danach

Im Jahr 1993 kündigte Du Pont an, C₂F₆ ab 1.1.1996 nur noch an Kunden zu liefern, die über eine Abgasreinigung mit einem Mindest-Wirkungsgrad von 80% verfügen (Du Pont 1996a). Das Unternehmen ist praktisch monopolistischer Hersteller von C₂F₆, das unter dem Handelsnamen "Zyron (R) 116" verkauft wird. Mit dieser Initiative sollte der globale Abgasstrom des in wachsenden Mengen eingesetzten Gases auf das Niveau von 1990 begrenzt werden, den Standard, den die US-Regierung als Obergrenze für die generelle Stabilisierung der Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2000 in den

USA erklärt hat.²⁸ Von der Erklärung von Du Pont ging ein kräftiger Schub für die PFC-Abgasbehandlung aus, nicht nur für C_2F_6 , sondern für alle Arten eingesetzter Stoffe.

3.3 Einführung der PFC-Abgasreinigung

Die Erst- und Nachausrüstung deutscher Halbleiterfabriken mit Abgassystemen für PFCs setzte 1993 ein. Die Anlagen beruhen bisher fast alle auf Spaltung durch Nachverbrennung des PFC-haltigen Abgases bei hohen Temperaturen. Diese Technologie konnte auf ein in Europa vorhandenes Verfahren zur thermischen Zersetzung von Silan zurückgreifen. Daraus erklären sich sowohl die schnelle Verfügbarkeit von PFC-Abgasverbrennern als auch der Umstand, daß zu den drei führenden europäischen Anbietern von Abgasanlagen zwei deutsche gehören: "DAS" in Dresden und "Centrotherm" in Dresden und Blaubeuren. Der dritte europäische Hersteller ist das britische BOC-Unternehmen "Edwards". Der vierte Hersteller, die "CS" GmbH in Ismaning, entwickelte ein anderes Verfahren, nämlich die Chemisorption.

3.4 Verfahren zur Behandlung der nicht umgesetzten PFC

- Hochtemperatur-Spaltung

Das Abgas aus der Vakuumpumpe wird nicht wie früher sofort in den Naßwäscher, sondern zunächst in eine Brennkammer geleitet. Als Brennstoff im sauerstoffreichen Milieu dienen entweder Wasserstoff oder Erdgas. Bei Temperaturen um 1 500 °C zersetzen sich die PFC, deren Komponenten sich mit H_2 oder O_2 verbinden. Im Idealfall werden die PFC vollständig zu HF einerseits und CO_2 (bei CF_4 , CHF_3 , C_2F_6), SO_2 (bei SF_6) oder N_2 und NO_x (bei NF_3) andererseits umgewandelt. Der alkalische Naßwäscher neutralisiert HF und außerdem das von der SF_6 -Spaltung stammende SO_2 . Der Wäscher hält außerdem, wie bei der herkömmlichen Abgasreinigung, die - meist siliziumhaltigen - Umsetzungsprodukte der PFC aus dem Plasmaprozeß zurück. Zu entsorgen bleibt Abwasser. Das Abgas enthält CO_2 , H_2O und den - aus der, technisch notwendigen, permanenten Pumpenspülung in großen Mengen anfallenden - Ballast-Stickstoff. (Centrotherm 1996; Edwards 1996; DAS 1996)

- Chemisorption

Entwickelt und - zumindest für NF_3 - praktisch bereits eingesetzt ist eine Form der PFC-Destruktion durch katalytisch aktive Absorbentien. Es handelt sich ebenfalls um ein thermisches Verfahren, allerdings bei erheblich niedrigeren Temperaturen und ohne Zufuhr von Brenngasen. Im auf 300 bis 600 °C elektrisch erhitzen Festbett katalysieren Granulate das Aufbrechen von PFC-Molekülen und absorbieren zugleich die entstehenden Zersetzungsprodukte (Markert u.a. 1996). Die mit Fluor, Kohlenstoff, Silizium, Schwefel, Wolfram usw. beladenen Absorber-Module werden als fester Abfall entsorgt. Abgase sind im Idealfall wiederum lediglich CO_2 , H_2O und der Ballast-Stickstoff aus der Vakuumpumpe. (NO_x entsteht bei den niedrigen Temperaturen nicht.)

- Andere Methoden

²⁸ 1996 hat Du Pont die Frist auf "year-end 1999" verlängert und die Forderung gleichzeitig insofern abgeschwächt, als die Kunden nicht unbedingt eine Abgasanlage brauchen, sondern bereits ein "Programm" zur Emissionsminimierung ("program to minimize PFC emissions and a philosophy of zero emissions as their ultimate goal") genügt. (Du Pont 1996b)

Bislang dominieren bei der PFC-Emissionsminderung klar die "end-of-pipe"-Verfahren. Neben der PFC-Zerstörung in Brennkammern wird auch an ihrer Destruktion im nachgeschalteten Plasma gearbeitet (Mawle 1995, 17-19). Doch zunehmend wird über stoffliche Substitution von klimawirksamen Gasen (im Test: Chlortrifluorid ClF_3) sowie über PFC-Ersparnis durch Prozeßoptimierung nachgedacht. Recycling nicht umgesetzter PFCs zum Wiedereinsatz, das bislang wegen der niedrigen PFC-Konzentration und der Vielfalt der Inhaltsstoffe im Abgas sowie der geforderten hohen Reinheit des Zufuhr-gases als zu aufwendig galt, wird mittlerweile in Angriff genommen (McClear/Taylor 1996, 41-44).

3.5 Verbreitungsgrad und Wirksamkeit der PFC-Abgasreinigung

Die inländischen PFC-Emissionen aus der Halbleiterindustrie entwickeln sich umgekehrt proportional zum Ausstattungsgrad mit Abgassystemen und zur Wirksamkeit dieser Anlagen.

- Wachsende Ausstattungsquote mit Abgasreinigern

Wird der Gasdurchsatz durch alle - auf ca. 1000 Stück geschätzten - inländischen Plasmareaktoren mit 100% angesetzt, dann wurden 1995 rund 50% der PFC-haltigen Abgase einer spaltenden Abgasbehandlung unterzogen. Zu dieser Schätzziffer gelangen unabhängig voneinander Experten aus Kreisen des Ätzkammernbaus (Applied Materials), des Abgasanlagenbaus (DAS; Centrotherm; CS) und der PFC-Anwender (Siemens 1996b). Dieselben Fachleute schätzen für das Jahr 2000 die Ausstattung mit PFC-Abgasreinigern auf ca. 90%. Nach 2005, so ihre Annahme, wird es so gut wie keine Reaktoren ohne PFC-Abgasbehandlung mehr geben.

- Hohe Wirksamkeit der Abgassysteme kaum bestritten

Der Wirkungsgrad der gegenwärtigen Abgasanlagen auf Verbrennungsbasis übertrifft nicht nur unter Laborbedingungen, sondern auch in der Realität die von Du Pont geforderten 80%. Das behaupten nicht nur die Anlagenhersteller, die in ihren Prospekten sogar Reinigungsgrade bis zu 99,9% angeben. Auch Anwender bescheinigen die hohe Effektivität (engl.: DRE = Destruction Removal Efficiency), die unter realen Einsatzbedingungen im Bereich von 98 und 99% liege (Siemens 1996b).

Derart hohe Werte bestätigt die Ende 1995 erschienene Studie der SEMATECH. SEMATECH ist eine Organisation der zwölf führenden Halbleiterhersteller der USA für firmenübergreifende Forschungen. Ihr Projektbericht S69 über PFC-Zerstörung ("Abating Perfluorocompounds") durch eine Hochtemperatur-Abgasanlage von Edwards (Großbritannien) darf als solide gelten. Darin werden DRE-Werte von über 99% für PFCs wie NF_3 und C_2F_6 genannt, allerdings für den Fall optimaler Prozeßführung und in Abhängigkeit von bestimmten PFC-Konzentrationen im Ballast-Stickstoff, vom Abgasvolumenstrom, der Präsenz von genug Sauerstoff, ausreichender Temperatur u. dgl.. Als Problemgas gilt CF_4 , das wegen seiner hohen molekularen Stabilität nur schwer aufzubrechen ist. Dieser Umstand, auf den auch die inländischen Anlagenbauer aufmerksam machen, kommt in der SEMATECH-Studie durch einen DRE-Wert von maximal 95% für CF_4 zum Ausdruck.

3.6 Emissionsszenario für fluorierte Ätzgase 1990 bis 2020

Trotz steigender Einsatzmengen von fluorierten Ätzgasen in den nächsten Jahrzehnten gehen die PFC-Emissionen bis auf unbedeutende Mengen zurück. Dabei gelten folgende Annahmen:

1. Die Zufuhr von Fluor-Ätzgasen steigt von 30 t (1990) auf 42 t (1995) und weiter auf 62 t (2000) bis 80 t (2005 ff.). Von 2005 an bleibt der Verbrauch konstant.
2. Die Ausstattungsquote mit Abgasanlagen wächst von 0 % (1990) über 50 % (1995) und 90 % (2000) auf 99 % ab 2005.
3. Die Reinigungseffizienz der Abgassysteme beträgt gegenüber allen fluorierten Ätzgasen außer CF_4 98 %; gegenüber CF_4 liegt sie bei 95%.
4. Die emissionsmindernde Wirkung von PFC-Recycling wird nicht berücksichtigt.

Tab. 63: Emissionsentwicklung fluoriertes Ätzgase aus der deutschen Halbleiterindustrie 1990 bis 2005 ff. in Tonnen

Gas	SF_6	CF_4	CHF_3	C_2F_6	NF_3	Summe	Abgasanlagen Ausstattungs-Quote
Reaktorumsatz	27%	15%	15%	30%	60%		
Abgasreinigung	98%	95%	98%	98%	98%		
Emissionen in Tonnen pro Jahr							
1990	3,7	6,8	3,4	8,4	0,4	23	0%
1995	2,2	4,5	2,2	6,4	0,6	16	50%
2000	0,6	1,6	0,7	2,5	0,2	6	90%
2005 ff.	0,2	0,8	0,2	0,8	0,1	2	99%

Quellen: Tab. 60 für Verbräuche, Tab. 61 für Reaktorumsatz. Die Wirksamkeit der Abgasreinigung ist weitgehend der SEMATECH-Studie S69 entnommen. Die Abgasanlagen-Ausstattung für 1995 bis 2005 ff. beruht auf Expertenschätzung (siehe Text).

• Berechnungsbeispiel: C_2F_6 -Emission im Jahr 2000

Die jährlichen Verbräuche für einzelne oder alle PFCs sind Tabelle 60 zu entnehmen. Dieser gemäß werden im Jahr 2000 rund 30 Tonnen C_2F_6 eingesetzt.

1. Schritt: Der "Reaktorumsatz" für C_2F_6 beträgt lt. Tab. 63 ca. 30%. Im Abgas sind folglich 30% nicht mehr als C_2F_6 enthalten, sondern noch 70% oder 21 t.
2. Schritt: Die "Ausstattung mit Abgasanlagen" beträgt lt. Tab. 63 im Jahre 2000 rd. 90%. Von den 21 t C_2F_6 emittieren somit 10% unbehandelt. Das sind 2,1 t.
3. Schritt: Die restlichen 18,9 t (21-2,1) werden zu 98% durch "Abgasreinigung" zerstört. Die zwei Prozent, die nicht zerstört sind, machen 0,4 t aus.
4. Insgesamt emittieren 2,1 t (2. Schritt) plus 0,4 t (3. Schritt). Das sind 2,5 t.

3.7 Fazit zu den Emissionen

Obwohl die Verbräuche aller PFCs von 1990 bis 2005 von 30 auf 80 Tonnen steigen, nehmen die Emissionen im gleichen Zeitraum von 23 auf 2 Tonnen ab.

Die grafische Umsetzung der Tabelle 63 in Diagramm 44 macht den starken Rückgang der Emissionen für alle PFCs deutlich. Der Rückgang ist im wesentlichen der Ausstattung mit Abgasanlagen proportional.

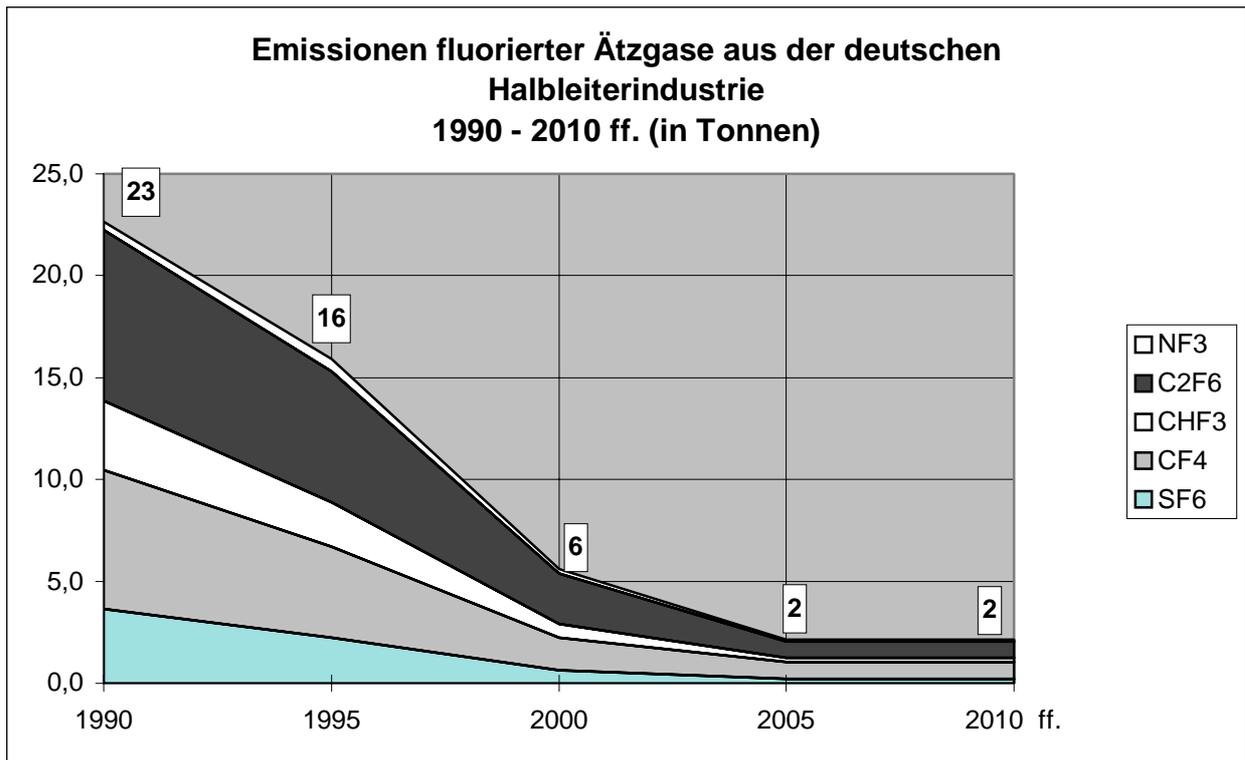


Diagramm 44: Die Emissionen fluorierteter Ätzgase aus der deutschen Halbleiterindustrie (1990-2010 ff.) gehen im Maße der Ausstattung mit Abgasanlagen in relativ kurzer Zeit von 23 auf 2 Tonnen zurück. Der Rückgang betrifft alle fluorierten Gase.

4. Der abnehmende Beitrag zum Treibhauseffekt ab 1995

Zur Ermittlung der Beitrags zum Treibhauseffekt werden die in Tabelle 63 aufgelisteten Emissionsmengen der einzelnen fluorierten Gase mit ihren jeweiligen GWP-Werten multipliziert. Die Resultate sind in Tabelle 64 zusammengefaßt und grafisch in Diagramm 45 wiedergegeben.

	GWP _{100a}	1990	1995	2000	2005	2010
SF ₆	23900	87	53	15	5	5
CF ₄	6500	44	29	10	5	5
CHF ₃	11700	40	25	8	2	2
C ₂ F ₆	9200	77	59	23	7	7
NF ₃	9720	4	6	2	1	1
Summe		252	173	59	21	21

Quellen: Emissionen in metrischen Tonnen nach Tab. 63. GWP-Werte außer für NF₃ nach IPCC 1995; für NF₃ nach McClear/Taylor 1996.

Verglichen mit anderen industriellen Sektoren war der Treibhausbeitrag der Halbleiterindustrie durch PFCs bereits im Jahre 1990 nicht besonders hoch. Er entsprach der Klimawirkung von 252 Tsd. Tonnen CO₂.

Mit der Einführung und Verbreitung der Abgasreinigung wird der Beitrag zum Treibhauseffekt trotz Anstiegs des PFC-Konsums auf das 2,5-fache bis zum Jahre 2005 auf

21 Tsd. Tonnen CO₂-Äquivalente sinken - auf acht bis neun Prozent des Ausgangswertes von 1990.

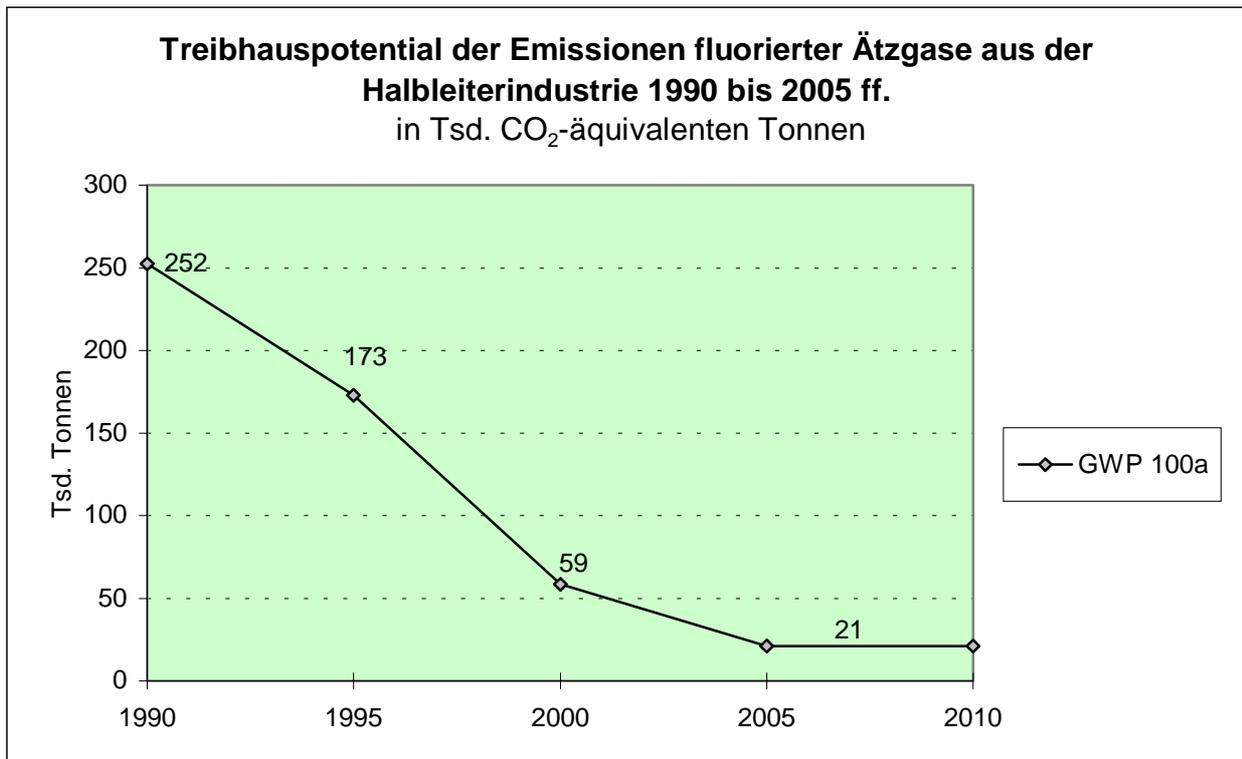


Diagramm 45: Ähnlich wie die metrische Tonnage der Emissionen vermindern sich auch die nach ihrem spezifischen Treibhausbeitrag (GWP_{100a}) gewichteten Emissionen infolge Abgasreinigung gegenüber dem Ausgangsjahr 1990 bis 2005 - trotz 2,5 fach höherer Einsatzmengen - von 252 auf 21 Tsd. Tonnen CO₂-Äquivalente oder auf 8 bis 9%.

Nachweise zur Halbleiterindustrie

- Air Products plc., Schreiben von J. Stienstra (Electronics Marketing) an Öko-Recherche, Walton-on-Thames 8.7.1996; Anhang: PFC Consumption Efficiencies for Processes Monitored;
- Applied Materials GmbH, Ismaning, pers. Mitt. 9.7.1996;
- Befragung Elektronikgase: Eigenverkäufe und Schätzung des Gesamtmarkts bis 2000:
 Air Liquide, Düsseldorf, 15.5.1996;
 Air Products GmbH, Hattingen, 29.5.1996;
 BOC Gase GmbH, Bopfinger, 8.7.96;
 Linde AG, Unterschleißheim, 29.4.1996;
 Messer-Griesheim GmbH, Krefeld, 22.4.1996;
- Centrotherm Dresden, Schreiben incl. Dokumentation der Abgasreinigungssysteme, 3.7.1996, sowie: pers. Mitt. 20.6.1996;
- Centrotherm, Blaubeuren, pers. Mitt. 30.7.1996;
- CS Clean Systems GmbH, Ismaning, pers. Mitt. 31.7.1996b;
- CS-GmbH, Fachgespräch mit Ch.Scholz (Geschäftsführer), E.Kopatzki (Produktmanager), W.Holzinger (Qualitätsmanagement), Ismaning 29.4.1996a;
- DAS-Dünnschicht Anlagen Systeme GmbH, Dresden, pers. Mitt. 26.6.1996;
- Du Pont: Zyron (R) 116 Global Business Policy, Revised 2/96, 1996b;
- Edwards Hochvakuum GmbH, Neu-Ulm, Schreiben incl. Dokumentation zur Abgasreinigung, 23.6.1996;
- Franz, G., Kalte Plasmen. Grundlagen, Erscheinungen, Anwendungen, Heidelberg 1990;
- Handelsblatt, 25.10.1995: Grafik Halbleiter Weltmarkt, Produktion in Europa 1989, 1994, 1999; zusammengestellt nach WSTS, Dataquest, INSTAT 3/95, Siemens;
- Hascher (Elektronik - Zeitschrift für industrielle Anwender und Entwickler, München), pers. Mitt. 3.7.96;
- IPCC = Intergovernmental Panel on Climate Change, Second Assessment Report: Climate Change 1995, Cambridge University Press, Cambridge 1995;
- Kücher, P., Clustertools - ein neues Anlagenkonzept für die Schichtherstellung in der Mikroelektronik, in: Vakuum in der Praxis (1992) Nr. 4, 255-262;
- Latt, J. (AMD, Sunnyvale), Reducing PFC Emissions: A Technology Perspective, in: Future Fab International (1996) issue 1, vol 1, 189-192;
- Linde AG Industriegase, Fachgespräch mit R.Hollenbach (Anwendungstechnik Elektronikgase) und P.Koch (Marketing Produkte), Unterschleißheim 29.4.1996;
- Markert, K., Scholz, Ch., Kopatzki: Emission Control of Greenhouse Gases via Irreversible Chemisorption of PFCs on Catalytically Active Chemisorbents, Vortrag zur SSA (Semiconductor Safety Association) -Tagung, San Diego, 1.4.1996;
- Mawle, P., Exhaust Management: Alchemy and Magic Boxes - or the Application of Science?, in: European Semiconductor, May 1995, 17-19;
- McCleaer, M./Taylor, A. (Praxair, USA), PFC Recycling, in: European Semiconductor July/August 1996, 41-44;
- Merten, H., Landrock, A., Herzs Schuh, R., Birkenfeld, T., Strukturaufklärung, Bewertung und Vorschläge zur schadstoffarmen Vernichtung von Abprodukten aus Plasmaätzprozesse. Vortrag zur SSA (Semiconductor Safety Association) -Tagung, München, April 1990;
- Ruge, I./Mader, H., Halbleiter-Technologie, Heidelberg, 3. Aufl. 1991;
- SEMATECH: S69 Evaluation of an Edwards/Alzeta Thermal Processing Unit (TPU) Designed to Abate Perfluorocompounds (PFCs), Austin, TX, 1995;

Sicherheitsdatenblätter "Gase für die Halbleitertechnik", Linde -Technische Gase:

Hexafluorethan R 116 (C_2F_6), Stand Februar 1992

Schwefelhexafluorid (SF_6), Stand Februar 1992;

Stickstofftrifluorid (NF_3), Stand Februar 1993;

Tetrafluormethan R 14 (CF_4), Stand Juli 1994

Trifluormethan R 23 (CHF_3), Stand Juli 1992;

Purigon (CF_4 enthaltend), Gasgemische für Plasmaprozesse.

Siemens AG Halbleiter, München, pers. Mitt. 11.7.1996b.

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 plasmatechnischen Prozessen, in: Vakuum in der Praxis (1992) Nr.1, 43-54.

Verzeichnis der Diagramme

Diagramm 1:	Emissionen vollfluorierter Verbindungen von 1990 bis 2020 in t/a (Realentwicklung und Prognose).	3
Diagramm 2:	H-FKW-Emissionen 1990-2020 in Tonnen pro Jahr bei teilweisem und bei vollständigem FCKW-Umstieg auf H-FKW).	4
Diagramm 3:	Emissionen fluorierter Verbindungen in Mio. t CO ₂ -Äquivalente 1990-2020 (Realentwicklung und Prognosen).	5
Diagramm 4:	Verbrauch und Emission von SF ₆ nach Anwendungen 1995 in Tonnen.	8
Diagramm 5:	SF ₆ -Gesamtemissionen 1990-2030 nach Anwendungen in Tonnen.	10
Diagramm 6:	Beitrag zum Treibhauseffekt durch SF ₆ -Emissionen in Mio. t CO ₂ -Äquivalente 1990-2030.	12
Diagramm 7:	Anteile der verschiedenen elektrischen Betriebsmittel der EVU an SF ₆ -Bestand und SF ₆ -Emissionen 1995.	21
Diagramm 8:	SF ₆ -Emissionen bei Betriebsmitteln der Stromversorgung 1990-2020 in Tonnen pro Jahr.	22
Diagramm 9:	SF ₆ -Verbrauch für Schallschutzscheiben 1975 bis 2029 in t/a.	27
Diagramm 10:	SF ₆ -Emissionen von Schallschutzscheiben 1975 bis 2030 in t/a.	31
Diagramm 11:	Beitrag zum Treibhauseffekt durch SF ₆ -Emissionen aus Schallschutzscheiben 1975 bis 2030.	32
Diagramm 12:	Verbrauch und Emissionen von SF ₆ als Reifenfüllgas 1990-2010 ff. in t.	37
Diagramm 13:	Magnesiumguß-Produktion und SF ₆ -Emission 1990-2010 in t.	44
Diagramm 14:	Verbrauch und Emission von SF ₆ in der Halbleiterfertigung 1990-2010 ff. in Tonnen pro Jahr.	45
Diagramm 15:	Inländische PFC-Emissionen von 1990 bis 2005 ff. in Tonnen pro Jahr.	58
Diagramm 16:	Jährliche PFC-Emissionen in Mio. t CO ₂ -Äquivalente 1990 bis 2005 ff.	59
Diagramm 17:	Aluminium-Elektrolyse-Kapazitäten nach Oxidzufuhr 1990, 1996 und 2000 ff. in t/a.	64
Diagramm 18:	PFC-Emissionen aus der deutschen Aluminiumindustrie 1990 bis 2005 ff. (Schätzung in t/a).	71
Diagramm 19:	Beitrag zum Treibhauseffekt durch PFC-Emissionen aus deutschen Aluminiumhütten in Mio. t CO ₂ -Äquivalente.	72
Diagramm 20:	H-FKW-Emissionen nach Anwendungen in Tonnen 1990-2020 bei vollem H-FKW-Umstieg.	82
Diagramm 21:	Beitrag zum Treibhauseffekt durch H-FKW-Emissionen. FCKW-Vollumstieg auf H-FKW.	83
Diagramm 22:	H-FKW-Emissionen nach Anwendungen bei H-FKW-Teilumstieg 1990-2020 in Tonnen.	84
Diagramm 23:	Beitrag zum Treibhauseffekt durch H-FKW-Emissionen 1990-2020 bei FCKW-Teilumstieg auf H-FKW.	85
Diagramm 24:	Zusammensetzung der vier wichtigsten H-FKW-Kältemischungen für den Ersatz von R502 und R22.	89
Diagramm 25:	Zusammensetzung des stationären Kältemittelbestands vor und nach voller Umstellung von FCKW auf H-FKW.	90
Diagramm 26:	Jahres-Neuverbräuche einzelner H-FKW-Kältemittel für stationäre Anlagen bis 2020 bei vollem FCKW-Ersatz durch H-FKW.	92
Diagramm 27:	Emissionen von H-FKW-Kältemitteln aus stationärer Anwendung. Prognose bis 2020 bei vollem H-FKW-Umstieg.	94
Diagramm 28:	Emissionen von H-FKW-Kältemitteln aus stationärer Anwendung: Partieller H-FKW-Umstieg.	97
Diagramm 29:	Beitrag zum Treibhauseffekt durch H-FKW-Kältemittlemissionen stationärer Anwendung in Mio. t CO ₂ -Äquivalente: Voller und part. H-FKW-Umstieg.	98
Diagramm 30:	Modellrechnung für Neuverbrauch und Emissionen von 134a aus Pkw-Klimaanlagen 1993-2020.	101
Diagramm 31:	Kältemittelverbrauch und -emissionen aus der Mobilkälte ohne Pkw	

	1990 bis 2020.	103
Diagramm 32:	H-FKW-Emissionen aus der Mobilkälte insgesamt 1990-2020.	106
Diagramm 33:	Neuverbrauch und Emissionen von R134a aus Pkw-Klimaanlagen bei Wechsel von R134a auf CO ₂ ab dem Jahr 2005.	108
Diagramm 34:	H-FKW-Emissionen aus der gesamten Mobilkälte bei partiellem H-FKW-Umstieg bzw. bei Pkw-Klimaanlagen mit CO ₂ ab 2005.	109
Diagramm 35:	Beitrag zum Treibhauseffekt durch H-FKW-Emissionen der Mobilkälte bei vollem und partiellem H-FKW-Umstieg.	111
Diagramm 36:	H-FCKW-Emissionen aus PU-Montageschaum-Dosen 1992-2020 im Modell 50 zu 50.	114
Diagramm 37:	H-FKW-Emissionen aus PU-Montageschaum-Dosen 1992-2020 nach Emissionsmodell 0 zu 100.	115
Diagramm 38:	Beitrag zum Treibhauseffekt durch H-FKW aus PU-Montageschaum in Mio. t CO ₂ -Äquivalente.	116
Diagramm 39:	Reale und durch Pulver ersetzte FCKW-Mengen in Asthma-Inhalatoren nach Wirkstoffgruppen 1995/96 in Tonnen.	121
Diagramm 40:	H-FKW aus Asthasprays 1996-2010 ff. bei vollem Austausch der FCKW durch H-FKW.	122
Diagramm 41:	H-FKW aus Asthasprays 1995-2010 ff. bei partiellem Ersatz der FCKW durch H-FKW.	123
Diagramm 42:	Treibhauseffektbeitrag der H-FKW aus Asthasprays bei vollem und bei partiellem H-FKW-Umstieg (Prognosen).	124
Diagramm 43:	Verbrauchsentwicklung fluoriertes Ätzgase der deutschen Halbleiterindustrie 1990-2005 in Tonnen.	135
Diagramm 44:	Die Emissionen fluoriertes Ätzgase aus der deutschen Halbleiterindustrie (1990-2010 ff.).	141
Diagramm 45:	Beitrag zum Treibhauseffekt durch Emissionen fluoriertes Ätzgase aus der Halbleiterindustrie 1990 bis 2005 ff.	142