

TEXTE

164/2021

Inventarermittlung der F-Gase 2019/2020

Daten von HF(C)KW, FKW, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE und PFPME für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für die Berichtsjahre 2019 und 2020

TEXTE 164/2021

Projektnummer 141272

FB000737

Inventarermittlung der F-Gase 2019/2020

Daten von HF(C)KW, FKW, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE und
PFPME für die nationale Emissionsberichterstattung
gemäß Klimarahmenkonvention für die Berichtsjahre
2019 und 2020

von

Kristina Warncke, Barbara Gschrey
Öko-Recherche, Frankfurt am Main

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Öko-Recherche
Münchener Str. 23a
60329 Frankfurt

Abschlussdatum:

November 2021

Redaktion:

Fachgebiet III 1.4 Stoffbezogene Produktfragen
Kerstin Martens, Cornelia Elsner

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Dezember 2021

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Inventarermittlung der F-Gase 2019/2020

Der Bericht präsentiert die Emissionsdaten der fluorierten Treibhausgase HF(C)KW, FKW, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE und PPFMIE (F-Gase) für die Jahre 1995-2020 für Deutschland.

Seit 2005 bewegen sich die Emissionen fluorierter Treibhausgase (F-Gase) auf relativ konstantem Niveau. Der seit 2010 stattfindende leichte Anstieg der Emissionen war im Jahr 2018 erstmals rückläufig und sank auf 5.946 t, ausgedrückt in CO₂-Äquivalenten 14,3 Mio. t. Dieser Abwärtstrend hat sich deutlich fortgesetzt, und so lagen die Emissionen im Jahr 2020 bei 5.281 t, was 12,1 t in CO₂-Äquivalenten entspricht. Damit machen sie etwa 1,5 % an den Gesamtemissionen aller Treibhausgase in Deutschland aus, die 2020 bei etwa 793 Mio. t CO₂-Äquivalenten lagen.

Dieser Bericht ist entsprechend der Strukturierung des Nationalen Inventarberichts (NIR) aufgeteilt. In diesem alle Treibhausgase umfassenden Bericht werden die fluorierten Treibhausgase in den Sektor-Abschnitten 2.B, 2.C, 2.E, 2.F, 2.G und 2.H behandelt. Sektor 2.B befasst sich unter 2.B.9 mit den Emissionen aus der Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF₆. Das folgende Kapitel 2.C behandelt die Metallproduktion. Hier werden unter 2.C.3 und 2.C.4 die Emissionen aus der Aluminium- und Magnesiumproduktion aufgeführt. Der Sektor 2.E beinhaltet die Emissionen aus der Elektronik-Industrie, der folgende Sektor 2.F diejenigen aus Anwendungen als ODS-Ersatz und der Sektor 2.G die „Sonstige Produktherstellung und –verwendung“. Unter dem Abschnitt 2.H werden vertrauliche Emissionen verschiedener Sektoren¹ aggregiert berichtet. Außerdem gibt es Informationen zu freiwillig berichteten fluorierten Treibhausgasen.

Abstract: Inventory of F-Gases 2019/2020

This report presents the 1995-2020 data on the German emissions of fluorinated greenhouse gases H(C)FCs, PFCs, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE, and PPFMIE (F-gases).

Since 2005, F-gas emissions have been relatively steady. The slight increase in emissions that has occurred since 2010 stopped for the first time in 2018 and emissions decreased to 5.946 t, expressed in CO₂ equivalents 14.3 million t. This trend has continued significantly and so emissions in 2020 were 5.281 t, which corresponds to 12,1 t in CO₂ equivalents. They thus make up around 1.5 % of the total emissions of all greenhouse gases in Germany, which in 2020 were around 793 million t CO₂ equivalents.

This report is divided according to the structure of the National Inventory Report (NIR). The NIR contains detailed descriptive and numerical information on all greenhouse gas (GHG) emissions. Information about fluorinated greenhouse gases is located in the following sections: 2.B, 2.C, 2.E, 2.F, 2.G and 2.H. Chapter 2.B illustrates under 2.B.9 the emissions of the production of halogenated hydrocarbons and SF₆. The following chapter 2.C covers the production of metal and is giving detailed information on emissions of the production of aluminium and magnesium in the sub section 2.C.3 and 2.C.4. Chapter 2.E includes emissions of the electronic industry, the following chapter 2.F those from applications used as ODS alternatives and the chapter 2.G “Other product manufacture and use”. Confidential emissions of different sectors are reported in aggregated form in chapter 2.H² and also information on voluntarily reported fluorinated greenhouse gases.

¹ Darunter fallen die Emissionen aus der Verwendung der Wärmeüberträger (2.E.4), als Lösemittel (2.F.5), aus der AWACS-Wartung (2.G.2.a), aus Sportschuhen (2.G.2.d), beim Schweißen (2.G.2.e), bei der Herstellung optischer Glasfasern (2.G.2.e) und von Perfluorodecalin in medizinischen und kosmetischen Anwendungen (2.G.2.e).

² This includes emissions from the use as heat transfer fluid (2.E.4), solvents (2.F.5), from AWACS maintenance (2.G.2.a), from sport shoes (2.G.2.d), from welding (2.G.2.e), from optical fibre production (2.G.2.e) and of perfluorodecalin in medical and cosmetic applications (2.G.2.e).

6

1.5.3	Feuerlöschmittel (2.F.3).....	47
1.5.4	Aerosole (2.F.4).....	47
1.5.4.1	Dosieraerosole.....	47
1.5.4.2	Sonstige Aerosole	48
1.5.5	Lösemittel (2.F.5)	48
1.5.6	2019 Refinement.....	49
1.6	Sonstige Produktherstellung und -verwendung (2.G)	50
1.6.1	Elektrische Betriebsmittel (2.G.1).....	52
1.6.1.1	Elektrische Anlagen der Energieübertragung und -verteilung	52
1.6.1.2	Produktion elektrischer Bauteile für die Energieübertragung (T&D Bauteile).....	53
1.6.2	SF ₆ und FKW aus sonstiger Produktverwendung (2.G.2).....	53
1.6.2.1	Militär - AWACS (2.G.2.a).....	53
1.6.2.2	Teilchenbeschleuniger (2.G.2.b)	54
1.6.2.3	Isolierglasfenster (2.G.2.c)	54
1.6.2.4	Adiabatische Anwendungen – Autoreifen und Sportschuhe (2.G.2.d)	54
1.6.2.5	Sonstige: Spurengas, Schweißen, optische Glasfasern, medizinische und kosmetische Anwendungen (2.G.2.e).....	55
1.6.3	ORC-Anlagen (2.G.4)	56
1.6.4	2019 Refinement.....	56
1.7	Andere Bereiche (2.H.3).....	59
2	Fluorierte Treibhausgase für die freiwillige Berichterstattung	60
2.1	Ungesättigte teilfluorierte Kohlenwasserstoffe.....	60
2.2	Hydrofluorierte Ether (HFE)	63
2.2.1	HFE in der Industrie	63
2.2.2	HFE als Narkosegase in der Medizin	65
2.3	Perfluorierte Polyether (PFPE)	67
2.3.1	GWP von PFPE.....	67
2.3.2	Verwendung in ORC-Anlagen.....	67
2.3.3	Wärmeüberträger in der Halbleiterindustrie	67
2.3.4	Dampfphasen-Reflowlöten von Leiterplatten mit PPFMIE (Perfluorpolymethylisopropylether).....	68
2.3.5	Lösemittel in Schmierstoffen	68
2.3.6	Zusammenfassung der PFPE-Emissionen in Deutschland	68
2.4	Trifluormethylschwefelpentafluorid (SF ₅ CF ₃)	69
2.5	Sulfuryldifluorid (SO ₂ F ₂)	70

2.6	Weitere fluorierte Treibhausgase	71
2.7	Die zusätzlichen F-Gase für die freiwillige Berichterstattung	72
3	Quellenverzeichnis	73
3.1	F-Gas-Emissionen	73
3.2	Inventarverbesserungen	84
3.3	Fluorierte Treibhausgase für die freiwillige Berichterstattung	86
4	Emissionstabellen für 2020 im Vergleich mit 1990, 2000, 2005, 2010, 2015, 2018 und 2019	87
4.1	Chemische Industrie: Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF ₆ (2.B.9)	87
4.2	Metallproduktion (2.C)	88
4.3	Elektronikindustrie (2.E)	89
4.4	Anwendung als ODS-Ersatzstoff (2.F)	91
4.5	Sonstige Produktherstellung und -verwendung (2.G)	105
4.6	Vertrauliche Daten (2.H.3)	108
4.7	Fluorierte Treibhausgase für die freiwillige Berichterstattung	109
4.8	Gesamtemissionen	110

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland [Mio. t CO ₂ -Äquivalente] 1995-2020	18
Abbildung 2:	Anteile der klimawirksamen F-Gas-Emissionen bezogen auf CO ₂ -Äquivalente nach Sektoren in Deutschland 2020 (%)	19
Abbildung 3:	Anteile der verschiedenen Sektoren an den HFKW-Emissionen bezogen auf Tonnen in Deutschland 2020 (%)	35
Abbildung 4:	Anteile der Emissionen bezogen auf Tonnen der verschiedenen Subsektoren im Sektor Kälte- und Klimaanlage in Deutschland 2020 (%)	36
Abbildung 5:	Anteile der Emissionen bezogen auf CO ₂ -Äquivalente der verschiedenen Subsektoren im Sektor Kälte- und Klimaanlage in Deutschland 2020 (%)	37
Abbildung 6:	Anteile der klimawirksamen Emissionen bezogen auf CO ₂ - Äquivalente des Sektors 2.G und 2.H.3 in Deutschland 2020 (%)	52
Abbildung 7:	Schema Foulard-Prozess.....	57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Emissionen fluorierter Treibhausgase [t] 1995-2020	17
Tabelle 2:	Emissionen fluorierter Treibhausgase [Mio. t CO ₂ -Äquivalente] 1995-2020.....	17
Tabelle 3:	Übersicht der Änderungen des <i>2019 Refinement</i> nach Sektoren und Subsektoren.....	20
Tabelle 4:	Emissionen bei der Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF ₆ [t] 1995-2020	21
Tabelle 5:	Emissionen bei der Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF ₆ [Mio. t CO ₂ -Äquivalente] 1995- 2020	21
Tabelle 6:	Emissionen aus der Metallproduktion [t] 1995-2020	24
Tabelle 7:	Emissionen aus der Metallproduktion [kt CO ₂ -Äquivalente] 1995-2020.....	24
Tabelle 8:	Emissionen in der Elektronik-Industrie [t] 1995-2020.....	29
Tabelle 9:	Emissionen in der Elektronik-Industrie [kt CO ₂ -Äquivalente] 1995-2020.....	30
Tabelle 10:	HFKW-Emissionen [Mio. t CO ₂ -Äquivalente] 1995-2020.....	34
Tabelle 11:	SF ₆ -Emissionen und vertrauliche Emissionen (2.H.3) [t] 1995- 2020	50
Tabelle 12:	SF ₆ -Emissionen und vertrauliche Emissionen (2.H.3) [Mio. t CO ₂ -Äquivalente] 1995-2020	51

Tabelle 13:	Emissionen ungesättigter HFKW in Tonnen und kt CO ₂ -Äquivalenten 2012, 2015, 2017-2020	62
Tabelle 14:	Emissionen von HFE (-7100, -7200, -7300, -7500) aus offenen industriellen Anwendungen [kt CO ₂ -Äquivalente] 2000-2020.	64
Tabelle 15:	Wärmeübertragung: HFE-Emissionen in der Halbleiter- und sonstigen Industrie [kt CO ₂ -Äquivalente] 2000-2020.....	65
Tabelle 16:	Chemische und ökologische Kenndaten der fünf halogenierten Narkosegase	65
Tabelle 17:	Emissionen der halogenierten Narkosegase in Deutschland 1990-2020 unter Einbeziehung ihrer Metabolisierungsraten [t]	66
Tabelle 18:	Emissionen der halogenierten Narkosegase in Deutschland 1990-2020 [t CO ₂ -Äquivalente] – ohne Halothan.....	66
Tabelle 19:	PFPE-Emissionen aus Wärmeübertragung, Dampfphasen-Reflowlötten, Schmierstoffen und ORC-Anlagen 1990-2020 in Tonnen und kt CO ₂ -Äquivalenten.....	68
Tabelle 20:	Emissionen der drei stickstoffhaltigen fluorierten Treibhausgase C ₉ F ₂₁ N, C ₅ F ₁₁ NO und C ₁₂ F ₂₇ N in Tonnen und kt CO ₂ -Äquivalenten 1990-2020.....	71
Tabelle 21:	Emissionen der vom Umweltbundesamt freiwillig berichteten zusätzlichen F-Gase nach Stoffen im Jahr 2020 in kt CO ₂ -Äquivalenten	72

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
AC	Air Conditioning (Klimatisierung)
AR4	Fourth IPCC Assessment Report (4. IPCC Sachstandsbericht)
ATA	Air Transport Association
AWACS	Airborne Early Warning and Control System
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
CF ₄	Tetrafluormethan
C ₂ F ₆	Hexafluorethan
ChemKlimaschutzV	Chemikalien-Klimaschutzverordnung
CSU	Cell start-up
CVD	Chemical Vapour Deposition
ECS	Environmental Control System
E-PRTR	European Pollutant Release and Transfer Register
EF	Emissionsfaktor
F-Gase	Fluorierte Treibhausgase
F-Gase-Verordnung	Verordnung (EU) Nr. 517/2015 über fluorierte Treibhausgase
FKW	Vollhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
FCKW	Vollhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe
GIL	Gasisolierte Leitungen
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
HFCKW	Teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe
HFE	Hydrofluorether
HFKW	Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
HFO	Hydrofluor-Olefine (ungesättigte HFKW)
HVAE	High-Voltage Anode Effect
IED	EU-Industrieemissionsrichtlinie
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPCC-GL	Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines (IPCC-Richtlinien)
kt	Kilotonne
LVAE	Low-Voltage Anode Effect
MAC	Mobile Air Conditioning
MAC-Richtlinie	Richtlinie 2006/40/EG über Emissionen aus Klimaanlage in Kraftfahrzeugen

Mio.	Millionen
NAEWF	Airborne Early Warning Force
NF ₃	Stickstofftrifluorid
ODP	Ozone Depleting Potential (Ozonzerstörungspotenzial)
ODS	Ozone Depleting Substances (ozonzerstörende Substanzen)
OEM	Original Equipment Manufacturer (Originalausrüstungshersteller)
ORC	Organic Rankine Cycle (Organischer Rankine-Zyklus)
PFAS	Per- and Poly Fluorinated Alkyl Substances (per- und polyfluorierte Alkylverbindungen)
PFPE	Perfluoropolyether
PFPMIE	Perfluorpolymethylisopropylether
PFTBA	Perfluortributylamin
PU	Polyurethan
PV-Industrie	Photovoltaik-Industrie
RAC	Refrigeration and Air Conditioning
REACH-Verordnung	Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe
SAR	Second IPCC Assessment Report (2. IPCC Sachstandsbericht)
SF ₆	Schwefelhexafluorid
SUV	Sport Utility Vehicle (Geländelimousinen)
SV	Selbstverpflichtung
t	Tonne
T&D	Transmission and Distribution (of electric power)
TEAP	Technology and Economic Assessment Panel
UBA	Umweltbundesamt
uHFKW	Ungesättigte teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
UNEP	United Nations Environment Programme
UStatG	Umweltstatistikgesetz
VRF	Variable Refrigerant Flow (variabel geregelter Kältemittelfluss)
WP	Wärmepumpe
XPS	Extrudiertes Polystyrol
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.

Zusammenfassung

Als Vertragsstaat der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (United Nations Framework Convention on Climate and Climate Change (UNFCCC)) ist die Bundesrepublik Deutschland verpflichtet, jährlich Emissionsdaten von Treibhausgasen und die zu ihrer Berechnung verwendeten Basisdaten und Methoden zu übermitteln.

Die Anforderungen an die Berichterstattung von Annex I-Ländern, zu denen die Bundesrepublik Deutschland gehört, sind in den UNFCCC Annex I Reporting Guidelines festgelegt. Für die Ermittlung der Daten und datenbezogenen Informationen sind durch das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines mit Methoden festgelegt worden. Die Emissionsberichterstattung muss Qualitätskriterien erfüllen, die den *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* entnommen werden können. Die Anforderungen an die Berichterstattung sind: Transparenz, Konsistenz, Vergleichbarkeit, Vollständigkeit und Genauigkeit.

Im Zusammenhang mit den internationalen Vereinbarungen zum Klimaschutz muss Deutschland gemäß der Verordnung (EU) 2018/1999 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz (Governance Verordnung) auch jährlich Treibhausgasemissionen an die Europäische Kommission berichten. Die Berichterstattung fluorierter Treibhausgase (F-Gase) ist ebenfalls in der Verordnung (EU) Nr. 517/2014 (F-Gase-Verordnung) vorgeschrieben.

Der Bericht präsentiert die Emissionsdaten der fluorierten Treibhausgase HF(C)KW, FKW, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE und PPFMIE (F-Gase) für die Jahre 1995-2020 für Deutschland. Ziel ist es, eine qualifizierte Datenlage für die Emissionsberichterstattung der Berichtsjahre 2019 und 2020 für diese Gase zu liefern.

Seit 2005 bewegen sich die Emissionen fluorierter Treibhausgase (F-Gase) auf relativ konstantem Niveau. Der seit 2010 stattfindende leichte Anstieg der Emissionen war im Jahr 2018 erstmals rückläufig und sank auf 5.946 t, ausgedrückt in CO₂-Äquivalenten 14,3 Mio. t. Dieser Abwärtstrend hat sich deutlich fortgesetzt und so lagen die Emissionen im Jahr 2020 bei 5.281 t, was 12,1 t in CO₂-Äquivalenten entspricht. Damit machen sie etwa 1,5 % an den Gesamtemissionen aller Treibhausgase in Deutschland aus, die 2020 bei etwa 793 Mio. t CO₂-Äquivalenten lagen.

Dieser Bericht ist entsprechend der Strukturierung des Nationalen Inventarberichts (NIR) aufgeteilt. In diesem alle Treibhausgase umfassenden Bericht werden die fluorierten Treibhausgase in den Sektor-Abschnitten 2.B, 2.C, 2.E, 2.F, 2.G und 2.H behandelt. Sektor 2.B befasst sich unter 2.B.9 mit den Emissionen aus der Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF₆. Das folgende Kapitel 2.C behandelt die Metallproduktion. Hier werden unter 2.C.3 und 2.C.4 die Emissionen aus der Aluminium- und Magnesiumproduktion aufgeführt. Der Sektor 2.E beinhaltet die Emissionen aus der Elektronik-Industrie, der folgende Sektor 2.F diejenigen aus Anwendungen als ODS-Ersatz und der Sektor 2.G die „Sonstige Produktherstellung und -verwendung“. Unter dem Abschnitt 2.H werden vertrauliche Emissionen verschiedener Sektoren³ aggregiert berichtet. Außerdem gibt es Informationen zu freiwillig berichteten fluorierten Treibhausgasen. Die einzelnen Kapitel sind wiederum in Untersektoren aufgeteilt.

³ Darunter fallen die Emissionen aus der Verwendung als Wärmeüberträger (2.E.4) als Lösemittel (2.F.5), der AWACS-Wartung (2.G.2.a), aus Sportschuhen (2.G.2.d), beim Schweißen (2.G.2.e), bei der Herstellung optischer Glasfasern (2.G.2.e) und von Perfluordecalin in medizinischen und kosmetischen Anwendungen (2.G.2.e).

Im Nationalen Inventarbericht ist der erste Abschnitt zu den Emissionen von fluorierten Treibhausgasen das Kapitel 2.B.9. „Chemische Industrie, Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF₆“. Die Emissionen von HFKW und SF₆ in diesem Bereich lagen 2020 bei 14 (metrischen) Tonnen, was etwa 45 kt CO₂-Äquivalenten entspricht und damit einen geringen Anteil an den Gesamtemissionen fluorierter Treibhausgase hat.

Die Emissionen aus der Metallproduktion (2.C.3; 2.C.4) umfassten im Jahr 2020 ca. 18 Tonnen, was ca. 144 kt CO₂-Äquivalenten entspricht.

Der Bereich der Elektronik-Industrie (2.E) beinhaltet die Halbleiter- und Platinenproduktion, die Photovoltaik sowie die Anwendung von fluorierten Substanzen als Wärmeüberträger. Aus diesen Sektoren emittierten 17 Tonnen im Jahr 2020 (178 kt CO₂-Äquivalente), vorwiegend FKW, aber auch NF₃.

Die Anwendungen von fluorierten Gasen als ODS-Ersatzstoffe (2.F) bilden den größten Bereich und verursachten 2020 mit 5.082 metrischen Tonnen ca. 96 % aller F-Gas-Emissionen (71 % bezogen auf CO₂-Äquivalente, nämlich 8.675 kt). Der Bereich umfasst die Gesamtheit der Kältemittelanwendungen in stationären und mobilen Kälte- und Klimaanlage sowie Treibmittel für Schäume und Aerosole und außerdem Feuerlösch- und Lösemittel.

Die „Sonstige Produktherstellung und -verwendung“ (2.G) ist zwar nur für etwa 3 % der Emissionen in metrischen Tonnen (148 Tonnen), aber wegen des hohen Treibhauspotenzials von SF₆ für 25 % der Emissionen in CO₂-Äquivalenten verantwortlich, was 3.040 kt entspricht. Unter diesen Bereich fallen der größte Anwendungsbereich von SF₆, die elektrischen Betriebsmittel, und auch fluorierte Gase in ORC-Anlagen, sowie Sportschuhen und Medizinprodukten.

Zusätzlich zu den unter UNFCCC verpflichtend zu berichtenden Stoffen werden in dieser Studie Verwendungsmengen und Emissionen weiterer F-Gase für die freiwillige Berichterstattung des Umweltbundesamtes abgeschätzt. Dabei handelt es sich um uHFKW und uHFCKW, um Hydrofluorether (HFE) bzw. Hydrochlorfluorether (HCFE), um Perfluoropolyether (PFPE), um Trifluormethylschwefelpentafluorid (SF₅CF₃) und die drei stickstoffhaltigen perfluorierten Substanzen C₉F₂₁N (Fluorinert FC-3283), C₅F₁₁NO (Fluorinert FC-3284) und C₁₂F₂₇N (Fluorinert FC-43, Perfluortributylamin (PFTBA)).

Summary

As a signatory to the United Nations Framework Convention on Climate and Climate Change (UNFCCC), the Federal Republic of Germany is obliged to submit data on greenhouse gas emissions including underlying data and methods.

The reporting requirements of Annex I countries, to which the Federal Republic of Germany belongs, are set out in the UNFCCC Annex I Reporting Guidelines. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) has established guidelines that include methods to determine the data and data-related information. Emissions' reporting is bound to quality criteria, which can be found in the *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. The reporting requirements are: transparency, consistency, comparability, completeness and accuracy.

With regards to international agreements on climate protection, Germany is also obligated to annually report greenhouse gas emissions to the European Commission in accordance with Regulation (EU) 2018/1999 on the Governance of the Energy Union and Climate Action (Governance Regulation). The reporting of fluorinated greenhouse gases (F-gases) is also prescribed in Regulation (EU) No. 517/2014 (F-Gas Regulation).

This report presents the 1995-2020 data on the German emissions of fluorinated greenhouse gases H(C)FCs, PFCs, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE, and PFPME (F-gases). The aim is to provide qualified data for emissions reporting for the reporting years 2019 and 2020 for these gases.

Since 2005, F-gas emissions have been relatively steady. The slight increase in emissions that has occurred since 2010 stopped for the first time in 2018 and emissions decreased to 5,943 t, expressed in CO₂ equivalents 14.31 million t. This trend has continued significantly and so emissions in 2020 were 5,281 t, which corresponds to 12.1 t in CO₂ equivalents. They thus make up around 1.5 % of the total emissions of all greenhouse gases in Germany, which in 2020 were around 793 million t CO₂ equivalents.

This report is divided according to the structure of the National Inventory Report (NIR). The NIR contains detailed descriptive and numerical information on all greenhouse gas (GHG) emissions. Information about fluorinated greenhouse gases is located in the following sections: 2.B, 2.C, 2.E, 2.F, 2.G and 2.H. Chapter 2.B illustrates under 2.B.9 the emissions of the production of halogenated hydrocarbons and SF₆. The following chapter 2.C covers the production of metal and is giving detailed information on emissions of the production of aluminium and magnesium in the sub section 2.C.3 and 2.C.4. Chapter 2.E includes emissions of the electronic industry, the following chapter 2.F those from applications used as ODS alternatives and the chapter 2.G "Other product manufacture and use". Confidential emissions of different sectors are reported in aggregated form in chapter 2.H⁴ and also information on voluntarily reported fluorinated greenhouse gases. Most of these chapters are again partitioned into subchapters.

The first chapter about emissions of fluorinated greenhouse gases in the NIR is Chapter 2.B.9, which includes the sector "Chemical industry, production of halogenated hydrocarbons and SF₆". Emissions of HFCs and SF₆ were 14 metric tons in 2020, which corresponds to around 45 kt CO₂ equivalents, and hence have a small share regarding the overall emissions.

⁴ This includes emissions from the use as heat transfer fluid (2.E.4), solvents (2.F.5), from AWACS maintenance (2.G.2.a), from sport shoes (2.G.2.d), from welding (2.G.2.e), from optical fibre production (2.G.2.e) and of perfluorodecalin in medical and cosmetic applications (2.G.2.e).

The emissions of the production of metal (2.C.3; 2.C.4) compromised 18 tons in 2020, which equals 144 kt CO₂ equivalents.

The chapter of electronic industry (2.E) comprises the semiconductor- and board production, manufacturing of photovoltaic and the application of fluorinated substances as heat transfer fluids. The emissions of these categories were 17 tons in 2020 (178 kt CO₂ equivalents), mainly PFCs but also NF₃.

The applications of fluorinated greenhouse gases as ODS alternatives (2.F) form the largest area in 2020, with 5,082 metric tons they are responsible for 96 % of all F-gas emissions (71 % in terms of CO₂ equivalents: 8.675 kt). The sector covers all refrigerant applications in stationary and mobile refrigeration and air conditioning systems as well as foaming agents and aerosols, fire extinguishing agents and solvents.

Although the sector "Other product manufacture and use" is only responsible for about 3 % of the overall F-gas emissions in metric tons (148 tons), it is equal to about 25 % of the emissions measured in CO₂ equivalents, namely 3.040 kt, because of the high global warming potential of SF₆. It comprises the major application area of SF₆, electrical equipment, and also fluorinated gases used in ORC systems as well as sport shoes and medical applications.

In addition to those substances that are subject to obligatory national reporting under UNFCCC, use and emissions of further F-gases are estimated for voluntary reporting by the German Environment Agency (Umweltbundesamt). These fluorinated substances are unsaturated hydro(chloro)fluorocarbons (unsat. H(C)FCs), hydrofluoroethers (HFEs) and hydrochlorofluoroethers (HCFEs), perfluoropolyethers (PFPEs), trifluoromethyl sulphur pentafluoride (SF₅CF₃) and the three nitrogen-containing perfluorinated substances C₉F₂₁N (Fluorinert FC-3283), C₅F₁₁NO (Fluorinert FC-3284) and C₁₂F₂₇N (Fluorinert FC-43, Perfluortributylamin (PFTBA)).

1 Die F-Gas-Emissionen von 1995 bis 2020

Seit 2005 bewegen sich die Emissionen fluoriertter Treibhausgase (F-Gase), die der UNFCCC-Berichtspflicht unterliegen, auf relativ konstantem Niveau; allerdings sind sie zwischen 2010 und 2015 um 6 % angestiegen. Im Jahr 2018 sanken sie gegenüber dem Vorjahr bereits sichtbar auf 5.945,8 t bzw. - ausgedrückt in CO₂-Äquivalenten - auf 14,3 Mio. t. Dieser Trend setzte sich 2019 fort und auch im Jahr 2020 fand ein deutlicher Rückgang der Emissionen auf 5.280,7 t (12 Mio. t CO₂-Äquivalente) statt (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2).

Seit 2013 wurden einige Substanzen neu in die Emissionsabschätzung aufgenommen, u.a. Stickstofftrifluorid (NF₃) und Perfluordecalin (C₁₀F₁₈). Die ebenfalls gemäß den 2006 IPCC Guidelines berichtspflichtigen HFKW-245fa und HFKW-365mfc sind in der deutschen Berichterstattung seit dem Anfang enthalten gewesen und wurden bereits in der Vergangenheit freiwillig berichtet.

Tabelle 1: Emissionen fluoriertter Treibhausgase [t] 1995-2020

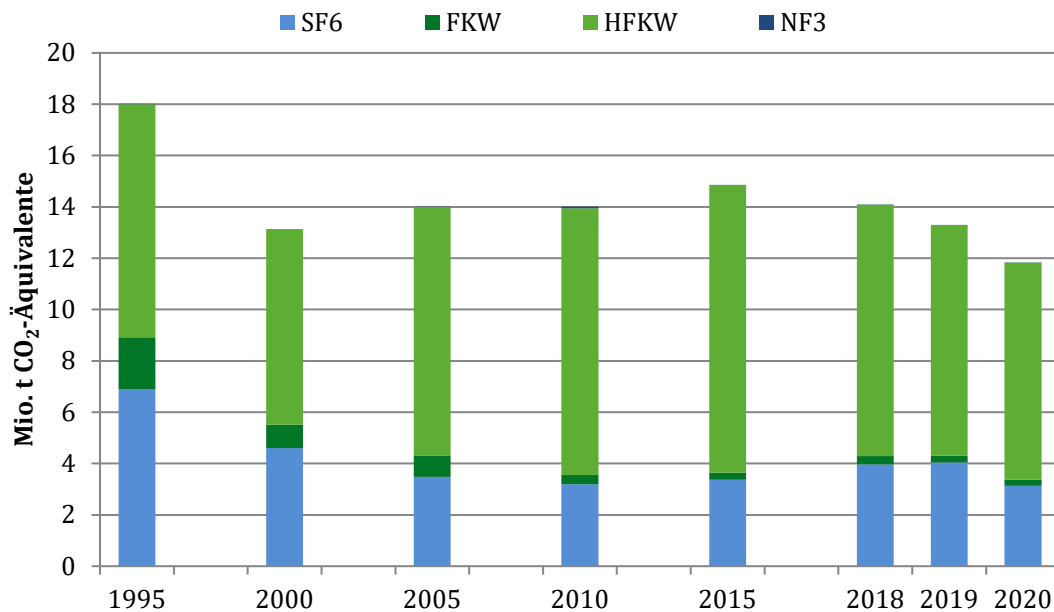
	1995	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
HFKW	3.111	4.076	5.699	5.825	6.414	5.734	5.300	5.117
FKW	255	106	96	42	32	37	31	28
SF ₆	308	209	159	145	151	174	178	135
NF ₃	0	0	1	4	1	1	1	1
Insgesamt	3.674	4.391	5.955	6.016	6.597	5.946	5.509	5.281

Tabelle 2: Emissionen fluoriertter Treibhausgase [Mio. t CO₂-Äquivalente] 1995-2020

	1995	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
HFKW	9,03	7,53	9,65	10,41	11,35	10,01	9,23	8,76
FKW	2,04	0,91	0,81	0,36	0,27	0,31	0,26	0,24
SF ₆	7,03	4,76	3,61	3,31	3,44	3,97	4,06	3,09
NF ₃	0,00	0,00	0,02	0,06	0,01	0,01	0,01	0,01
Insgesamt	18,10	13,20	14,09	14,14	15,01	14,31	13,56	12,09

Wie Tabelle 2 und Abbildung 1 zeigen, bewegen sich die klimawirksamen Emissionen von F-Gasen seit 2000 auf relativ konstantem Niveau (ca. 13 Mio. - 15 Mio. t CO₂-Äquivalente). In der zweiten Hälfte der 1990er Jahre waren die Emissionen um über 2 Mio. t CO₂-Äquivalente bzw. um 15 % höher. Das lag vor allem an den hohen Emissionen aus SF₆-befüllten Autoreifen. Seit dem Rückgang bzw. dem Verbot dieser Anwendung sind HFKW die größte Stoffgruppe der Emissionen von F-Gasen.

Abbildung 1: Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland [Mio. t CO₂-Äquivalente] 1995-2020



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Die zu knapp 71 % an allen klimawirksamen F-Gas-Emissionen beteiligten **HFKW** sind 2020 sehr deutlich um 1,5 Mio. t CO₂-Äquivalente gesunken. Dieser Effekt lässt sich durch zunehmende Anteile natürlicher Kältemittel in der Supermarktkälte sowie der Abnahme der Emissionen aus Pkw-Klimaanlagen erklären. Letztere betrugen 0,397 Mio. t CO₂-Äquivalente weniger als im Jahr 2018, was durch den Anstieg des Einsatzes von R1234yf als Ersatz für HFKW-134a bedingt ist. Auch HFKW-Emissionen von Treibmitteln bei der Produktion von Dämmschaum sind gesunken.

Im Jahr 2017 war zum ersten Mal ein Rückgang der HFKW-Emissionen in metrischen Tonnen zu verzeichnen. Seitdem hat sich die Entwicklung, besonders in den letzten beiden Jahren, deutlich fortgesetzt. Die Regelungen der EU F-Gase-Verordnung⁵, die neben einem HFKW-Phase-down und Verboten von bestimmten Stoffen auch regelmäßige Dichtheitskontrollen sowie Rückgewinnung durch zertifiziertes Personal vorschreiben, zeigen deutliche Auswirkungen.

Die Emissionen von **FKW**, die seit 1995 stark gesunken sind, nahmen in der Elektronikindustrie im Jahr 2020 deutlich von 20 t (2018) auf 17 t (von 0,21 auf 0,17 Mio. t CO₂-Äquivalente) ab. Der erstmals 2013 berichtete Stoff Perfluorodecalin ist mengenmäßig von geringer Bedeutung. Er findet überwiegend in medizinischen Produkten Anwendung.

Die Emissionen von **SF₆** stiegen seit der globalen Wirtschaftskrise im Jahr 2009 wieder kontinuierlich an, im Jahr 2020 allerdings gab es erstmals einen deutlichen Rückgang von über 40 t gegenüber dem Vorjahr. Die Krise im Jahr 2009 hatte zu einem deutlichen Einbruch in der Magnesiumproduktion und der Herstellung photovoltaischer Zellen geführt und damit zu einem Minderverbrauch von SF₆ als Schutzgas bzw. als Reinigungsgas für siliziumbeschichtete

⁵ Verordnung (EU) Nr. 517/2015 vom 16. April 2015 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006 (F-Gase-Verordnung, F-GaseV).

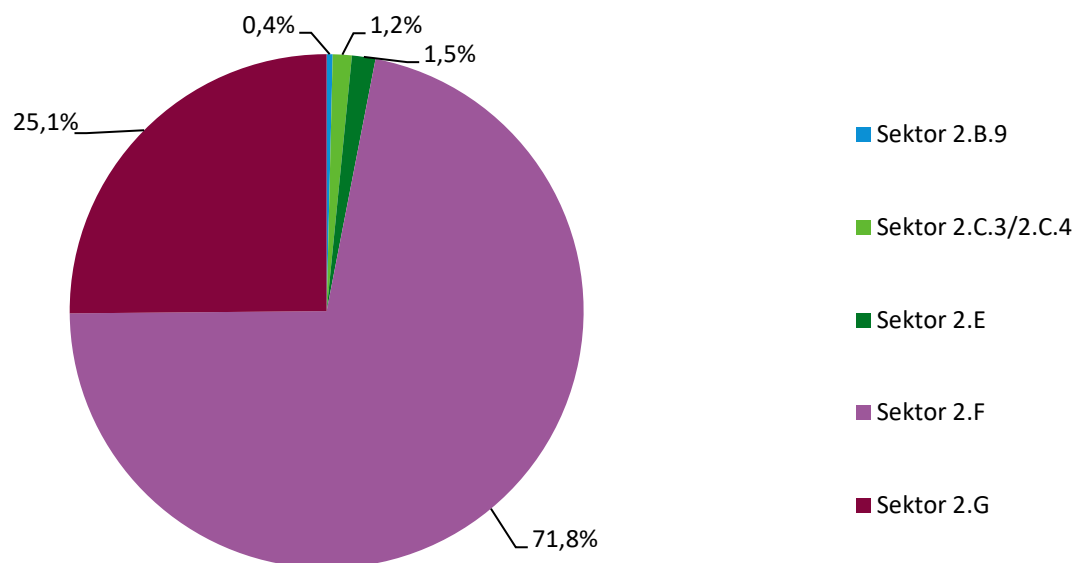
Dünnschicht-Solarzellen. Der Anstieg der SF₆-Emissionen der letzten Jahre ist vor allem durch die Entsorgung alter Schallschutzscheiben (Kapitel 1.6.2.3) zu erklären; ebenso nun der Rückgang in diesem Bereich.

Emissionen von NF₃ bilden 0,1 % der gesamten klimawirksamen F-Gas Emissionen. Sie stammen aus der Halbleiter- und der Photovoltaikindustrie. Seit 1995 schwanken sie zwischen 1 t und 4 t. Ihren Höchststand von fast 4 t bzw. 0,061 Mio. t CO₂-Äquivalenten erreichten sie im Jahr 2010. Seit 2011 sinken sie wieder und lagen 2014 bei knapp über 1 t bzw. 0,020 Mio. t CO₂-Äquivalenten. Im Jahr 2020 lagen die Emissionen bei 0,11 Mio. t CO₂-Äquivalenten.

Abbildung 2 zeigt die Anteile der klimawirksamen F-Gas-Emissionen basierend auf der Strukturierung des Nationalen Inventarberichts (NIR). Wie in der Zusammenfassung bereits erläutert, werden in diesem alle Treibhausgase umfassenden Bericht die fluorierten Treibhausgase in den Sektor-Abschnitten 2.B, 2.C, 2.E, 2.F, 2.G und 2.H behandelt. Dabei enthalten die Abschnitte Informationen zu den folgenden Anwendungsbereichen von F-Gasen:

- ▶ Sektor 2.B (2.B.9): Chemische Industrie - Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF₆
- ▶ Sektor 2.C (2.C.3 und 2.C.4): Metallproduktion - Aluminium- und Magnesiumproduktion
- ▶ Sektor 2.E: Elektronik-Industrie
- ▶ Sektor 2.F: Anwendungen als ODS-Ersatzstoff
- ▶ Sektor 2.G: Sonstige Produktherstellung und -verwendung
- ▶ Sektor 2.H: (2.H.3): Andere Produktionen – Andere Bereiche (in Abbildung 2 in den jeweiligen Kategorien subsumiert)

Abbildung 2: Anteile der klimawirksamen F-Gas-Emissionen bezogen auf CO₂-Äquivalente nach Sektoren in Deutschland 2020 (%)



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Abbildung 2 zeigt deutlich, dass die Emissionen der F-Gase, welche als ODS-Ersatz eingesetzt werden und somit Sektor 2.F zuzuordnen sind, mit 71 % bei weitem den größten Anteil an den Gesamtemissionen haben. Für etwa ein Viertel aller F-Gas-Emissionen sind die Anwendungsbereiche aus Sektor 2.G verantwortlich. Alle Sektoren und Subsektoren werden im Folgenden ausführlich erläutert.

1.1 Implementierung des 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

Die Implementierung des *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*⁶ stellt in diesem Bericht eine der Inventarverbesserungen dar. Da sie alle Sektoren betreffen, findet an dieser Stelle nur eine Kurzdarstellung statt. Die jeweiligen Änderungen werden in den entsprechenden Kapiteln der Sektoren ausführlich behandelt.

Die Entscheidung zur Überarbeitung der *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* wurde auf der 44. Sitzung des IPCC in im Oktober 2016 in Bangkok, Thailand, getroffen und abgestimmt. Der neue Methodenbericht zur Verbesserung lag dabei in den Händen der *Task Force on National Greenhouse Gas Inventories (TFI)*.

Der Bericht „*2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*“ (im Folgenden: *2019 Refinement*) wurde im Mai 2019 auf der 49. Sitzung des IPCC in Kyoto, Japan, vorgestellt und verabschiedet.

Er stellt keine Revision der *2006 IPCC Guidelines* dar, sondern enthält Aktualisierungen und schließt Lücken derselben. Das übergeordnete Ziel ist eine aktualisierte wissenschaftliche Grundlage für die Unterstützung der Vorbereitung von Inventarerhebungen und eine kontinuierliche Verbesserung der nationalen Treibhausgasinventare.

Im Bereich der F-Gase enthält das *2019 Refinement* Änderungen in den folgenden Bereichen (s. Tabelle 3):

Tabelle 3: Übersicht der Änderungen des 2019 Refinement nach Sektoren und Subsektoren

Sektor	Sub-Sektor	Substanzen
Chemische Industrie: Produktion von F-Gasen (2.B.9)	HFKW-23 Emissionen aus der Produktion von HFKW-22 (2.B.9.a) Emissionen aus der Produktion von fluorierten Stoffen (außer HFKW-23) (2.B.9.b)	HFKW, SF ₆
Metallproduktion (2.C)	Aluminiumproduktion (2.C.3) Produktion Seltener Erden	CF ₄ , C ₂ F ₆ FKW
Elektronik-Industrie (2.E)	Halbleiter- und Platinenproduktion (2.E.1) Photovoltaik (2.E.3) Wärmeüberträger (2.E.4)	SF ₆ , FKW, NF ₃
Anwendungen als ODS-Ersatzstoffe (2.F)	Kälte- und Klimaanlage (2.F.1)	HFKW, FKW
Sonstige Produktherstellung und - verwendung (2.G)	AWACS, Teilchenbeschleuniger, Adiabatische Anwendungen, Isolierglasfenster, Spurengas, Wärmeüberträger, medizinische und kosmetische Anwendungen (2.G.2 a-e)	SF ₆ , FKW

⁶ IPCC 2019: *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). Published: IPCC, Switzerland. Unter: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>.

1.2 Chemische Industrie: Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF₆ (2.B.9)

In der Chemischen Industrie werden Emissionen fluorierter Treibhausgase bei der Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF₆ freigesetzt.

Tabelle 4: Emissionen bei der Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF₆ [t] 1995-2020

	1995	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
HFKW (134a, 227ea, 23)	365,0	127,6	75,4	29,6	22,5	20,5	17,5	14,9
SF ₆	7,0	9,0	10,0	3,8	0,057	0,044	0,046	0,039
Insgesamt	372,0	136,6	85,4	33,4	22,6	20,5	17,5	14,9

Tabelle 5: Emissionen bei der Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF₆ [Mio. t CO₂-Äquivalente] 1995-2020

	1995	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
HFKW (134a, 227ea, 23)	5.335,2	1.521,5	630,0	203,7	58,4	52,9	47,3	44,7
SF ₆	159,6	205,2	228,0	86,3	1,3	1,0	1,1	0,9
Insgesamt	5494,8	1726,7	858,0	290,0	59,7	53,9	48,4	45,6

1.2.1 Nebenproduktemissionen (2.B.9.a)

HFKW-23

Seit der Stilllegung einer der beiden Produktionsanlagen für den HFCKW-22 im Jahr 2010 sind nur noch geringe Nebenproduktemissionen des HFKW-23 zu berichten. Die noch in Betrieb befindliche zweite Anlage ist direkt mit einer thermischen Spaltanlage verrohrt, welche einen hohen Wirkungsgrad aufweist. Im Jahr 2019 wurden die für diesen Sektor getroffenen Annahmen unter Einbeziehung von Industrievertretern überprüft. Seit 2011 wird ein Zwangsanfall von 0,03 kg HFKW-23 je produziertem kg HFCKW-22 angenommen, womit der Emissionsfaktor bei 0,015 kg je kg HFCKW-22 liegt. Zwar ist die Menge des Zwangsanfalls von HFKW-23 mittlerweile niedriger, da aber ein Anstieg für die Zukunft nicht ausgeschlossen werden kann, erfolgt keine Änderung des Emissionsfaktors.

1.2.2 Herstellungsbedingte Emissionen (2.B.9.b)

HFKW

Die Emissionen aus der Herstellung von HFKW-227ea haben sich gegenüber 2015 unwesentlich verändert. Allerdings ist die Produktion von HFKW-134a deutlich zurückgegangen. Grund ist die abnehmende Nachfrage bedingt durch die Maßnahmen der F-Gase Verordnung.

SF₆

Bei SF₆ hat aufgrund von Gesprächen mit Industrievertretern 2020 eine Rekalkulation des Emissionsfaktors von 2019 bis 2014 stattgefunden. Die entstehenden Emissionen sind durch die Installation eines Plasmabrenners zur Reinigung der Abluft stark gesunken.

1.2.3 2019 Refinement

Für die Kategorie **2.B.9 Produktion von F-Gasen** wird bisher nach „Nebenproduktemissionen“ (2.B.9.a) und Produktionsemissionen („fugitive emissions“, 2.B.9.b) unterteilt. Folgende, genauere Unterscheidungen nach Herkunft der Emissionen sind nach dem *2019 Refinement* zu treffen:

- ▶ 2.B.9.a HFCKW-22 Produktion
- ▶ 2.B.9.b HFKW Produktion
- ▶ 2.B.9.c FKW Produktion
- ▶ 2.B.9.d SF₆ Produktion
- ▶ 2.B.9.e NF₃ Produktion
- ▶ 2.B.9.f Fluorpolymer Produktion
- ▶ 2.B.9.g Andere Fluorchemische Produktion

In Deutschland werden HFKW und SF₆ hergestellt. Die Emissions- und Produktionsdaten unterliegen der Vertraulichkeit. Für die Aktivitätsdaten werden sowohl die Daten des Statistischen Bundesamtes, welches Angaben zu allen in Deutschland produzierten F-Gasen erhebt, als auch der herstellenden Unternehmen verwendet. Außerdem fallen, wie in Kapitel 1.2.1 erläutert, herstellungsbedingte Emissionen bei der Produktion von HFCKW-22 an.

Anders stellt sich die Lage bei der Herstellung von Fluorpolymeren dar. Es sind generell nur wenige Informationen darüber verfügbar, wo fluoriierte Polymere hergestellt werden, weder weltweit noch für Europa. Der Großteil der bestehenden Produktionsstätten für fluoriierte Polymere befindet sich in Asien, aber eine Reihe von Produktionsstätten haben ihre Standorte in Europa.

Das European Pollutant Release and Transfer Register (E-PRTR) der EU-Industrieemissionsrichtlinie (IED) verlangt keine Meldung von Emissionen an Produktions-/Fertigungsstandorten für fluoriierte Polymere. Wie bereits oben erwähnt werden aber Nebenproduktemissionen, insbesondere von Trifluormethan (HFKW-23), aus der Herstellung von Chlordifluormethan (HFCKW-22), das für die Herstellung von Fluorpolymeren verwendet wird, sowie diffuse Emissionen aus der Produktion von Fluorchemikalien unter der Inventarerhebung von Treibhausgasemissionen gemeldet (CRF-Kategorien 2.B.9.a).

Ein grundsätzliches Problem bei der Herstellung von Fluorpolymeren stellt die Vielzahl der Prozesse dar, die zum Einsatz kommen, sowie die hierzu verwendeten sog. „production aids“, also Hilfsstoffe, welche zur Synthese notwendig sind. Weder sind alle Prozesse noch die benötigten Stoffe, inklusive ihres GWP bereits beschrieben. Dies bedeutet auch, dass keine genauen Informationen zu Emissionen vorliegen.⁷

⁷ Siehe auch: EEA (2021, Veröffentlichung ausstehend): A systemic view on fluorinated polymers and plastics in a low carbon, circular and non-toxic economy.

Obwohl die Produktion von Fluorpolymeren hinsichtlich der produzierten Menge nicht zu vernachlässigen ist, können aufgrund der Datenlage keine Schätzungen abgegeben werden. Der Sektor sollte jedoch weiter beobachtet und bei verbesserter Informationslage in die Emissionsberichterstattung miteinbezogen werden.

Da die anderen Kategorien 2.B.9.a-2.B.9.e umfassend erfasst sind, besteht hier für die deutsche Berichterstattung kein Änderungsbedarf.

1.3 Metallproduktion (2.C)

In der Metallproduktion treten F-Gas-Emissionen beim Aluminiumguss (2.C.3.b), bei der Herstellung von Primäraluminium (2.C.3.a) und beim Magnesiumguss (2.C.4) auf.

Tabelle 6: Emissionen aus der Metallproduktion [t] 1995-2020

	1995	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Primäraluminiumproduktion								
FKW: CF ₄ , C ₂ F ₆	230,0	52,8	50,0	19,8	12,0	15,9	11,9	10,4
Magnesiumproduktion								
HFKW- 134a	-	-	0,6	8,3	16,8	12,8	7,3	5,8
Magnesium- und Aluminiumgießereien								
SF ₆	7,7	13,8	30,5	6,5	2,9	3,2	2,2	2,3
Insgesamt	237,8	66,6	81,1	34,6	31,7	31,9	21,4	18,5

Tabelle 7: Emissionen aus der Metallproduktion [kt CO₂-Äquivalente] 1995-2020

	1995	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Primäraluminiumproduktion								
FKW: CF ₄ , C ₂ F ₆	1.800,7	413,3	391,9	156,8	94,9	126,0	96,5	85,0
Magnesiumproduktion								
HFKW- 134a	-	-	0,9	11,8	24,0	18,3	10,4	8,3
Magnesium- und Aluminiumgießereien								
SF ₆	176,9	315,0	694,7	148,2	65,4	73,0	50,1	51,6
Insgesamt	1.977,6	728,3	1.087,3	316,8	184,3	217,3	157	144,9

1.3.1 Aluminiumproduktion (2.C.3)

FKW

Die Hersteller von Primäraluminium hatten 1997 eine Selbstverpflichtung abgeschlossen, welche die Senkung der Emissionen unter die des Ausgangsjahrs 1995 vorsah. Das Ziel war bald erreicht, weil in den fünf deutschen Hütten durch Modernisierung der Ofendosierung (Zufuhr von Tonerde in die Schmelze) die spezifischen FKW-Emissionen pro Tonne Aluminium gesenkt werden konnten. Obwohl die Produktionskapazität bis 2005 konstant gehalten wurde, gingen die FKW-Emissionen in diesem Zeitraum von 230 t (1995) auf 50 t im Jahr 2005 zurück.

Seit 2007 sind noch vier Hütten in Betrieb, die 2007 ca. 550.000 t Primäraluminium erzeugten. Die FKW-Emissionen erreichten damals einen Tiefstand von 29 t. Seitdem gingen die Emissionen von CF₄ und C₂F₆ noch weiter zurück. Im Jahr 2020 fand erneut ein Rückgang statt und die Emissionen betrugen 10,4 t.

SF₆

Ein Großverbraucher von SF₆ ist die Aluminiumindustrie, und zwar nicht für die Herstellung von Primäraluminium, sondern in der Produktion einer bestimmten Aluminiumlegierung für die Automobilindustrie. SF₆ wird hier nicht als Schutzgas eingesetzt, sondern wird als Entgasungsmittel unverdünnt durch die heiße Schmelze geleitet, um Verunreinigungen, insbesondere Wasserstoff, daraus zu entfernen. Seit 1998 wurden zur Produktion von Aluminiumlegierungen wachsende SF₆-Mengen eingesetzt, obwohl dieses Gas zugunsten von Inertgasen wie Argon aus der Anwendung in Deutschland bereits verschwunden war. Die Einsatzmenge sank seit dem Jahr 2008 und ist auch im Jahr 2020 weiter gesunken.

Da die IPCC-Richtlinien keinen Emissionsfaktor für diese Anwendung enthalten, wurden bis vor einigen Jahren Einsatzmengen und Emissionen gleichgesetzt. Abgasmessungen zeigten allerdings eine 97- bis 99-prozentige chemische Zersetzung von SF₆ in der ca. 700 °C heißen Schmelze, so dass der Emissionsfaktor von 100 % auf 3 % (bis 2008) und, nach Verbesserung des Verfahrens, ab 2009 auf 1,5 % gesenkt werden konnte. Im Jahr 2010 wurden daher rückwirkend für alle Einsatzjahre seit 1998 die Emissionen neu berechnet.

1.3.2 Magnesiumproduktion (2.C.4)

HFKW

Eine Abnahme der Verwendung des HFKW-134a war in der Magnesiumindustrie zu verzeichnen (von 36 t auf 25 t). Der Einsatz von HFKW-134a in dieser Branche ist politisch gewollt, weil er das extrem klimaschädigende Schutzgas SF₆ (GWP 22.800) ersetzt, das in Druckguss-Betrieben mit jährlichem Schutzgasverbrauch > 850 kg seit 1.1.2008 bereits durch die alte EU F-Gase-Verordnung (Verordnung (EG) Nr. 842/2006) verboten worden war. Die aktuelle EU F-Gase-Verordnung (Verordnung (EU) Nr. 517/2014) schreibt den Ausstieg aus SF₆ ab 2020 auch für alle anderen Druckgießereien vor.

Die 2006 IPCC Guidelines enthalten keine Aussagen zum Emissionsfaktor für die Verwendung des HFKW-134a. Daher wurde bisher ein Emissionsfaktor von 100 % angenommen. Ab dem Berichtsjahr 2018 wurde der Emissionsfaktor rückwirkend für die gesamte Zeitreihe auf 50 % gesetzt. Genauere Informationen hierzu finden sich in Warncke et al 2021⁸.

SF₆

Die alte EU F-Gase-Verordnung von 2006 hatte ab dem 1.1.2008 die Anwendung von SF₆ als Schutzgas in Magnesium-Druckgießereien mit mehr als 850 kg SF₆-Jahresverbrauch verboten. Die vom Verbot betroffenen fünf deutschen Betriebe haben auf den HFKW-134a umgestellt, der, gemessen an SF₆, als klimaschonendere Alternative gilt. Ab März 2008 setzten nur noch kleinere Druckgießereien mit jährlichem Schutzgasverbrauch unter 850 kg SF₆ ein; außerdem eine Sandgießerei und eine Recyclinganlage, die beide nicht unter das Verbot fallen. Der Gesamtverbrauch von SF₆ ist gesunken. Für die Druckgießereien gilt gemäß der aktuellen EU F-Gase-Verordnung ein allgemeines SF₆-Verbot ab 1.1.2018. SF₆ findet daher nur noch in

⁸ Warncke, K.; Gschrey, B.; Osterheld, S. (2021): Emissionen fluorierte Treibhausgase in Deutschland 2017/2018. Daten von HF(C)KW, FKW, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE und PFPME für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für die Berichtsjahre 2017 und 2018. Kapitel 2.1.

Sandgießereien Verwendung. Genauere Informationen zum Umstieg befinden sich im Inventarbericht von 2016⁹.

1.3.3 2019 Refinement

Für die **Aluminiumproduktion**, die in Kategorie **2.C.3** berichtet wird, enthält das *2019 Refinement* zahlreiche Erweiterungen:

1. Aktualisierung der Technologie-Klassen.
2. Die Unterscheidung zwischen dem High-Voltage Anode Effect (HVAE) und Low-Voltage Anode Effect (LVAE).
3. Neue Leitlinien, welche FKW-Emissionen beim Hochfahren der sogenannten „Zellen“ miteinbeziehen (cell start-up – CSU).
4. Umsetzung der Updates in der Emissionsberechnung.

Auf die einzelnen Änderungen wird im Folgenden eingegangen:

1. Technologie-Klassen

Die in den *2006 IPCC Guidelines* vorgestellten Technologie-Klassen, die unterschiedliche Zellkonfigurationen - und Größen sowie genutzte Stromstärken und Prozesstypen beinhalten, sind erweitert worden. Auf die Änderungen soll hier im Einzelnen nicht eingegangen werden, da die in Deutschland an das UBA berichtenden Unternehmen diese automatisch miteinbeziehen und FKW-Emissionen dementsprechend melden.

2. HVAE und LVAE

Hierbei geht es um folgendes Phänomen: Die Aluminiumproduktion findet in Zellen als Reduktionsreaktion statt, der Aluminium-Schmelzflußelektrolyse. Aluminiumoxid und Kryolith werden mit Hilfe von elektrischem Strom, der zwischen Anodenblöcken und dem mit Graphit bedeckten Reduziergefäß fließt, in flüssiges Aluminium und Sauerstoff zerlegt. Im Falle eines lokalen Mangels an Oxidionen findet der Anodeneffekt statt, dabei steigt die Spannung in der Zelle über das gewünschte Niveau an, und es kommt zur Zersetzung des Kryoliths und zur Bildung von FKW. Obwohl der Effekt regelmäßig auftritt, ist er in der Produktion absolut unerwünscht, da er zu hohen Energieverlusten führt.

Die Spannung wird während des Prozesses über die gesamte Zelle gemessen und beträgt im Normalbetrieb ca. 4,5 V. Steigt die Spannung in der Zelle sprunghaft auf über 8 V an, spricht man vom HVAE. Diesem wird durch Zugabe von Oxid entgegengewirkt. Dennoch entstehen durch den Anodeneffekt regelrechte FKW-Blasen in der Schmelze, die entfernt werden müssen. Früher wurde dies durch Verbrennung umgesetzt, wobei lange Holzstäbe zur Anwendung kamen. Heutzutage gibt es die sog. „Slotted anodes“, welche Schlitzte aufweisen, durch die die entstandenen FKW entweichen können.

In Deutschland gibt es aufgrund des frühen Einstiegs in die Produktion eher ältere Hütten, die bei der Herstellung mit Stromstärken von ca. 185 kA arbeiten. Hier sind auch die Zellen kleiner. Es gilt, je größer die Stromstärke, desto größer die Zellen. Neue Hütten, wie sie in großer Anzahl vor allem in China gebaut wurden, haben hohe Stromstärken zwischen 300 kA und größer bis 500 kA. Da die Zellen in diesem Fall größere Dimensionen aufweisen, kann es, obwohl die Gesamtspannung der Zelle unter 8 V liegt, innerhalb dieser zu Spannungsspitzen, sprich

⁹ Warncke, K.; Gschrey, B.; Schwarz, W. (2017): Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland 2016. Daten von HF(C)KW, FKW, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE und PFPME für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für das Berichtsjahr 2016. Kapitel 2.2.

Anodeneffekten, kommen, die aber durch die Messtechnik, welche nur die Spannung der gesamten Zelle misst, nicht detektiert werden kann. Dies wird als sog. LVAE bezeichnet.

Da in Deutschland keine Hütte mit derart hohen Stromstärken arbeitet, ist die Unterscheidung der beiden Effekte für die deutsche Berichterstattung nicht relevant.

3. FKW-Emissionen beim CSU

Beim Hochfahren der Zellen, noch vor eigentlichem Betriebsbeginn, können, wie im normalen Betrieb, HVAE auftreten. Auch hierbei entstehen FKW-Emissionen. Es ist *good practice*, diese Emissionen zu berücksichtigen. Die an das UBA berichtenden Unternehmen beziehen diese bereits mit ein und melden die FKW-Emissionen dementsprechend.

4. Umsetzung der Updates in der Emissionsberechnung

Der 2019 *Refinement*-Bericht beschreibt weiterhin genaue Vorgehensweisen zur Berechnung der Emissionen unter Einbeziehung der neuen Erkenntnisse. Für die deutsche Berichterstattung ergeben sich keine Änderungen, daher muss an dieser Stelle nicht hierauf eingegangen werden.

Für die Produktion von Sekundäraluminium werden die genutzten SF₆-Mengen durch das Statistische Bundesamt erhoben, hier sind keine methodischen Änderungen nötig.

Produktion von Seltenen Erden

Im Kapitel 4.8 des 2019 *Refinement*-Berichts wird die **Produktion von Seltenen Erden** neu eingeführt. Seltene Erden spielen vor allem bei der Produktion von diversen Hightech-Produkten¹⁰ eine wichtige Rolle und werden von den Förderländern (vorrangig China, aber auch Südamerika, Afrika) weltweit exportiert. Es handelt sich um eine Gruppe von 17 Elementen, nämlich Scandium, Lanthan, Cer, Praseodym, Neodym, Promethium, Samarium, Europium, Yttrium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium, Lutetium. Keines der Seltenen-Erden-Metalle kommt in der Natur rein vor, sondern es liegt immer eine Mischung der Seltenen Erden vor.

Die reinen Metalle werden überwiegend durch Schmelzflusselektrolyse gewonnen. Vorher müssen die entsprechenden Verbindungen jedoch aus den Erzen, die neben anderen Verbindungen immer Gemische der Seltenen Erden enthalten, über zum Teil aufwendige Trennverfahren separiert werden. Dabei werden FKW in Spülvorgängen eingesetzt, und es kommt zu FKW-Emissionen (CF₄, C₃F₆, C₃F₈).

In Deutschland spielt die Produktion Seltener Erden keine große Rolle, da die bekannten, vergleichsweise geringen Vorkommen nicht mehr ausgebeutet werden. Allerdings wurde in den 1970er-Jahren im Zuge von Uranbohrungen zu DDR-Zeiten in Sachsen ein Vorkommen entdeckt, das damals auf rund 136.000 Tonnen geschätzt wurde. Nach Probebohrungen im Jahr 2012 ging man von etwa 20.000 Tonnen Erzen mit Seltenen Erden aus. Ab 2012 wurde durch das Unternehmen Seltenerden Storkwitz AG der Abbau der Lagerstätte Storkwitz (Ortsteil von Delitzsch) betrieben. Doch da der Gehalt an den gesuchten Metallen im Erz bei weniger als einem halben Prozent liegt, wurde die Förderung bald wiedereingestellt. Die Seltenerden Storkwitz AG gab 2015 die Abbaulizenz zurück¹¹.

Gespräche mit Experten, unter anderem der Bergakademie Freiberg, bestätigen, dass der Abbau nur zu wissenschaftlichen Zwecken stattfand, wobei es sich um Kleinstmengen handelte.

¹⁰ Zum Beispiel Permanentmagnete, GPS-Empfänger, Plasmabildschirme, LEDs, Akkus etc.

¹¹ <https://www.br.de/wissen/seltene-erden-metalle-smartphones-china-100.html>.

Dementsprechend fanden und finden keine relevanten Emissionen statt. Eine Anpassung der deutschen Berichterstattung ist daher nicht nötig.

1.4 Elektronik-Industrie (2.E)

Die Elektronik-Industrie umfasst innerhalb der nationalen Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention (UNFCCC) die Bereiche Halbleiter- und Platinenproduktion (2.E.1), TFT (2.E.2), Photovoltaik (2.E.3) und Wärmeüberträger (2.E.4). In Deutschland gibt es – wie in ganz Europa – keine Produktion von Flachbildschirmen (TFT). Auch der Bereich der auf Silizium-Dünnschichttechnologie beruhenden Photovoltaik (PV) ist mittlerweile in Deutschland bedeutungslos, da dieser Industriezweig ab 2010 in eine Krise geriet, die im Jahr 2014 zur Einstellung der gesamten Produktion in Deutschland führte.

In der Elektronik-Industrie werden nicht nur HFKW und FKW, sondern auch SF₆ und NF₃ verwendet (siehe Tabelle 8 und Tabelle 9).

Tabelle 8: Emissionen in der Elektronik-Industrie [t] 1995-2020

	1995	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Halbleiter- und Platinenproduktion								
HFKW-23	0,8	1,1	1,1	0,8	0,96	1,0	0,99	0,95
FKW: CF ₄ , C ₂ F ₆ , C ₃ F ₈ , c-C ₄ F ₈	20,4	37,3	27,2	16,2	15,6	17,52	15,32	14,35
SF ₆	0,8	1,1	1,1	0,8	0,9	1,2	1,0	1,2
NF ₃	0,1	0,2	0,9	0,5	0,7	0,68	0,64	0,63
Photovoltaik								
FKW: CF ₄	-	-	0,31	0,03	-	-	-	-
SF ₆	-	-	0,9	2,3	-	-	-	-
NF ₃	-	-	-	3,1	-	-	-	-
Insgesamt	23,48	41,13	33,61	23,6	18,13	20,40	17,95	17,13

Tabelle 9: Emissionen in der Elektronik-Industrie [kt CO₂-Äquivalente] 1995-2020

	1995	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Halbleiter- und Platinenproduktion								
HFKW-23	12,4	16,9	15,8	11,8	14,2	15,2	14,7	14,0
FKW: CF ₄ , C ₂ F ₆ , C ₃ F ₈ , C ₄ F ₈	191,56	347,46	250,46	148,36	141,16	158,50	136,98	126,59
SF ₆	19,1	26,0	24,3	18,2	21,9	27,15	23,35	27,17
NF ₃	2,5	4,1	16,0	7,8	11,9	11,75	10,96	10,80
Photovoltaik								
FKW: CF ₄	-	-	2,3	0,2	-	-	-	-
SF ₆	-	-	19,5	52,3	-	-	-	-
NF ₃	-	-	-	53,7	-	-	-	-
Insgesamt	297,60	424,81	378,71	291,24	183,86	212,65	185,99	178,56

1.4.1 Halbleiter- und Platinenproduktion (2.E.1)

In der Halbleiterproduktion müssen nach der plasmaunterstützten Beschichtung von Silizium auf ein Substrat (Wafer) in sogenannten CVD-Kammern („chemical vapour deposition“) diese sowie die Warenträger von überschüssigem Silizium befreit werden. Diesen Zweck erfüllt das hochreaktive Fluor, das sich von fluorierten Gasen wie NF₃, SF₆, CF₄ oder C₂F₆ abspaltet und mit Silizium verbindet. Zurzeit werden dafür außer NF₃ mindestens sechs weitere fluorierte Gase benutzt. Zudem wird mit diesen fluorierten Stoffen das sogenannte Strukturätzen durchgeführt, welches aber eine kleinere Rolle spielt.

Im Rahmen der Selbstverpflichtung der Halbleiterhersteller mit Produktionsstätten in der Bundesrepublik Deutschland von 2001 und in der nachfolgenden Vereinbarung mit dem Umweltbundesamt werden vom Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e.V. (ZVEI) jährlich die Emissionen aller berichtspflichtigen F-Gase bei seinen Mitgliedsfirmen erhoben (Repräsentationsgrad nach Auskunft des Fachverbands Electronic Components and Systems im ZVEI: 95 %) und in absolute Emissionen umgerechnet. Deren Zeitreihe liegt ab 1995 vor. Die Jahre 1990 bis 1994 sind in einer Öko-Recherche-Studie für das Umweltbundesamt aus dem Jahr 1996¹² enthalten.

In der Platinenfertigung gibt es Anlagen zur Bohrlochreinigung, die mit CF₄ arbeiten. Dieser Anwendungsbereich unterliegt kaum Veränderungen, wie eine wiederholte Befragung im Jahr 2019 ergab.

HFKW

Die Zahlen für den HFKW-23 wurden für die gesamte Zeitreihe korrigiert, da ein Fehler in der Grunddatei vorlag.

¹² Winfried Schwarz, André Leisewitz (1996): Aktuelle und künftige Emissionen treibhauswirksamer fluorierter Verbindungen in Deutschland, Im Auftrag des Umweltbundesamts, Forschungsbericht 106 01 074/1.

FKW

Der Selbstverpflichtung der Halbleiterhersteller zufolge konnten trotz erheblicher Produktionssteigerung die Emissionen bis 2010 um 8 % unter das Niveau des Bezugsjahres 1995 gesenkt werden. Bis 2000 stiegen die Emissionen von FKW zwar weiter an und wiesen zeitweise eine fallende Tendenz auf. Der Produktionsrückgang im Krisenjahr 2009 führte zu einer weiteren, wenn auch unfreiwilligen Senkung der Emissionen auf nur noch 13 t. Danach nahmen die Emissionen wieder zu. Im Jahr 2020 gab es allerdings eine Abnahme der Emissionen im Vergleich zu 2018 (2018: 17 t; 2020: 14 t).

In Tabelle 8 und Tabelle 9 ist neben der Halbleiterherstellung auch die Leiterplatten-Reinigung mit CF_4 eingeschlossen. In diesem speziellen Verfahren wird CF_4 zur Bohrlochreinigung eingesetzt. Die Emissionen bewegen sich seit Jahren auf einem konstanten Niveau von 2 t.

Als FKW werden nur die Stoffe CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8 und $\text{c-C}_4\text{F}_8$ berichtet. Dazu kommt C_6F_{14} (Handelsname FC-72) der nicht als Ätzgas, sondern als Wärmeüberträgerflüssigkeit in der Produktion eingesetzt wird (siehe übernächster Abschnitt).

SF_6

Die Halbleiterindustrie meldete relativ konstante Emissionen in diesem Bereich, 2020 lag dieser bei 1,2 Tonnen.

NF_3

NF_3 -Emissionen bilden gegenwärtig nur 0,003 % der Emissionen fluorierter Treibhausgase. Ihren Höchststand von 4 t bzw. 61 t CO_2 -Äquivalenten erreichten sie im Jahr 2010. Seit 2011 sanken sie wieder und lagen 2013 bei weniger als 1 t bzw. 0,016 Mio. t CO_2 -Äquivalenten. Im Jahr 2020 gab es wieder einen leichten Rückgang auf 0,011 Mio. t CO_2 -Äquivalente.

1.4.2 Photovoltaik-Industrie (2.E.3)

Bei der Herstellung von Wafern werden fluorhaltige Substanzen zum Strukturätzen und zur Reinigung von Reaktionskammern im Fertigungsprozess eingesetzt.

FKW

CF_4 wurde auch in bestimmten Verfahren der Produktion kristalliner Solarzellen zum Isolieren der Kanten verwendet. Dieses Verfahren wurde Ende 2012 eingestellt.

SF_6

Bei der sogenannten Silizium-Dünnschichttechnologie in der Herstellung photovoltaischer Zellen wurden entweder SF_6 oder NF_3 zur Reinigung der Reaktionskammern von überschüssigem Silizium eingesetzt. Dieses kostengünstige Verfahren wurde viele Jahre lang nur für kleine Serien angewendet, dann aber ab 2007 in großem Maßstab betrieben. Folglich stieg der SF_6 -Verbrauch, der bis 2006 pro Jahr rund 2 t betrug, im Jahr 2007 sprunghaft auf 25 t und 2008 auf 58 t an. Im Krisenjahr 2009 hat er sich auf etwa 24 t halbiert. Der Verbrauch ist nach vorübergehendem Wiederanstieg 2010 im Jahr 2011 auf 16 t gesunken und hat sich dann 2012 erneut halbiert. 2013 brach der Verbrauch auf 1,8 t ein, als die letzte Anlage stillgelegt wurde. Es gibt laut Erhebungen nach Umweltstatistikgesetz (UStatG) seit 2014 keinen Verbrauch mehr.

NF_3

Sowohl in der Fertigung von Halbleitern als auch von photovoltaischen Zellen wurde das Gas Stickstofftrifluorid zur Kammerreinigung genutzt. Der Unterschied zwischen Halbleiter- und PV-Industrie liegt vor allem in den Dimensionen der Kammern. Während die Wafer in der

Halbleiterindustrie Durchmesser von ca. 30 cm aufweisen, sind die Wafer in der PV-Industrie viel größer – mit Durchmessern bis zu 2,5 Metern und mehr.

NF₃ kam in der deutschen Photovoltaik-Industrie erst seit 2006 zum Einsatz. Öko-Recherche hat im Auftrag des UBA 2009 zur Solarindustrie eine Studie mit Abschätzungen zu Verbrauchsmengen und der Emissionen von NF₃ (und SF₆) erstellt¹³. Mit dem raschen Wachstum der Si-Dünnschicht-Technologie ab 2006 nahm der Verbrauch von NF₃ sprunghaft zu, zumal NF₃ seit 2008 SF₆ in allen neu gebauten Produktionslinien ersetzt hatte. Der NF₃-Jahresverbrauch stieg von 2006 bis 2008 von 2,7 t auf 30 t. Nach dem Krisenjahr 2009 ging der Anstieg zunächst weiter bis auf 78 t im Jahr 2010.

Danach wurde die deutsche PV-Industrie von einer tiefen Krise erfasst. Die Produktion von Si-Dünnschicht-Solarzellen wurde in Deutschland schrittweise eingestellt. Von den im Jahre 2009 in Deutschland aktiven sechs Herstellern mussten zwei im Jahr 2010 schließen. 2013 gaben zwei weitere Hersteller auf. Der NF₃-Jahresverbrauch betrug 2012 nur noch 37 t. Im Jahr 2015 schlossen auch die verbliebenen zwei Unternehmen.

1.4.3 Wärmeüberträger (2.E.4)

Flüssige fluoridierte Wärmeüberträger zur Kühlung von Prozessen und Geräten spielen in der Industrie, besonders der Halbleiterfertigung, eine wichtige Rolle. Die durchschnittliche Lebenszeit der Anlagen mit Wärmeüberträger in der Halbleiterindustrie beträgt 12 Jahre.

FKW

In der Halbleiterfertigung müssen die verschiedenen Prozessschritte bei klar definierten und kontrollierten Temperaturen erfolgen.

Es ist zu beachten, dass es sich bei diesen Anwendungen von fluoridierten Stoffen um geschlossene Systeme handelt, deren Leckageraten nach unserer Einschätzung bei ca. 5 % liegen.

In der Halbleiterindustrie gibt es verschiedene Typen fluoridierter Wärmeüberträger, von denen nur vollfluoridierte Kohlenwasserstoffe im engeren Sinn an das Klimasekretariat berichtspflichtig sind. Dabei handelt es sich praktisch nur um C₆F₁₄ (Fluorinert TM FC-72). Die Verwendung von C₆F₁₄ als Wärmeüberträger in der Halbleiterindustrie war in den 1990er Jahren weit verbreitet, ist aber bis 2016 komplett eingestellt worden. Gegenwärtig dominieren unter den fluoridierten Wärmeüberträgern in der Halbleiterindustrie hydrofluorierte Ether (HFE), die die perfluorierten Substanzen seit 2001 ablösen. (Die fluoridierten Ether werden bei den freiwillig zu berichtenden Treibhausgasen in Kapitel 2.3.3 behandelt.)

Bei der Deutschen Bahn wurde C₆F₁₄ (Perfluorhexan) bis vor einigen Jahren auch in Hochgeschwindigkeitszügen eingesetzt, und zwar zur Kühlung in ICE-Triebköpfen – genauer von Traktionsstromrichtern im ICE-1 und ICE-2. Dieser Stoff wurde (im Unterschied zum französischen TGV) bis 2009 vollständig gegen C₅F₁₁NO (Fluorinert FC-3284, Perfluor-N-Methylmorpholin; GWP: 9.500) ausgetauscht. Diese stickstoffhaltige vollfluoridierte Substanz unterliegt weder der nationalen Berichtspflicht unter UNFCCC noch der Unternehmensberichterstattung nach Artikel 19 der EU F-Gase-Verordnung. Keiner Berichtspflicht unterliegt auch der in der Halbleiterindustrie verwendete Stoff C₉F₂₁N (Fluorinert FC-3283, Perfluor-Tri-N-Butylamin; GWP: 8.690). Diese beiden als Wärmeüberträger

13 Winfried Schwarz (2009): SF₆ und NF₃ in der deutschen Photovoltaik-Industrie. Im Auftrag des Umweltbundesamts, Förderkennzeichen 360 16 027.

eingesetzten Stoffe zählen zu den vom Umweltbundesamt freiwillig in das F-Gas-Inventar aufgenommenen "weiteren" fluorierten Treibhausgasen (siehe Kapitel 2.6).

1.4.4 2019 Refinement

In der Kategorie **2.E Elektronikindustrie** wird im *2019 Refinement*-Bericht vor allem der technischen Weiterentwicklung Rechnung getragen. Dabei handelt es sich um eine komplette Aktualisierung des „*Chapter 6 Volume 3 of the 2006 IPCC Guidelines*“. Die Änderungen beziehen sich aber dennoch vor allem auf die Methoden der Tier 1- und Tier 2- Ansätze. Deutschland berichtet allerdings nach der Tier 3-Methode und dem sog. „*country specific*“, also länderspezifischen, Ansatz. Zudem werden, wie bereits erwähnt, im Rahmen der Selbstverpflichtung der Halbleiterhersteller mit Produktionsstätten in der Bundesrepublik Deutschland vom Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e.V. (ZVEI) jährlich die Emissionen aller berichtspflichtigen F-Gase bei seinen Mitgliedsfirmen erhoben.

1.5 Anwendungen als ODS-Ersatzstoffe (2.F)

Die Verwendung ozonschichtschädigender Substanzen (Ozone Depleting Substances, ODS) ist in Deutschland, abgesehen von geregelten Ausnahmen, nicht mehr erlaubt. Als Alternativen wurden bereits vor Jahren unter anderem F-Gase eingeführt und stellen deren wichtigstes Anwendungsgebiet dar. Allerdings sind auch diese, vor allem durch die EU F-Gase-Verordnung Nr. 517/2014, gesetzlichen Regelungen unterworfen, die ihre Verwendung einschränken oder verbieten.

HFKW

Grundsätzlich, aber nicht nur, sind HFKW Ersatzstoffe für HFCKW und schädigen nicht die Ozonschicht, aber das Klima. Sie wurden von der Chemischen Industrie als Nachfolgestoffe für ODS entwickelt und in den Markt eingeführt. Die wichtigsten Anwendungsbereiche sind Kälte- und Klimaanlage, Schaumherstellung, als Feuerlöschmittel und als Treibgas in Asthmasprays.

In Tabelle 10 sind die HFKW-Emissionen aus unterschiedlichen Anwendungen in Deutschland im Zeitraum 1995 – 2020 zusammengefasst. Die HFKW-Emissionen sind 2020 gegenüber dem Vorjahr in fast allen Bereichen gesunken. Die Reduktionen seit 2018 aus mobilen Anwendungen, insbes. aus Pkw-Klimaanlagen, betrugen 0,38 Mio. t CO₂-Äquivalente, diejenigen aus stationären Kälte- und Klimaanlage beliefen sich auf 0,63 Mio. t CO₂-Äquivalente.

Tabelle 10: HFKW-Emissionen [Mio. t CO₂-Äquivalente] 1995-2020

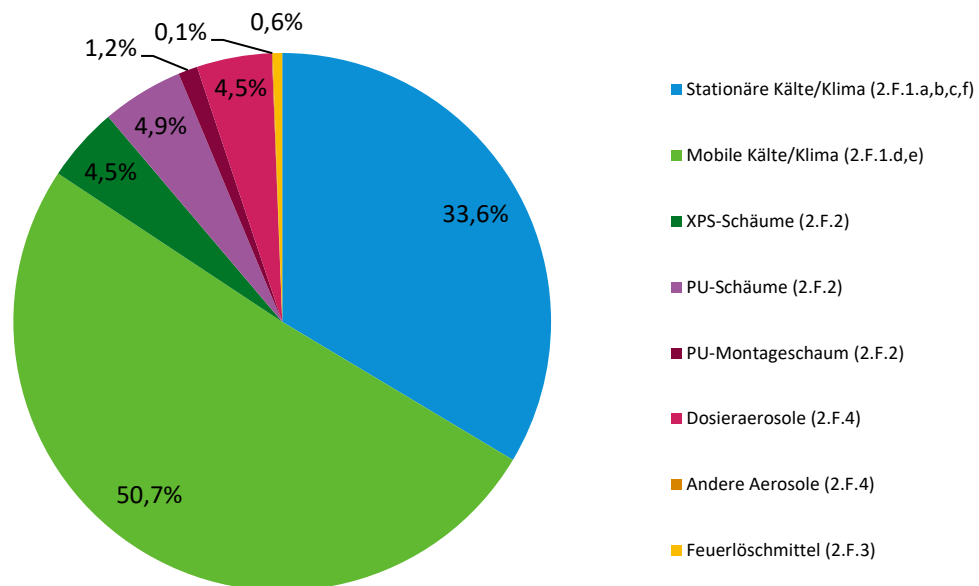
	1995	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Gesamt Stationäre Kälte/Klima	1,454	2,403	3,621	4,550	5,017	4,669	4,338	4,042
<i>Gewerbe, Industrie, Haushaltskälte</i>	1,441	2,290	3,313	3,866	3,852	3,359	3,042	2,699
<i>Zentral-AC, Raumklima, Wärmepumpen</i>	0,014	0,113	0,309	0,614	1,068	1,310	1,296	1,343
Gesamt Mobile Kälte/Klima	0,333	1,862	3,316	4,067	4,613	4,225	4,012	3,849
<i>Mobilklima Pkw</i>	0,245	1,504	2,671	3,191	3,554	3,073	2,850	2,675
XPS-Schäume	0,000	0,000	0,589	0,525	0,439	0,297	0,060	0,060
PU-Schäume	0,000	0,136	0,213	0,258	0,411	0,240	0,249	0,226
PU-Montageschaum	1,666	1,171	0,570	0,135	0,062	0,022	0,019	0,023
Dosieraerosole	0,000	0,185	0,339	0,338	0,337	0,337	0,337	0,338
Andere Aerosole	0,226	0,235	0,344	0,260	0,282	0,022	0,018	0,006
Feuerlöschmittel	0,000	0,002	0,007	0,046	0,080	0,102	0,105	0,124
Insgesamt	3,679	5,994	9,000	10,179	11,241	9,913	9,139	8,669

Abgesehen von den konstant gebliebenen Emissionen von Dosieraerosolen sind in den meisten kleineren HFKW-Sektoren, wie beispielsweise in den Sektoren Aerosole und Lösemittel, die Zahlen rückläufig. Im Bereich der XPS-Schäume steigen die Emissionen allerdings seit 2013 kontinuierlich an. Durch eine Veränderung der Datenquellen im Bereich der PU-Schäume sind

die Emissionen in diesem Sektor seit 2007 nun deutlich höher. Eine genauere Beschreibung findet sich in Kapitel 1.5.2.

Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke. zeigt die Anteile der verschiedenen Sektoren an den HFKW-Emissionen in Tonnen und verdeutlicht nicht nur grafisch den hohen Anteil der Klima- und Kälteanwendungen an allen HFKW-Emissionen, sondern im Vergleich mit den Daten der Emissionen in Mio. t CO₂-Äquivalente der Tabelle 10 auch, dass die Emissionen aus der stationären Kälte in Mio. t CO₂-Äquivalenten einen deutlich höheren Anteil an den Gesamtemissionen ausmachen, als in Tonnen. Dies lässt sich durch die verbreitete Anwendung von R404A mit seinem hohen GWP von 3.922 in der Gewerbekälte erklären.

Abbildung 3: Anteile der verschiedenen Sektoren an den HFKW-Emissionen bezogen auf Tonnen in Deutschland 2020 (%)



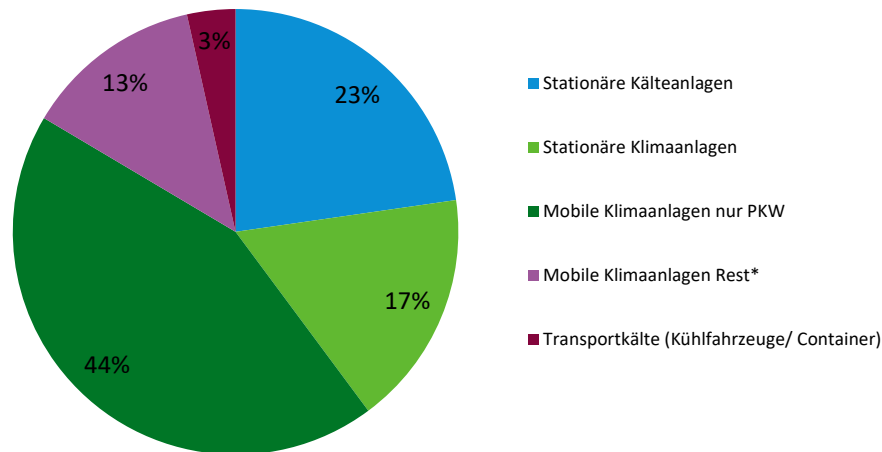
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Bisherige Projektionen zur langfristigen Entwicklung der Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland, die von einem steigenden Anstieg der HFKW-Emissionen ausgehen, sehen von politischen Maßnahmen wie der EU F-Gase-Verordnung aus dem Jahr 2014 ab. Diese Gesetzgebung zeigt mittlerweile beträchtliche Wirkung; es sind sinkende HFKW-Emissionen vor allem für den Betrieb von stationären Kälte- und Klimaanlageanlagen zu verzeichnen. Grund dafür ist, dass HFKW dem sogenannten Phase-down unterliegen, der stufenweisen Verknappung ihres Angebots zugunsten umfassender Einführung von HFKW-freien Substanzen und Verfahren. Aus diesem Grund, aber auch wegen der Verwendungsverbote in der EU F-Gase-Verordnung und der Richtlinie 2006/40/EG (MAC-Richtlinie), sind verringerte Emissionen für das Jahr 2020 festzustellen – ein Trend, der sich in Anbetracht der jetzigen Marktlage voraussichtlich fortsetzen wird.

1.5.1 Kälte- und Klimaanlage (2.F.1)

Kälte- und Klimaanlage bilden mit Abstand den größten Sektor als Emissionsquelle von fluorierten Treibhausgasen.

Abbildung 4: Anteile der Emissionen bezogen auf Tonnen der verschiedenen Subsektoren im Sektor Kälte- und Klimaanlage in Deutschland 2020 (%)

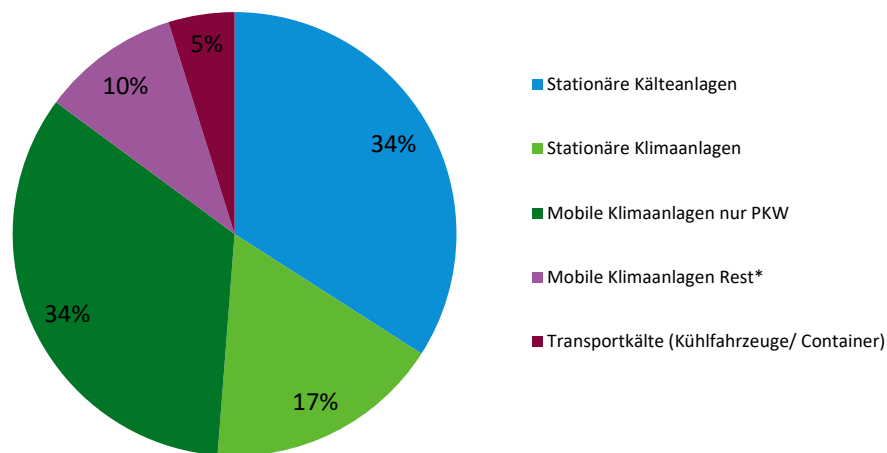


* Nutzfahrzeuge, Busse, Landmaschinen, Züge, Schiffe und Flugzeuge

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Abbildung 4 zeigt deutlich, dass die Emissionen in metrischen Tonnen aus Pkw-Klimaanlagen fast die Hälfte aller Emissionen im Bereich der Kälte- und Klimaanlage ausmachen. Allerdings ergibt sich hier, wie bereits zu Abbildung 3 erläutert, ein klarer Unterschied bei der Betrachtung der Emissionen in Mio. t CO₂-Äquivalenten. Wie in Abbildung 5 zu erkennen ist, sind die klimawirksamen Emissionen aus dem Pkw-Sektor geringer, wohingegen diejenigen aus stationären Kälteanlagen höher sind. Vor allem im Bereich Pkw-Klimaanlagen wird sich der Anteil der klimawirksamen Emissionen in den kommenden Jahren weiter deutlich verringern, da hier in neuen Pkw-Modellen ausschließlich Kältemittel mit einem GWP-Wert unter 150 eingesetzt werden. Hauptsächlich kommt das Hydrofluorolefin uHFKW-1234yf zum Einsatz, das nur noch einen GWP von 4 aufweist und somit deutlich unter dem von R134a (GWP 1.430) liegt (Es gibt allerdings einen Hersteller, der Fahrzeuge mit CO₂-Anlagen auf den Markt bringt). Aber auch in allen anderen Sektoren werden, bedingt durch die Maßnahmen der EU F-Gase-Verordnung, Kältemittel mit niedrigerem oder keinem GWP eingesetzt, weshalb auch hier eine Verringerung der klimawirksamen Emissionen stattfindet.

Abbildung 5: Anteile der Emissionen bezogen auf CO₂-Äquivalente der verschiedenen Subsektoren im Sektor Kälte- und Klimaanlage in Deutschland 2020 (%)



* Nutzfahrzeuge, Busse, Landmaschinen, Züge, Schiffe und Flugzeuge
 Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

1.5.1.1 Stationäre Kälteanlagen: Gewerbekälte (2.F.1.a), Haushaltskälte (2.F.1.b), Industriekälte (2.F.1.c)

HFKW

Im Bereich der stationären Kältetechnik gibt es zwei große Sektoren (in Klammern die Anteile an den klimawirksamen Emissionen des Bereichs), nämlich Gewerbekälte (ca. 70 %) sowie Industriekälte (ca. 29 %). Das restliche 1 % ist dem Haushaltssektor zuzuschreiben (Haushaltskühlschränke und Speiseeismaschinen).

Der große Sektor der Gewerbekälte wird in Zentralanlagen in Supermärkten und Discountern und in die sonstige Gewerbekälte (z.B. Fleischereien, Gastronomie), die überwiegend mit Verflüssigungssätzen kühlt, untergliedert. Ferner werden steckerfertige Geräte in gewerblichen Bereichen einbezogen.

Bei Zentralanlagen in großen Supermärkten gab es für die Jahre 2017-2019 Aktualisierungen bezüglich der Endbestände und Verbräuche zur Befüllung. Außerdem wurde die Entsorgungsmenge der R404A-Umrüstanlagen in großen Supermärkten angepasst. Das Kältemittelmodell zur Berechnung der Emissionen von Verflüssigungssätzen wurde im Zuge dieser Berichterstattung aktualisiert und um die Kältemittel CO₂ (R744), R449A, R452A und R513A erweitert, die ab 2016 in neuen Anlagen zum Einsatz kommen. Auch bei steckerfertigen Geräten der Gewerbekälte wurde das Kältemittelmodell aktualisiert: es wird nun auch das halogenfreie Kältemittel Propan (R290) berücksichtigt, das seit 2015 verwendet wird.

Die Haushaltskälte, als kleinster Posten im Bereich der stationären Kälteanlagen, beinhaltet Haushaltskühlschränke, in denen allerdings seit 1994 Kohlenwasserstoffe eingesetzt werden und somit nur noch geringe Emissionen entweder aus der Nutzung von alten Geräten oder der Entsorgung auftreten, sowie Speiseeismaschinen.

Der Anwendungsbereich der Speiseeismaschinen wurde im Zuge einer Inventarverbesserung im Jahr 2017¹⁴ in das Inventar übernommen. Eine Vielzahl von Unternehmen bietet diese seit Ende der 1990er Jahre für den Heimbedarf an. Kompressorbetriebene Speiseeismaschinen arbeiten wie eine klassische Kälteanlage mit Kältemittel. Zum Einsatz kommen seit 1997 der HFKW-134a und das Kältemittelgemisch R404A, seit 2015 auch Geräte mit R600a, dessen Anteil stetig steigt und 2020 bereits bei über 50 % lag. Im Zuge dieser Berichterstattung wurden die Kältemittelanteile der Geräte mit den Kältemitteln HFKW-134a und R404A in den Jahren 2015 bis 2019 zugunsten des natürlichen Kältemittels Propan (R290) nach unten korrigiert.

Die Industriekälte umfasst auf der einen Seite die Kühlung in der Lebensmittelproduktion, worunter unter anderem Kühlhäuser, Molkereien sowie Bier- und Weinproduktion fallen. Auf der anderen Seite werden in diesem Sektor vor allem Kühlprozesse in industriellen Bereichen wie der Chemieindustrie erfasst. Für diesen Sektor fand eine Überarbeitung der gesamten Zeitreihe (ab 1993) im Bereich Fleischproduktion statt. Die Daten basieren nun auf der vom Statistischen Bundesamt gemeldeten Schlachtmenge ohne Geflügel (41331-0001 - Schlachtungs- und Schlachtgewichtsstatistik¹⁵) und dem vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft veröffentlichten Wert zur Geflügelmenge (186 - Schlachtmengen von Geflügel nach Geflügelarten¹⁶) zusammen. Außerdem wurden die Entsorgungsmengen von Umrüstanlagen mit R404A und R407C in den Jahren 2006 bis 2019 und mit R422D in den Jahren 2018 bis 2019 aktualisiert.

Eine 2011 erschienene Studie der Europäischen Kommission zu den F-Gas-Emissionen in den 27 Mitgliedsstaaten für 1995 bis 2008 (historische Werte) und 2009 bis 2050 (Projektionen: mehrere Szenarien) ging unter den Bedingungen der F-Gase-Gesetzgebung von 2006 für Deutschland von keinem Rückgang von Bestand und Emissionen aus. Die Hochrechnungen stützten sich auf die Annahme zunehmenden Kältebedarfs in Lebensmittelhandel und Raumklimatisierung einschließlich Wärmepumpen sowie gleichbleibenden Bedarfs für Industriekälte und „sonstige“ Gewerbekälte. Ohne sinkende Emissionsraten würden diese Bestandszunahmen sogar zu höheren Emissionen führen. Anders sehen diese Projektionen unter der Berücksichtigung der neuen EU F-Gase-Verordnung aus. Diese impliziert aufgrund des eingebauten „Phase-down“-Mechanismus eine stark reduzierte Verbrauchsmenge von HFKW auf dem EU-Markt und somit, auf lange Sicht, auch entsprechende Emissionsminderungen. Lag das Durchschnitts-GWP für alle HFKW-Verbräuche im Jahr 2015 noch bei etwa 2000, ist für das Jahr 2030 ein Durchschnitts-GWP von 400 notwendig, um bei unveränderter Verbrauchsmenge von Kältemitteln den „Phase-down“ zu erfüllen. Das bedeutet wiederum, dass der Einsatz von Niedrig-GWP-Stoffen und natürlichen Kältemitteln stark zunehmen muss. In einigen Bereichen, wie der Gewerbekälte, ist diese Entwicklung mittlerweile voll angekommen und zeigt, in Verbindung mit der steil ansteigenden Nutzung des ungesättigten teilhalogenierten Fluorkohlenwasserstoffes uHFKW-1234yf in der Automobilklimatisierung, eine deutliche Verminderung der HFKW-Emissionen im Jahr 2020.

FKW

Emissionen von FKW-Kältemitteln sind weiter rückläufig und lagen im Jahr 2020 bei 0,4 t. Sie stammen überwiegend aus Altanlagen der Gewerbekälte, die im Zuge des FCKW-12-Ersatzes in bestehenden Anlagen in den 1990er Jahren mit sogenannten Service-Kältemitteln befüllt

¹⁴ Warncke, K.; Gschrey, B.; Schwarz, W. (2017): Emissionen fluoriierter Treibhausgase in Deutschland 2016. Daten von HF(C)KW, FKW, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE und PFPME für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für das Berichtsjahr 2016. Kapitel 2.3.

¹⁵ Jährlich veröffentlicht unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Tiere-Tierische-Erzeugung/_inhalt.html.

¹⁶ Jährlich veröffentlicht unter: <https://www.bmel-statistik.de/ernaehrung-fischerei/tabellen-zu-ernaehrung-und-fischerei/#c7883>.

wurden. Letztere enthielten als chlorfreie Komponente häufig FKW-218 (C_3F_8). Emissionen entstehen heute bei Außerbetriebnahme jener alten Anlagen. FKW-218 ist aber auch Bestandteil zweier Service-Kältemittel (R413A und Isceon MO 89), die noch gegenwärtig als Ersatz für den HFKW R22 verwendet werden. Sie werden auch künftig Bestandsemissionen erzeugen, ebenso wie der FKW-116 (C_2F_6), der zusammen mit HFKW-23 Bestandteil der in kleinen Mengen verwendeten Tieftemperatur-Kältemittelgemische R508A und R508B ist.

1.5.1.2 Mobile Klima- und Kälteanlagen: Transportkälte (Kühlfahrzeuge und -container) (2.F.1.d), Mobile Klimaanlage (2.F.1.e)

Mobile Klimaanlage

Die Emissionen von HFKW aus mobilen Klimaanlage werden zu fast 70 % durch Pkw verursacht. Nachdem im Jahr 2009 infolge der Abwrackprämie die Neuzulassungen von Pkw (mit und ohne Klimaanlage) um 23 % auf 3,8 Mio. Stück gestiegen waren, sanken sie 2010 auf 2,9 Mio. Stück, den niedrigsten Wert seit 20 Jahren. Seit 2011 nehmen die Pkw-Neuzulassungen wieder zu und lagen 2019 bei 3,6 Mio. neu zugelassenen Fahrzeugen. Im Folgejahr gab es aufgrund der Corona-Pandemie einen starken Einbruch auf 2,9 Mio., dem niedrigsten Stand seit 2010.

Die Klimaquote, die wegen des hohen Anteils kleiner Fahrzeuge ohne Klimaanlage-Serienausstattung 2009 auf 92 % gesunken war, steigt seitdem an und lag im Jahr 2020 bei 98 % (für R134a und R1234yf zusammen). Die durchschnittliche Kältemittelfüllmenge aller klimatisierten Neufahrzeuge ging seit 2009 kontinuierlich zurück und lag 2015 bei 547 Gramm. In den letzten Jahren war allerdings wieder ein leichter Anstieg dieser Menge zu beobachten (2020: 579 Gramm). Grund hierfür ist der Trend zu den sogenannten SUV (Sport Utility Vehicle), die aufgrund ihrer Größe eine größere Klimaanlage und auch eine höhere Füllmenge an Kältemittel benötigen.

Die HFKW-134a-Emissionen aus dem Pkw-Kältemittelbestand sanken 2020 auf 1.829 t, eine erneut sehr deutliche Reduktion (2018: 2.097 t). Die bezogen auf die Anzahl der inländisch demontierten Altfahrzeuge berechneten Entsorgungsmissionen nahmen von 47 t (2018) auf 37 t R134a ab.

Auch der Emissionsverlauf wird weiter von der Einhaltung der EU-Richtlinie 2006/40/EG über den Ausstieg von HFKW-134a aus Autoklimaanlagen bestimmt. Seit 2017 dürfen neue Pkw für die EU nicht mehr mit R134a klimatisiert werden. Die deutsche Autoindustrie hatte sich nach jahrelanger Befürwortung von CO_2 als alternativem Kältemittel 2011 zunächst für den Einsatz des neu entwickelten ungesättigten uHFKW-1234yf entschieden. Das Treibhauspotenzial (GWP) von uHFKW-1234yf wird mit 4 angegeben und liegt damit deutlich unter den erlaubten 150 der MAC-Richtlinie.

Der Ausstieg aus dem Kältemittel R134a aus Pkw-Autoklimaanlagen, der gemäß EU-Richtlinie 2011 beginnen sollte, hat sich allerdings deutlich verzögert. In den letzten Jahren hat sich der Umstieg auf R1234yf aber nahezu vollzogen und so wurden seit 2018 keine Fahrzeuge mehr mit R134a zugelassen. Wegen anhaltender Vorbehalte gegenüber R1234yf, hat als erste die Firma Daimler, welche seit einigen Jahren intensiv an CO_2 -Anlagen forscht, ihre Ankündigung umgesetzt und bietet CO_2 -Anlagen an. Audi bietet ebenfalls seit Mitte 2017 in seinem Modell A8 CO_2 als Kältemittel an. Außerdem plant auch der größte deutsche Autobauer, VW, in Zukunft umstellen zu wollen. Genaue Zahlen liegen hierzu aber noch nicht vor.

Die Vorbehalte gegenüber R1234yf haben sich allerdings weiter verschärft, denn es zeigt sich, dass Hydrofluorolefine (HFO) als Abbauprodukt Trifluoressigsäure (TFA) bilden. TFA ist eine sehr gut wasserlösliche und in der Umwelt schwer abbaubare Substanz, gilt als

wassergefährdend und gelangt bis ins Grund- und Trinkwasser. Aktuelle Regenwassermessungen im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA), durchgeführt von einem Konsortium unter Mitarbeit von Öko-Recherche, zeigen, dass die TFA-Konzentrationen gegenüber den 1990er Jahren bereits heute stark zugenommen haben¹⁷. Bisher ergeben sich keine regulatorischen Folgen aus diesen Messungen, es ist aber anzunehmen, dass weitere Forschungen folgen und damit eventuell zu rechnen ist.

Im Bereich der Pkw gab es im Zuge dieser Berichterstattung eine Aktualisierung der Klimaquoten und durchschnittlichen Füllmengen der im Inland produzierten und neu zugelassenen Fahrzeuge für die Jahre 2011 bis 2019, wodurch sich die Emissionen der Produktion und Anwendung geändert haben.

Bei anderen mobilen Klimaanlagen (Busse, Nutzfahrzeuge der Gewichtsklassen N3, N2 und teilweise N1, Landmaschinen, Schiffe, Schienenfahrzeuge, mittelgroße Flugzeuge und Hubschrauber) ist ein Ausstieg aus HFKW-134a bisher gesetzlich nicht vorgeschrieben, wird aber durch den HFKW-Phase-down der EU F-Gase-Verordnung gefördert. Die MAC-Richtlinie gilt auch für die Gruppe 1 der kleinsten Gewichtsklasse der Nutzfahrzeuge N1. Aus diesen Gründen werden seit 2016 Nutzfahrzeuge N1 zunehmend ebenfalls mit R1234yf klimatisiert. Auch diese Daten berichten wir nun aggregiert unter Kapitel 2.6. Eine genaue Beschreibung dieser Inventarverbesserung findet sich im vorherigen Inventarbericht der F-Gase, erschienen 2021¹⁸.

Nutzfahrzeuge werden gewerblich betrieben und sind stärker als die konsumnahen Pkw dem konjunkturellen Zyklus unterworfen. Die Neuzulassungen von Nutzfahrzeugen aller Gewichtsklassen (N1, N2 und N3) waren 2009 im Zuge der Krise deutlich, teilweise um über 50 %, zurückgegangen. Auch ihre Klimaquote war – über alle Klassen – gesunken (auf 51 %). In den Jahren 2010 und 2011 nahmen die Neuzulassungen in allen Gewichtsklassen wieder zu und sanken in den Jahren 2012 und 2013 geringfügig. Im Jahr 2020 sind die Neuzulassungen in allen drei Klassen Corona-bedingt deutlich gesunken. Die Klimaquote aller drei Nutzfahrzeug-Kategorien stieg allerdings deutlich an auf 91 % (2018: 84 %).

Der Kältemittelbestand in der Nutzfahrzeug-Flotte nahm in den letzten Jahren weiter zu. Damit stiegen auch die Betriebsemissionen deutlich von 264 t (2018) auf 307 t (2020). Inländische Entsorgungsemissionen spielen eine untergeordnete Rolle, weil nahezu alle Nutzfahrzeuge vor ihrer Demontage als Gebrauchtfahrzeuge exportiert werden. Bei Nutzfahrzeugen wurde im Zuge dieser Berichterstattung die Anzahl der inländisch produzierten Nutzfahrzeuge, die mit Klimaanlage ausgestattet sind, für die Jahre 2011 bis 2019 aktualisiert.

Bei Bussen, Landmaschinen und Schienenfahrzeugen gab es leichte Zunahmen der Bestandsemissionen im einstelligen Prozentbereich.

Für diese Bereiche, sowie den der Schiffsklimatisierung gab es folgende Änderungen: Im Bereich der Busse wurden aufgrund von Herstellerangaben sowohl die durchschnittliche Füllmenge, als auch die Klimaquote für das Jahr 2019 nach oben korrigiert. Ebenso die Anzahl der in Deutschland in den Jahren 2018 und 2019 produzierten Busse, sowie die durchschnittliche Füllmenge. Im Bereich der Schienenfahrzeuge wurden die Mengen zum Verbrauch in der

¹⁷ David Behringer, Felix Heydel, Barbara Gschrey, Steffi Osterheld, Winfried Schwarz, Kristina Warncke, Finnian Freeling, Karsten Nödler, Stephan Henne, Stefan Reimann, Markus Blepp, Wolfram Jörß, Ran Liu, Sylvie Ludig, Ina Rüdenauer, Stefan Gartiser (2021): Persistente Abbauprodukte halogener Kälte- und Treibmittel in der Umwelt: Art, Umweltkonzentrationen und Verbleib unter besonderer Berücksichtigung neuer halogener Ersatzstoffe mit kleinem Treibhauspotenzial, Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 3717 41 305 0, März 2021. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/persistente-abbauprodukte-halogener-kaelte>.

¹⁸ Warncke, K.; Gschrey, B.; Osterheld, S. (2021): Emissionen fluorierte Treibhausgase in Deutschland 2017/2018. Daten von HF(C)KW, FKW, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE und PFPME für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für die Berichtsjahre 2017 und 2018. Kapitel 2.3.

Produktion für die Jahre 2014, 2018 und 2019 angepasst. Eine weitere Änderung fand im Bereich der Schiffsklimatisierung statt. Hier wurde die Anzahl der neuen Binnenkabinenschiffe basierend auf Statistiken der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes für das Jahr 2019 aktualisiert. Außerdem wurde der Bestandsemissionsfaktor von Seegüterschiffen für die Jahre 1997 bis 2017 von 30 % auf 35 % erhöht, da eine neue Datenquelle (Hafner et al. (2019)) berücksichtigt wurde.

Der Bestand von R134a zur Klimatisierung von mittelgroßen mehrmotorigen Flugzeugen und Hubschraubern liegt seit 1993 relativ konstant bei etwa 2,6 t. Daraus ergeben sich errechnete jährliche Emissionen von rund 130 kg. Auch in der Bordkühlung von Passagierflugzeugen wird R134a eingesetzt. Der Bestand stieg von 1 t 1993 auf 1,5 t im Jahr 2014 an. 2020 gab es einen leichten Rückgang; die Emissionen werden auf etwa 74 kg geschätzt.

Transportkälte

Nach dem Einbruch der Neuzulassungen von Kühlfahrzeugen im Jahr 2009 von 12.300 auf 8.700 Stück hatten die Neuzulassungen den früheren Wert wieder erreicht; 2018 waren es 12.558 Stück. 2020 fand allerdings, wie in anderen Bereichen auch, Corona-bedingt ein starker Einbruch auf 9.179 Fahrzeuge statt. Die Bestandsemissionen von HFKW (R404A, R134a und R410A) sanken von 67 t im Jahr 2018 auf 56 t im Jahr 2020. Seit 2015 wird in neuen Kälteaggregaten eines namhaften Herstellers auch die HFKW-uHFKW-Mischung R452A als Ersatz für R404A verwendet. Auch die anderen Hersteller setzten spätestens 2018 voll auf dieses Kältemittel. Daher sind diese Emissionen stark angestiegen, von 11 t im Jahr 2018 auf 24 t im Jahr 2020.

Im Bereich der Kühlfahrzeuge wurden die durchschnittlichen Füllmengen der Kältemittel HFKW-134a, R404A, R410A und R452A in den Jahren 2018 und 2019 aktualisiert.

Inventarverbesserung Transportkälte Kühlcontainer (2.F.1.d)

Wie in vielen anderen Sektoren, wird auch im Bereich Kühlcontainer seit Jahren der Einsatz von Kältemitteln mit niedrigerem GWP erforscht, bis vor einiger Zeit jedoch ohne sehenswerte Erfolge: Gängiges Kältemittel ist nach wie vor R134a. Im Laufe der letzten drei Jahre scheint jedoch Bewegung in den Markt gekommen zu sein: 2018 entschied sich das Frachtunternehmen MSC dazu, zweitausend Carrier Transicold NaturaLine Kühlcontainer, welche CO₂ nutzen, zu leasen. Außerdem erhielt der dänische Frachtzulieferer DFDS Logistics im Herbst 2019 eine Ladung von 50 dieser Container. Maersk bekam den Auftrag zur Lieferung von 8.600 Reefern an den Branchen-Riesen Hapag-Lloyd mit dem Kältemittel R513A. Schon im November 2017 hatte Hapag-Lloyd tausend Container dieses Typs bestellt. R513A (Opteon XP10) besteht aus 44 % R134a und 56 % R1234yf und hat einen GWP von 631. Außerdem ist das bereits in Kühlfahrzeugen verwendete R452A seit 2018 auf dem Markt. Und obwohl Container mit CO₂ durchaus durch Frachtunternehmen in größerem Umfang getestet werden, ist Expertenschätzungen zufolge erst in zwei bis drei Jahren mit sehenswerten Marktanteilen zu rechnen. Daraus ergibt sich für die deutsche Berichterstattung, dass zunächst ab 2018 die beiden Kältemittel R513A und R452A mit in das Modell aufgenommen werden.

Im Zuge der Modellüberarbeitung wurden außerdem weitere Parameter geändert. Zum einen wurden die Kältemittelanteile von HFKW-134a in den Jahren 2015 bis 2019 und von R404A in den Jahren 2015 bis 2018 angepasst. Weiterhin wurde aufgrund von Expertenaussagen die durchschnittliche Füllmenge ab dem Jahr 2012 geändert; für HFKW-134a von 6 kg auf 5 kg und für R404A von 4 kg auf 5 kg. Zum anderen fand eine Anpassung des Emissionsfaktors statt. Dieser wurde im bisherigen Modell als konstanter Wert von 10 % angenommen; nun sinkt er ab 2012 kontinuierlich ab und zwar auf 5,6 % im Jahr 2019.

Die der Bundesrepublik Deutschland zugerechneten Bestandsemissionen aus Kühlcontainern betrugen 2020 etwa 55 t – hauptsächlich R134a (84 %).

1.5.1.3 Stationäre Klimaanlage (2.F.1.f)

Besonders bei Gebäude-Klimaanlagen (Flüssigkeitskühlsätze), Raumklimageräten und Wärmepumpen ist das Wachstum des HFKW-Kältemittel-Bestands noch nicht ausgeschöpft und auch im Jahr 2020 weitergegangen.

Raumklimageräte

Der Markt für Raumklimageräte aller Kategorien, der 2009 eingebrochen war, hatte sich 2010 und 2011 wieder erholt und ist auch 2020 angestiegen. In allen europäischen Ländern wird der Raumklimatisierung ein langfristiges Wachstum bis 2030 vorausgesagt. Der Kältemittelbestand der insgesamt in Deutschland in Betrieb befindlichen mobilen Kleingeräte und einfachen Split- und Multisplit-Geräte war 2020 fast dreimal so hoch wie 2004 (2.694 t/962 t). Der Einsatzbereich von Raumklimageräten hat sich stetig nach oben erweitert - auf bis zu 60 kW und mehr Kälteleistung. Dies ist auf die zunehmende Verwendung von Multisplit-Geräten, insbesondere solchen mit individuell einstellbaren Kältemittelströmen (VRF-Technologie), zurückzuführen, bei denen mehrere (meist drei bis sieben) Innengeräte mit einem einzigen Außengerät verbunden sind.

Das um das Jahr 2000 eingeführte Kältemittel R410A hat bei neuen Geräten das traditionelle R407C noch nicht in dem Maße ersetzt wie zunächst angenommen, weswegen in diesem Bereich im Jahr 2016 rückwirkend Änderungen in den Anteilen von R410A und R407C vorgenommen wurden. Geräte mit Kohlenwasserstoff-Kältemitteln spielen bisher nur bei mobilen Systemen eine Rolle. Bei einfachen Splitgeräten stehen Sicherheitsbedenken und unvorteilhafte Normen noch einer Ausweitung der Verwendung von Kohlenwasserstoffen entgegen, obwohl diese Geräte in Asien, vor allem in China und Indien, bereits in beträchtlichem Umfang hergestellt und genutzt werden¹⁹.

In der EU wird momentan an einer Überarbeitung der relevanten Normen und der EU-F-Gase-Verordnung gearbeitet, um den Klimaanlage-Markt für diese Technologie zu öffnen. Dies soll die künftige Einhaltung des HFKW-Phase-down und des Verbots von Split-Klimageräten, die mit F-Gas-Kältemitteln mit einem GWP ≥ 750 befüllt sind, ab 2025 (EU F-Gase-Verordnung, Annex III, Nr. 15) ermöglichen. In diesem Zuge findet auch das Kältemittel R32, welches bereits seit Jahren Bestandteil von Gemischen ist, seinen Weg in diese Anwendung und hat seinen Anteil an allen Neugeräten im Jahr 2020 auf bereits 90 % ausbauen können, ein Riesensprung seit 2017 (5 %).

Inventarverbesserung Raumklimageräte (2.F.1.f)

Auch für Raumklimageräte wird, u.a. bedingt durch die Regelungen der EU F-Gase-Verordnung, der Einsatz von Kältemitteln mit niedrigerem GWP erforscht. Relevant in diesem Zusammenhang scheint die (zukünftige) Verwendung von R32 in VRF-Raumklimageräten und R454C in Split-Raumklimageräten zu sein.

¹⁹ Folgende Zahlen wurden in letzter Zeit für den Markt in China veröffentlicht: 160.000 Raumklimageräte, die vor allem in öffentlichen Einrichtungen installiert wurden (Artikel: Devin Yoshimoto: Chinese companies report production of nearly 160,000 propane room ACs, 29.08.2019. http://hydrocarbons21.com/articles/9129/chinese_companies_report_sales_of_nearly_160_000_propane_room_acs)

180.000 Raumklimageräte, genannt in einem Side Event der Vertragsstaatenkonferenz des Montrealer Protokolls. Eine Produktionskapazität von 6 Millionen Geräten pro Jahr wurde ebenfalls aufgeführt. (Präsentation UNIDO: The Italian HVACR Experience. An international overview of alternative and climate friendly solutions in the A/C Sector, 06.11.2019).

R32 in VRF-Raumklimageräten und R454C in Split-Raumklimageräten

Die EU F-Gase-Verordnung sieht für den Sektor der Raumklimageräte ein Verbot vor: Mono-Splitgeräte mit einer Füllmenge von weniger als 3 kg Kältemittel, die fluorierte Treibhausgase mit einem GWP von 750 oder mehr enthalten, dürfen gemäß Anhang III, Nr. 15 nach Art. 11, Absatz 1 der F-GaseV ab 1. Januar 2025 nicht mehr in Verkehr gebracht werden. Ein 2020 von Öko-Recherche und dem französischen Institut CITEPA für die EU-Kommission erarbeitetes Papier stellt die derzeitige Situation des EU-Marktes für Split-Klimageräte sowie mögliche Alternativen zum bisher vorrangig verwendeten Kältemittel R410A (GWP 2088) dar²⁰.

Das Unternehmen Daikin war das erste, welches, statt der bisher verwendeten Kältemittel R410A (GWP 2088) und R407C (GWP 1774) die umfassende Einführung des Kältemittels R32 (GWP 675) in seinen neuen Geräten umsetzte. Andere Hersteller folgten. Die Einführung von R32 fand 2015 zunächst in einfachen Splitgeräten statt und hat sich seither auf 90 % Prozent aller Neuanlagen erhöht (Berichtsjahr 2020). Seit 2017 folgte auch der Einsatz in Multisplit-Geräten, und im April 2020 wurde die Einführung in Mini-VRF-Geräten angekündigt. Die Firma Daikin bestätigt die Einführung von R32 in VRF-Anlagen im Jahr 2020, der Anteil an den Neuanlagen liegt allerdings noch im niedrigen einstelligen Prozentbereich. Die Füllmenge von R32 ist etwas niedriger als diejenige der bisher genutzten Kältemittel und liegt bei durchschnittlich 11,7 kg. Die entsprechenden Daten liegen dem UBA vor und sind 2021 in die nationale Emissionsberichterstattung aufgenommen worden.

Das Kältemittel R454C (Opteon XL20) setzt sich aus R32 (21,5 %) und R1234yf (78,5 %) zusammen und hat einen relativ geringen GWP von 148. Es hat sich allerdings im Rahmen der Recherchen herausgestellt, dass die Hersteller das Mittel in Split-Raumklimageräten bislang nicht auf dem EU-Markt gebracht haben. OEMs (Original Equipment Manufacturer) sind derzeit hinsichtlich der Verwendung neuer Kältemittelgemische vorsichtig, die Forschungsvorhaben befassen sich eher mit der Verwendung von Kohlenwasserstoffen. Grund dafür sind Unsicherheiten, die sich aus einem Regelungsvorschlag²¹ für eine mögliche Beschränkung per- und polyfluorierter Alkylverbindungen (Per- and Poly Fluorinated Alkyl Substances, PFAS) unter der europäischen REACH-Verordnung²² ergeben. Daher wird R454C vorerst nicht in das deutsche Inventar aufgenommen.

Kaltwassersätze

Große Klimaanlage im Leistungsbereich von oberhalb ca. 20 kW Kälteleistung werden in der Regel als Flüssigkeitskühlsatz (Chiller) ausgelegt. Dieser Markt (Stückzahlen) ist recht stabil, weil Rückgänge im unteren Leistungsbereich durch Zuwächse im mittleren Leistungsbereich ausgeglichen werden. Die Zahl der Neuinstallationen konnte aufgrund neuer Quellen wieder genauer erhoben werden. Seit 2005 nimmt die Bedeutung des Kältemittels R410A stetig und ungebrochen zu, sowohl im Leistungsbereich < 100 kW als auch im Leistungsbereich > 100 kW. Es ist mittlerweile in Neuanlagen wichtiger als R407C und R134a. Letzteres war fast ausschließliches Kältemittel in Turboverdichter-Anlagen. Auch in diesem Sektor wurde in früheren Berichten die Bedeutung von R410A überschätzt, weswegen sein Anteil auch hier zugunsten von R407C nach unten korrigiert wurde.

²⁰ Gschrey, B.; Kleinschmidt, J.; Barrault, S.: Briefing Paper: HFCs and HFC alternatives in split-air conditioning systems; März 2020. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/0106/2020_03_25_hfc_alternatives_en.pdf.

²¹ Weitere Informationen zum Regelungsvorschlag für PFAS finden sich z.B. unter: <https://echa.europa.eu/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18663449b>.

²² Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006R1907>.

Seit 2013 und zunehmend ab 2015 bieten einige europäische Hersteller Chiller mit dem uHFKW-1234ze an und zwar fast ausschließlich in sehr großen Chillern im Leistungsbereich von über 900 kW und entsprechend großen Füllmengen. Auch R1234ze wird, entgegen der Aussagen in Warncke et al (2021)²³, nun in Turbochillern eingesetzt.

Außerdem wird das Niederdruck-Kältemittel R1233zd verwendet. Diese Anlagen stehen gerade am Beginn der Markteinführung. Es handelt sich dabei um besonders große Maschinen im Leistungsbereich von über 2 MW. Weiterhin hat sich R513A etabliert, welches ebenso in Turbochillern eingesetzt werden kann. Genauere Informationen zu den neuen Stoffen finden sich in Warncke et al (2021)²⁴.

Im Rahmen von Recherchen hat sich ergeben, dass die Grenzen zwischen Kaltwassersätzen und Wärmepumpen zusehends verschwimmen. Es ist daher geplant, im nächsten Jahr eine Modellüberarbeitung vorzunehmen.

Wärmepumpenanlagen

Die Zahl neu installierter Wärmepumpen hat nach dem Rückgang von 2009 und 2010 vor allem in den letzten zwei Jahren sehr stark zugenommen, was u.a. auf die anhaltenden Diskussionen zum Thema Klimaschutz und energieeffizientes Heizen zurückzuführen ist. Anhaltendes Wachstum in allen europäischen Ländern, außer denen des Südens, ist zu erwarten. Denn Wärmepumpen, die Boden und Grundwasser („Erdreich“) als Wärmequelle nutzen, sind energetisch vorteilhaft. Allerdings ist ein verstärkter Trend zu Wärmepumpen mit Luft als Wärmequelle zu beobachten, die bodengebundenen Wärmepumpen energetisch nicht gleichwertig sind.

Inventarverbesserung R454C in Wärmepumpen (2.F.1.f)

Wärmepumpen werden in Deutschland bisher grundsätzlich mit den Kältemitteln R134a, R407C, R404A und R410A betrieben. Bereits im Zuge der letzten Berichterstattung haben wir uns aber auch mit dem Einsatz von CO₂ (R744) befasst, welches z.B. in Japan längst eine sehr große Verbreitung in Warmwasserwärmepumpen findet, weil es die dort gewünschte hohe Vorlauftemperatur schnell und energetisch effizient bereitstellt. Und auch in Deutschland, so hat unsere Recherche ergeben, findet sich ein stabiler Markt für Warmwasserwärmepumpen mit R744 seit der Einführung im Jahr 2018 (siehe Warncke et al (2021)²⁵). Weitere Arten von Wärmepumpen sind: Luft – Wasser WP, Erdreich (Wasser) – Wasser WP, sowie Erdreich (Sole) – Wasser WP.

Im Rahmen der Messe ISH 2019 wurden jedoch auch Wärmepumpen mit Kohlenwasserstoffen (R290) sowie mit dem Kältemittel R454C vorgestellt. Der Hersteller Stiebel Eltron plante die Markteinführung zunächst für 2020, wobei die nach unseren Kenntnissen doch erst 2021 umgesetzt wurde. OEMs sind derzeit hinsichtlich der Verwendung neuer Blends in bestimmten Sektoren zögerlich. Grund sind Unsicherheiten, die sich aus einem Regelungsvorschlag für eine mögliche Beschränkung von PFAS unter der europäischen REACH-Verordnung ergeben. Daher wurde R454C für den Bereich Wärmepumpen und die Berichtsjahre 2019 und 2020 nicht in das deutsche Inventar aufgenommen.

²³ Warncke, K.; Gschrey, B.; Osterheld, S. (2021): Emissionen fluorierte Treibhausgase in Deutschland 2017/2018. Daten von HF(C)KW, FKW, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE und PFPME für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für die Berichtsjahre 2017 und 2018.

²⁴ A.a.O. Kapitel 2.5.

²⁵ A.A.O. Kapitel 2.6.

Allerdings wurde R32 auch im Bereich von Heizungswärmepumpen vom Typ Erdreich (Sole) – Wasser eingeführt und ist seit 2019 Teil des Inventars.

Wie bereits erwähnt, hat sich ergeben, dass die Grenzen zwischen Wärmepumpen und Kaltwassersätzen zusehends verschwimmen. Es ist daher geplant, im nächsten Jahr eine Anpassung vorzunehmen. Auch die Verwendung von R290 in Wärmepumpen sollte dann genauer untersucht und im Inventar aktualisiert werden.

Wärmepumpen-Wäschetrockner

Dieser Bereich hat mit unter 1 % einen sehr kleinen Anteil an allen HFKW-Emissionen im Bereich der ODS-Ersatzstoffe. Seit 2015 sind auch Geräte mit R290 auf dem deutschen Markt verfügbar. Der Anteil an allen im Inland verkauften Geräten beim bisher einzigen Hersteller mit diesem natürlichen Kältemittel, dessen Marktanteil ca. 60 % beträgt, hat sich seit der Einführung im Jahr 2015 bereits verzehnfacht und liegt nun bei 34 %. Das entspricht in etwa 655.000 Geräten.

Inventarverbesserung R450A in Wärmepumpen-Wäschetrocknern (2.F.1.f)

Bisher werden Wärmepumpen-Wäschetrockner, die in Deutschland hergestellt oder nach Deutschland importiert werden, mit R407C, R134a oder R290 (Propan) betrieben. Es ist technisch jedoch möglich, die Kältemittel R450A oder CO₂ zu nutzen, wozu der Hersteller Miele in Kooperation mit Hochschulen auch Forschungsprojekte durchgeführt hat. In Expertengesprächen hat sich jedoch ergeben, dass die Branche voll auf R290 setzt und R450A nur in geringem Maße für gewerbliche Maschinen, und dies als Übergangslösung, genutzt wird. Auch CO₂ wird nicht eingesetzt, da es noch zu viele technische Hürden gibt. Eine Aufnahme der beiden Stoffe in das deutsche Inventar ist deshalb nicht sinnvoll.

Gewerbliche Spülmaschinen mit Wärmepumpenfunktion

Im Jahr 2018 wurde dieser Bereich neu in das Inventar aufgenommen. Um in Großküchen die Abwärme von gewerblichen Geschirrspülmaschinen zu nutzen, sind seit dem Jahr 2005 einzelne Modelle mit Wärmepumpenfunktion auf dem deutschen Markt erhältlich. Die Anzahl der Hersteller in Deutschland ist nicht nur sehr klein, sondern deckt auch fast den kompletten Markt ab. Zudem sind die Produktionszahlen sehr stabil. Als Kältemittel kommt bisher ausschließlich der HFKW-134a zum Einsatz. Allerdings hat ein Hersteller bereits angekündigt, im Jahr 2020 auf R513A umzustellen. Die Emissionen aus diesem Bereich sind sehr gering und bewegten sich im Jahr 2020 bei 0,075 t, was 0,11 t CO₂-Äq. entspricht.

1.5.2 Schaumherstellung (2.F.2)

Im Schaumsektor werden fluoridierte Substanzen als ODS-Ersatzstoffe als Treibmittel eingesetzt.

1.5.2.1 PU-Hartschaum

Für PU-Hartschaum werden seit 2002 die flüssigen HFKW-365mfc und HFKW-245fa als physikalische Treibmittel eingesetzt und berichtet. Die verwendeten Mengen werden von den Herstellern der Vorprodukte (sogenannten Systemhäusern) erfragt, welche die Treibmittel in die Polyolkomponente einmischen, die sie zusammen mit der Isocyanat-Komponente an die Schaumhersteller liefern. Bereits 1996 kam HFKW-134a zum Einsatz. Gemessen an den 1990er Jahren ist der Verbrauch fluorierter Treibmittel gering, weil die potenziellen Anwender nach sukzessiven Verboten von FCKW und HFCKW nur in wenigen Teilbereichen bei halogenierten Treibmitteln geblieben sind, sondern auf Kohlenwasserstoffe umgestellt haben. HFKW werden vor allem dort benutzt, wo schwere Entflammbarkeit der Treibmittel gefordert wird, wie bei der Anwendung Spritzschaum und teilweise bei Blockschaum (beides geschlossenzellige

Hartschaumtypen) sowie bei Integralschaum, der offenzellig ist. Aufgrund neuer Erkenntnisse wurden die Inlandsverbräuche von HFKW-365mfc, HFKW-227ea und HFKW-245fa für die Produktion von PU-Hartschäumen (und PU Integralschäumen) für die Jahre 2009 bis 2018 korrigiert. Die Rückrechnungen bei den PU-Hartschäumen erfolgten auf Basis von UStatG-Daten, die Werte werden basierend auf Zahlen von Industrievertretern und UStatG-Anteilen berechnet.

Die langfristigen Emissionen aus dem Bestand von Hartschaum (Emissionsrate 0,5 - 1 %) stiegen weiterhin an, weil aufgrund der langen Lebensdauer von Dämmschaum noch keine Entsorgung aus dem Bestand stattfindet.

1.5.2.2 XPS-Schaum

Seit Ablösung der HFCKW-Treibmittel durch HFKW seit dem Jahr 2001 ist die Herstellung von Dämmplatten aus extrudiertem Polystyrol (XPS) der Schaumsektor mit den höchsten Emissionen. Die Menge des HFKW-134a, der bei der Herstellung zu ca. 30 % in die Atmosphäre entweicht, war seit 2009 stetig zurückgegangen. Seit 2013 ist allerdings wieder ein Aufwärtstrend zu beobachten. Dieser ist jedoch zum Erliegen gekommen und die Produktion mit HFKW-134a wurde 2019 eingestellt, da dessen Verwendung für Schäume ab 1.1.2020 gemäß der EU F-Gase-Verordnung nicht mehr erlaubt ist. Der Einsatz von HFKW-152a, der bei der Herstellung des Schaumes vollständig emittiert, und seit 2001 rückläufig war, hat seit 2015 einen Anstieg zu verzeichnen. Auch hier zeigt sich jedoch seit 2018 ein Abwärtstrend.

Ein deutscher Hersteller setzt seit 2012 für einen Großteil seiner Produktpalette statt des HFKW-152a den ungesättigten uHFKW-1234ze als Treibmittel ein. Die verwendeten Mengen sind bereits beträchtlich und stehen über die Erhebung nach Umweltstatistikgesetz (2005) zur Verfügung.

1.5.2.3 PU-Integralschaum

Der Einsatz von HFKW-Treibmitteln für Integralschaum für Schuhsohlen, Lenkradummantelungen, Schreibtischstuhl-Lehnen u. dgl. spielt in Deutschland nur noch eine untergeordnete Rolle, da die Produktion entweder ausgelagert worden ist oder die Herstellung halogenfrei bewerkstelligt wird (etwa Lenkräder). Bei Integralschaumprodukten nimmt die Dichte des Schaums von innen nach außen zu, bis eine feste Haut an der Oberfläche gebildet ist. Anders als beim Hartschaum, wo hohes Dämmvermögen gefordert ist und dafür die Treibmittel in den Schaumzellen eingeschlossen bleiben sollen, emittieren die Treibmittel unmittelbar nach dem Produktionsprozess und haben sich innerhalb eines Jahres in die Atmosphäre verflüchtigt. Die halogenierten Treibmittel sind die gleichen wie für Hartschaum, nämlich HFKW-134a, HFKW-245fa und HFKW-365mfc (letzterer mit Zusatz von HFKW-227ea).

Aufgrund neuer Erkenntnisse wurden die Inlandsverbräuche von HFKW-365mfc, HFKW-227ea und HFKW-245fa für die Produktion von PU Integralschäumen (und PU-Hartschäumen) für die Jahre 2009 bis 2019 korrigiert. Die Inlandsverbräuche für die Produktion mit HFKW-134a ab dem Jahr 2013 werden fortan den Erhebungen nach Umweltstatistikgesetz entnommen, was ebenfalls zu Rekalkulationen führte.

1.5.2.4 PU-Montageschaum

Die Emissionen aus der Anwendung von PU-Montageschaum, der bis zum Jahr 2000 größten einzelnen Emissionsquelle von HFKW in Deutschland überhaupt, haben sich auch 2020 weiter vermindert.

Die EU F-Gase-Verordnung von 2014 enthält – genau wie schon ihre Vorgängerin – das Verkaufsverbot für Montageschaum mit fluorierten Treibmitteln ab Juli 2008 bis auf einen geringen Rest, der zur Einhaltung nationaler Sicherheitsnormen erforderlich ist (Bergbau). Aus

dem Verordnungstext ergibt sich allerdings nur ein Verbot für Treibmittelgemische (Zubereitungen) mit einem GWP über 150. Damit ist die Verwendung von HFKW-134a als Gemisch-Komponente weiterhin gestattet, unter der Voraussetzung, dass durch die Zugabe der GWP-Grenzwert von 150 nicht überschritten wird. Dadurch sind bis zu 10 % HFKW-134a im Gasgemisch zulässig, welches weiter aus Kohlenwasserstoffen besteht. Im Jahr 2020 betrugen die Konzentrationen im Treibmittelgemisch aller im Inland angewendeten Dosen bei HFKW-134a 0,5 % und bei HFKW-152a 1,9 %. Basierend auf Aussagen von Branchenexperten wurden im Jahr 2021 die Füllmengen der verkauften Montageschaumdosen für die Jahre 2017 und 2018 aktualisiert.

1.5.3 Feuerlöschmittel (2.F.3)

Bei Feuerlöschmitteln, der ehemals großen Emissionsquelle der Ozonschicht zerstörenden Halone, spielen HFKW wie HFKW-227ea, HFKW-236fa und der seit 2005 eingesetzte HFKW-23 eine untergeordnete Rolle. In kleineren Räumen für EDV, Telekommunikation usw. werden zwar fluorierte Gase eingesetzt, aber für Raumvolumina über 400 m³ werden meistens andere Löschmittel, vor allem Inertgase, verwendet.

Nachdem im Jahr 2010 etwa 70 t des HFKW-227ea zum Neueinsatz kamen, lagen die Mengen in den Folgejahren etwas darunter. Nur im Jahr 2016 gab es mit 92 t einen höheren Wert. Seitdem ist der Verbrauch stark eingebrochen auf unter 1 Tonne im Jahr 2020. Ersetzt wird HFKW-227ea durch das Fluorketon FK-5-1-12 (Handelsname Novec 1230).

Das Löschmittel HFKW-236fa wird in mobilen Systemen der Bundeswehr eingesetzt.

Der als Löschmittel wegen seines hohen GWP umstrittene HFKW-23 wurde nach einer Schätzung des Umweltbundesamtes nur in geringem Umfang für Neuanlagen genutzt. Der Bestand wird auf ca. 5 t geschätzt. Bereits im Vorfeld des Verbots ab 1. Januar 2016 (EU F-Gase-Verordnung, Annex III, Nr. 3), fanden keine Neu-Befüllungen mehr statt, so dass der Bestand in den nächsten Jahren abnehmen wird.

Für alle HFKW beträgt der Emissionsfaktor der Entsorgung zukünftig 9 %. Dieser Wert weicht von den Vorgaben der *2006 IPCC Guidelines* ((IPCC, 2006): Vol. 3, Kapitel 7.6.2.2) ab, da in der Praxis Gasflaschen von der Anlage getrennt werden und in die Wiederverwendung gehen²⁶. Entsorgungsmengen vom HFKW-227ea fallen ab 2018 an. Sie werden im nächsten Berichtsjahr mit diesem Emissionsfaktor rekalkuliert. Bei den beiden anderen Stoffen fallen noch keine Mengen zur Entsorgung an.

1.5.4 Aerosole (2.F.4)

In diesem Abschnitt werden die Dosieraerosole (Metered Dose Inhalers, MDI), welche in der Medizin verwendet werden, sowie die allgemeinen Aerosole und Novelty-Aerosole beschrieben.

1.5.4.1 Dosieraerosole

HFKW-Emissionen (HFKW-134a und HFKW-227ea) aus der Anwendung medizinischer Sprays für die Behandlung von Asthma und anderen Atemwegs- und Lungenerkrankungen liegen relativ konstant bei etwa 200 t/a - trotz Anstiegs des Arzneimittelverbrauchs für die Atemwegstherapie. Dies deutet darauf hin, dass treibgasfreie Applikationsformen stetig an Marktanteil gewinnen. Der HFKW-227ea verliert weiter an Bedeutung als Folge des

²⁶ Barbara Gschrey, Winfried Schwarz, Thomas Kimmel, Bastian Zeiger, Wolfram Jörß, Katja Schumacher, Johanna Cludius (2015): Maßnahmen zur Verbesserung der Marktdurchdringung klimafreundlicher Technologien ohne halogenierte Stoffe vor dem Hintergrund der Revision der Verordnung (EG) Nr. 842/2006, Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 3711 43 324, Mai 2015.

Verschreibungsrückgangs für die beiden einzigen Medikamente mit diesem Treibmittel.²⁷ Der bedeutende inländische Abfüller von medizinischen Dosieraerosolen verwendet HFKW-134a als Treibmittel. Es gibt noch weitere medizinische Aerosole (etwa für antibakterielle Therapie); die verwendeten Treibmittelmengen sind gegenüber den Asthma-Dosieraerosolen allerdings niedrig. Im Jahr 2021 wurde der Emissionsfaktor der Befüllung von Dosieraerosolen im Zuge der Berichterstattung angepasst. Aus Gründen der Vertraulichkeit wird dieser hier aber nicht angegeben.

1.5.4.2 Sonstige Aerosole

Die Emissionen aus nichtmedizinischen Aerosolen waren bereits 1995 niedrig, gemessen an den historischen Mengen Ende der siebziger Jahre des 20. Jahrhunderts. Mit HFKW-haltigen Aerosolen sind heute nur einige technische Sprays (Kälte-, Druckluft- und Reinigungssprays) befüllt, die überwiegend bei Reparaturen an unter Spannung stehenden elektrischen und elektronischen Bauteilen verwendet werden, wo Unbrennbarkeit erforderlich ist. Dazu kommen sogenannte "Novelties". Diese umfassen Dekorationssprays und reine Spaßprodukte, wie z.B. Signalhörner oder Sprays für Luftschlangen oder künstlichen Schnee.

Das Inverkehrbringen von HFKW-haltigen Novelties ist bereits seit dem 4. Juli 2009 durch die EU F-Gase-Verordnung verboten (Annex III, Nr. 9). Technische Aerosole mit HFKW waren nach der aktuellen F-GaseV noch bis Ende 2017 erlaubt (Annex III, Nr. 17). Allerdings gilt sowohl für die Novelties als auch die technischen Aerosole dieselbe Regelung wie bei Montageschaum: Den Treibgasmischungen können HFKW zugesetzt werden, solange das GWP kleiner als 150 bleibt.

Auf dem deutschen Markt werden seit 2013 auch technische Aerosole angeboten, die als Treibmittel den ungesättigten uHFKW-1234ze enthalten. Alle uns bekannten Unternehmen haben bis Ende 2018 fast vollständig auf diesen Stoff umgestellt. Ein Unternehmen bleibt allerdings teilweise bei dem HFKW-134a und verwendet diesen in Mischung mit uHFKW-1234ze (10 % HFKW-134a, 90 % uHFKW-1234ze). Die Verwendungsmengen zu dem uHFKW-1234ze finden sich im Kapitel 2.6. Die HFKW-134a-Einsatzmenge in technischen Aerosolen für die inländische Anwendung im Jahr 2020 wird von den befragten Branchenexperten auf nur noch ca. 2 t geschätzt.

1.5.5 Lösemittel (2.F.5)

HFKW-Lösemittel in industriellen Oberflächenreinigungsanlagen sind von marginaler Bedeutung, weil die Gesetzgebung gegenüber halogenierten Vorläufersubstanzen bereits vor der HFKW-Markteinführung zu einer breiten Palette von Alternativen geführt hatte. Der weltweit wichtigste als Lösemittel verwendete HFKW-43-10mee hat daher in Deutschland keine große Verbreitung gefunden und wird nicht einmal zur Oberflächenreinigung eingesetzt, sondern zum Lösen von Gummiteilen. Jedoch gewinnen in der Oberflächenreinigung in jüngerer Zeit teilfluorierte Ether (HFE) an Bedeutung. Diese unterliegen nicht der nationalen UNFCCC-Berichtspflicht, so dass sie an dieser Stelle nicht berücksichtigt werden, sondern in Kapitel 2.2. Erstmals berichteten wir 2016 (rückwirkend bis 2008) über die beiden flüssigen HFKW-365mfc und HFKW-245fa, soweit sie als Lösemittel eingesetzt wurden. Jedoch handelt/e es sich dabei um nur geringe Mengen.

Ein weiteres fluoriertes Treibhausgas, das auch als Lösemittel eingesetzt wird, ist Perfluorhexan (C₆F₁₄), und zwar in geringem Umfang in der Kunststoffindustrie. Diese Mengen werden unter Lösemitteln mitberichtet.

²⁷ Es handelt sich um Allergospasmin und Aarane mit den Bestandteilen Cromoglicinsäure und Reproterol.

1.5.6 2019 Refinement

In der Kategorie **2.F Anwendungen als ODS-Ersatzstoff** wird im *2019 Refinement*-Bericht ein Schwerpunkt auf Vorgaben für die Erstellung von Emissionsinventaren für Kälte- und Klimaanwendungen in wenigen einfachen Schritten gelegt. Diese Anleitung soll vor allem Ländern dienen, die bislang keine Emissionsabschätzungen durchführen und berichten. Daher ist dieser Teil der Vorgaben für Deutschland nicht relevant, da bereits aufwendige und gut dokumentierte Modelle für Kälte-Klimaanwendungen vorliegen und ausführlich berichtet wird.

1.6 Sonstige Produktherstellung und -verwendung (2.G)

Da es sich in diesem Abschnitt hauptsächlich um SF₆ handelt, wird hier zu Anfang eine Gesamtübersicht über dessen Emissionen gegeben. Außerdem finden sich in diesem Abschnitt auch die vertraulichen Daten, welche unter 2.H.3. berichtet werden (siehe kurze Beschreibung in Kapitel „Andere Bereiche (2.H.3)“).

SF₆-Emissionen sind im Zeitraum 1995 bis 2020 von 308 auf 135 t gesunken, was in CO₂-Äquivalenten einen Rückgang von 7 auf 3 Mio. t ausmacht (siehe Tabelle 11 und Tabelle 12). Dieser Rückgang um ca. 170 t ist vor allem durch das Verbot der SF₆-Befüllung von Autoreifen verursacht. Allerdings trugen auch andere Sektoren zur Emissionssenkung bei. Die Emissionen schwankten seit 2008 bisher in einem Bereich von 129 t bis 168 t. Hierbei verzeichnet das Jahr 2019 die höchsten Emissionen. Im Jahr 2020 hingegen fand ein deutlicher Rückgang statt, welcher auf verminderte Emissionen aus dem Bereich Isolierglasfenster zurückzuführen ist.

Tabelle 11: SF₆-Emissionen und vertrauliche Emissionen (2.H.3) [t] 1995-2020

	1995	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Aluminium- und Magnesiumguss	7,7	13,8	30,5	6,5	2,9	3,2	2,2	2,3
Autoreifen	110,0	50,0	2,7	0,6	0,1	-	-	-
Elektr. Schaltanlagen	27,0	16,8	15,0	12,5	10,6	8,5	8,8	7,8
Halbleiter	2,1	2,5	3,3	0,7	0,9	1,2	1,02	1,2
Schallschutzscheiben	107,8	54,5	62,8	93,0	114,7	144,6	149,3	111,1
SF ₆ -Produktion	7,0	9,0	10,0	3,8	0,06	0,04	0,05	0,04
Solartechnik	-	-	0,86	2,29	-	-	-	-
Spurengas	0,5	0,5	0,5	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
T&D Bauteile	16,6	26,6	12,0	6,2	6,9	3,6	2,7	1,8
Teilchenbeschleuniger	4,9	5,0	4,9	4,1	4,1	4,2	4,2	4,2
Insgesamt	283,60	178,70	142,56	133,69	144,3	169,3	172,3	132,4
Vertrauliche Emissionen 2.H.3: Radar, Schweißen, Optische Glasfasern, Sohlen, Medizin- und Kosmetikprodukte, Wärmeüberträger, Lösemittel								
HFKW, FKW, SF ₆	27,73	34,47	21,32	16,83	12,41	9,93	10,79	7,44
Insgesamt SF₆ inkl. 2.H.3	311,33	213,17	163,88	150,52	156,7	179,3	183,1	139,9

Für die Emissionsabschätzung kann seit dem Berichtsjahr 2006 das Umweltstatistikgesetz (UStatG) genutzt werden. Seit 2007 führt das Statistische Bundesamt jährlich die "Erhebung bestimmter klimawirksamer Stoffe: Schwefelhexafluorid" bei den inländischen Gasehndlern nach deren Abnehmergruppen durch. Die Verbrauchsmengen der Gruppen Schallschutzscheiben, Autoreifen (Kfz-Werkstätten), Flugbetrieb (Radar), Magnesiumguss,

Sekundäraluminium, Solartechnik und optische Glasfasern werden so mit hoher Datensicherheit erfasst.

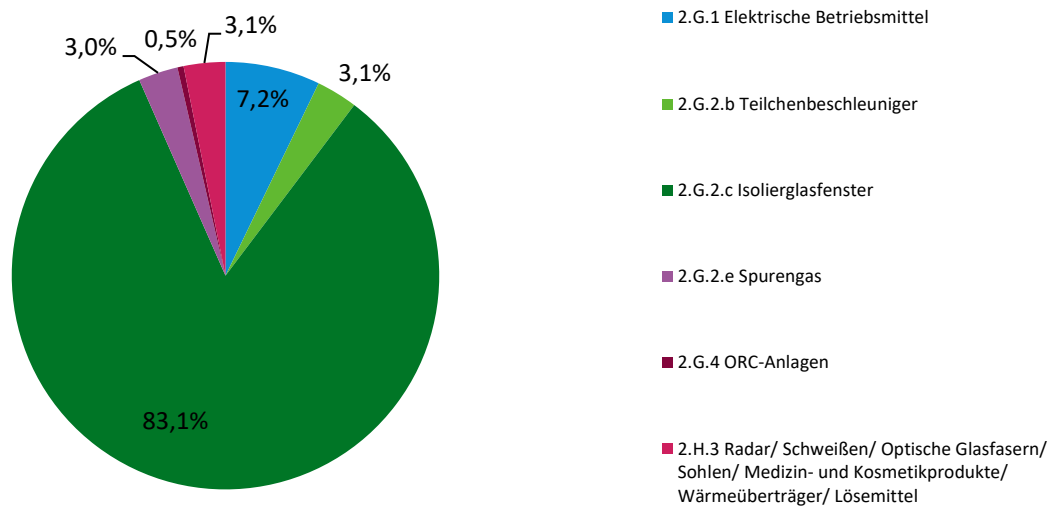
Wir gehen für die kommenden Jahrzehnte von einem Rückgang der SF₆-Emissionen aus, der sich im Jahr 2020 bereits zeigt, wenn die gesetzlichen Maßnahmen zur Emissionsminderung fortgeführt werden. Eine Ausnahme stellen die SF₆-Emissionen aus Schallschutzscheiben dar, die bis etwa 2020 einem starken Anstieg unterliegen und voraussichtlich erst ca. 2034 komplett wegfallen werden. Zu beachten ist, dass die hohen Emissionen aus Schallschutzscheiben nicht auf einen gegenwärtigen Neuverbrauch zurückgehen, sondern bei der Entsorgung alter Scheiben entstehen, die im Durchschnitt 25 Jahre vorher befüllt wurden.

Tabelle 12: SF₆-Emissionen und vertrauliche Emissionen (2.H.3) [Mio. t CO₂-Äquivalente] 1995-2020

	1995	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Aluminium- und Magnesiumguss	0,177	0,315	0,695	0,102	0,065	0,073	0,050	0,052
Autoreifen	2,508	1,140	0,062	0,013	0,001	-	-	-
Elektr. Schaltanlagen	0,616	0,383	0,343	0,285	0,241	0,193	0,201	0,178
Halbleiter	0,049	0,056	0,075	0,017	0,020	0,027	0,023	0,027
Schallschutzscheiben	2,457	1,243	1,432	2,120	2,615	3,297	3,404	2,533
SF ₆ -Produktion	0,160	0,205	0,228	0,086	0,001	0,001	0,001	0,001
Solartechnik	-	-	0,019	0,052	-	-	-	-
Spurengas	0,0114	0,0114	0,0114	0,0912	0,0912	0,0912	0,0912	0,0912
T&D Bauteile	0,378	0,607	0,274	0,142	0,157	0,083	0,062	0,041
Teilchenbeschleuniger	0,103	0,114	0,112	0,094	0,094	0,095	0,095	0,095
Insgesamt	6,459	4,074	3,251	3,002	3,246	3,860	3,927	3,018
Vertrauliche Emissionen 2.H.3: Radar, Schweißen, Optische Glasfasern, Sohlen, Medizin- und Kosmetikprodukte, Wärmeüberträger, Lösemittel								
HFKW, FKW, SF ₆	0,447	0,566	0,277	0,176	0,117	0,136	0,158	0,096
Insgesamt SF₆ inkl. 2.H.3	6,906	4,640	3,528	3,178	3,363	3,996	4,085	3,114

Abbildung 6 stellt die Anteile der verschiedenen Subsektoren der klimawirksamen Emissionen des Sektors 2.G. sowie alle vertraulich zu berichtenden Daten unter 2.H.3 dar (bis auf 2.G.2.d: Autoreifen und Sportschuhe, da hier im Jahr 2020 keine Emissionen angefallen sind).

Abbildung 6: Anteile der klimawirksamen Emissionen bezogen auf CO₂-Äquivalente des Sektors 2.G und 2.H.3 in Deutschland 2020 (%)



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Auch inklusive aller anderen in Sektor 2.G genutzten F-Gase machen die SF₆-Emissionen aus dem Bereich Isolierglasfenster, wie beschrieben, zurzeit noch den größten Anteil an allen klimawirksamen Emissionen aus.

1.6.1 Elektrische Betriebsmittel (2.G.1)

1.6.1.1 Elektrische Anlagen der Energieübertragung und -verteilung

Weltweit ist die SF₆-Anwendung in Schaltgeräten und Schaltanlagen bei weitem die größte, und auch in Deutschland bildet sie den Sektor mit dem höchsten SF₆-Verbrauch. 2016 wurde der höchste Verbrauch seit Beginn der Datenmeldung im Jahr 1995 gemeldet: knapp über 1.000 t. Seitdem ist allerdings ein deutlicher Abwärtstrend zu beobachten, und so sank der Verbrauch im Jahr 2020 auf etwa 539 t. Die große Mehrheit der produzierten Anlagen wird exportiert. Inländische Emissionen entstehen vor allem bei der Herstellung (Forschung und Tests) und im Betrieb, nur zu geringem Teil bei Außerbetriebnahme. Die Gesamtemissionen gingen seit 1995 zurück und sanken bis 2014 auf 9,5 t, 2020 sind Emissionen von 7,8 t zu verzeichnen.

Das Ziel der Hersteller und Betreiber aus der Selbstverpflichtung (SV) von 2005, die Gesamtemissionen bis 2020 auf jährlich 17 t zu begrenzen, wurde bereits im Jahr dieser Selbstverpflichtung eingehalten, und das bei deutlich steigender Produktionsmenge.

Die Netzbetreiber, bei denen die Bestandsemissionen entstehen, haben seit 2008 (ab Berichtsjahr 2007) ein neues System der Datenerfassung für den Bereich der Hochspannung etabliert. Anstelle einer Vollerhebung bei etwa neunzig Netzbetreibern (Hoch- und Mittelspannung), werden die Emissionen anhand ausgewählter Referenzanlagen, an denen sie gemessen werden können, hochgerechnet²⁸. Genauere Informationen hierzu finden sich im vorherigen Inventarbericht der F-Gase, Kapitel 2.7, erschienen 2021²⁹.

²⁸ Winfried Schwarz (2007): Effizientere Datenerhebung für das SF₆-Monitoring der Netzbetreiber in der Hochspannung. Gutachten für den Verband der Netzbetreiber VDN e.V. beim VDEW und den VIK Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V.

²⁹ Warncke, K.; Gschrey, B.; Osterheld, S. (2021): Emissionen fluoriierter Treibhausgase in Deutschland 2017/2018. Daten von HF(C)KW, FKW, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE und PFPME für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für die Berichtsjahre 2017 und 2018. Kapitel 2.7.

Die Emissionsgrenzwerte der Selbstverpflichtung sind im Jahr 2020 ausgelaufen. Dies betrifft aber nicht die weitere Datenerhebung, die wie gewohnt fortgeführt wird. Die verantwortlichen Industrievertreter bestätigen in persönlichen Gesprächen diese Auffassung³⁰.

1.6.1.2 Produktion elektrischer Bauteile für die Energieübertragung (T&D Bauteile)

Hier handelt es sich um Zu- und Anbauten für Schaltanlagen wie Messwandler und Durchführungen, aber auch um Kondensatoren für Umrichter. Diese Bauteile werden seit 2005 getrennt von Schaltanlagen ("elektrische Betriebsmittel") berichtet, um den Stand der im vorigen Abschnitt genannten Selbstverpflichtung, die sich nur auf Schaltanlagen im engeren Sinn bezieht, sichtbar zu machen. Im Jahr 2001 betrugen die Emissionen bei der Herstellung elektrischer Bauteile 27 t und damit mehr als aus Schaltanlagen selbst. Die Industrie hat durch Wiederverwendung und Kreislaufführung des Gases den Verbrauch pro Produkt erheblich verringert, so dass im Jahr 2009 nur noch 8 t Emissionen entstanden. Im Jahr 2020 beliefen sie sich auf 1,7 t. Eine detaillierte Betrachtung der T&D Bauteile findet sich im „Bericht der Kommission zur Bewertung der Verfügbarkeit von Alternativen zu fluorierten Treibhausgasen in Schaltanlagen und damit zusammenhängenden Geräten, einschließlich sekundärer Mittelspannungsschaltanlagen“³¹ ab Seite 10.

1.6.2 SF₆ und FKW aus sonstiger Produktverwendung (2.G.2)

1.6.2.1 Militär - AWACS (2.G.2.a)

Die SF₆-Emissionen aus Radarsystemen sind seit 2010 rückläufig. Ihr Umfang ist vertraulich.

Inventarverbesserung Militär - AWACS (2.G.2.a)

SF₆ wird als Isolationsmedium in großen militärischen Aufklärungsflugzeugen der NAEWF (NATO Airborne Early Warning Force) vom Typ Boeing E-3A (AWACS) im Radarsystem eingesetzt. Es soll elektrische Überschläge in den sog. Hohlleitern zur Antenne verhindern, in denen hohe Spannungen über 135 kV herrschen. Alle übrigen inländischen Radarausrüstungen für Flugzeuge an Bord oder am Boden werden mit geringerer Spannung (bis 30 kV) betrieben, so dass kein SF₆ erforderlich ist, sondern Öl (Silikon I) genügt. Bei der NAEWF-Ausrüstung handelt es sich im Grunde nicht um Bordradars, sondern um in Flugzeuge eingebaute Bodenradarstationen, die hohe Leistungen bringen müssen, aber wenig Platz beanspruchen dürfen.

Die laufenden Emissionen sind betriebsbedingt sehr hoch, da bei jedem Anstieg des Flugzeuges zum Druckausgleich SF₆ bewusst abgelassen wird, das beim Sinkflug immer wieder aus bordeigenen Vorrattanks nachgefüllt wird. Außer den absichtlichen Emissionen gibt es auch noch unbeabsichtigte infolge von Leckagen.

Die NAEWF ist zwar in Geilenkirchen im Nordwesten Deutschlands stationiert, die Flugzeuge fliegen aber über dem gesamten Luftraum der NATO-Mitgliedsländer. Die Leckageverluste werden aber dem Staat zugerechnet, auf dessen Territorium sie bei der Bodenwartung aufgefüllt werden. Die zum Druckausgleich durchgeführten SF₆-Emissionen werden zu 100 % Deutschland zugerechnet.

In Gesprächen mit dem Hersteller von SF₆, Solvay, im Frühjahr 2020 wurde die Information geteilt, dass diese Praxis nicht mehr angewandt, sondern das SF₆ aufgefangen wird.

³⁰ Gespräch mit Thoralf Bohn; Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN) am 29.01.2019.

³¹ Europäische Kommission: BERICHT DER KOMMISSION zur Bewertung der Verfügbarkeit von Alternativen zu fluorierten Treibhausgasen in Schaltanlagen und damit zusammenhängenden Geräten, einschließlich sekundärer Mittelspannungsschaltanlagen. Unter: [https://ec.europa.eu/transparency/documents-register/detail?ref=C\(2020\)6635&lang=de](https://ec.europa.eu/transparency/documents-register/detail?ref=C(2020)6635&lang=de).

Bedauerlicherweise konnten keine Informationen zu dieser Praxis gewonnen werden, da alle weiteren Daten hierzu vertraulich zu sein scheinen. Weder von Solvay noch von der NATO selbst konnten weitere Informationen beschafft werden. Daher kann hier zurzeit keine Inventarverbesserung vorgenommen werden.

1.6.2.2 Teilchenbeschleuniger (2.G.2.b)

Die anhand der Nachfüllungen abgeschätzten SF₆-Emissionen aus der Gesamtheit aller Teilchenbeschleuniger betrugen 2020 etwa 4 t (Gesamtbestand: 73,7 t).

Der Anlagen- und SF₆-Bestand im Hochspannungs-Bereich wird als stabil angenommen. Dies gilt ebenso für den Forschungs- und Entwicklungsbereich, sowie den industriellen Sektor. Bei Strahlentherapiegeräten gehen wir von einer leichten jährlichen Zunahme der Ausstattung der medizinischen Einrichtungen mit entsprechenden Geräten aus.

Halten die bisher beobachteten Trends bei Füllmengen und Emissionen an, so ist mit keiner wesentlichen Emissionsminderung aus diesem Sektor zu rechnen.

1.6.2.3 Isolierglasfenster (2.G.2.c)

Ab Juli 2007 war das Inverkehrbringen von SF₆-haltigen Schallschutzscheiben für Wohnhäuser verboten, ein Jahr später auch für "sonstige Fenster". Der jährliche Neuverbrauch von SF₆ (in den Tabellen dieses Berichts nicht gesondert ausgewiesen) sank dadurch von ehemals 275 t (1995) auf 7 t im Jahr 2008.

Die heutigen und künftigen Emissionen aus dieser Anwendung stammen vorwiegend aus der offenen Entsorgung alter Fenster, 25 Jahre nach der Befüllung des Scheibenzwischenraums. Dieser Vorgang ist die Ursache des Anstiegs der Emissionen um jährlich etwa 5 - 6 t seit dem Jahr 2000. Diese Entsorgungsemissionen nahmen noch bis 2019 zu, und zwar auf etwa 140 t im Jahr. Dieser Anstieg ist vom heutigen Stand der Technik aus gesehen kaum zu verhindern, da entsprechende Entsorgungstechnologien nicht zur Verfügung stehen. Ab 2020 ist aber ein Rückgang der Emissionen zu verzeichnen, im Jahr 2020 bereits auf 111 t, der sich fortsetzen und 2035 bei null liegen wird.

1.6.2.4 Adiabatische Anwendungen – Autoreifen und Sportschuhe (2.G.2.d)

FKW

In diversen Sportschuhen, die früher SF₆ in den Sohlen enthielten, wurde zwischen 2004 und 2006 der FKW-218 als Ersatzgas eingesetzt. Die ersten Emissionen aus der Entsorgung solcher Schuhe traten 2007 auf, da eine durchschnittliche (emissionsfreie) Nutzungsdauer von drei Jahren angenommen wird. 2009 war rechnerisch das letzte Jahr mit Emissionen aus dieser Quelle.

SF₆

Emissionen aus der Anwendung Sportschuhsohlen spielen seit 2007 keine Rolle mehr. Der Sportartikelhersteller setzte in neuen Schuhen seit 2004 kein SF₆ mehr ein, sondern den oben genannten FKW-218 (beide Gase sind durch die EU F-Gase-Verordnung in neuen Schuhen seit Juli 2006 verboten).

Seit Mitte der 1990er Jahre ist die Anwendung von SF₆ zur Befüllung von Autoreifen rückläufig. Als Folge erfolgreicher Umweltaufklärung war der Verbrauch von über 100 t am Ende der 1990er Jahre bis auf 1 t im Jahr 2008 zurückgegangen. Offenbar wegen des Verbots dieser Anwendung durch die EU F-Gase-Verordnung ab 4. Juli 2007 haben Kfz-Werkstätten im Jahr 2006 noch einmal über 3 t auf Kundenwunsch in Reifen gefüllt. Da Emissionen etwa drei Jahre

nach der Befüllung bei der Demontage der Reifen entstehen, war daher im Jahr 2009 noch einmal ein erheblicher Anstieg zu verzeichnen. Im Jahr 2014 beliefen sich die Emissionen auf noch ca. 50 kg, welche sich aus dem letzten Jahr mit Befüllung (2012) erklären lassen. Im Jahr 2015 sind keine Emissionen aus diesem Sektor mehr vorhanden, da es ein Verbot in der Verordnung (EU) Nr. 517/2014 gibt.

1.6.2.5 Sonstige: Spurengas, Schweißen, optische Glasfasern, medizinische und kosmetische Anwendungen (2.G.2.e)

Spurengas (SF₆)

Im Jahr 2015 wurden die Anwendungsgebiete von SF₆ als Spurengas überprüft. Als Hauptemissionsquelle stellten sich Funktionstests von Laborabzügen heraus. Die ehemals angenommenen 200 kg/Jahr haben sich als deutlich zu niedrig erwiesen, denn die verwendeten Mengen von SF₆ sind in dieser Anwendung relativ groß und liegen bei etwa 4 t pro Jahr. Dieser Wert wird, wie ehemals die 200 kg, nun seit 2007 rückwirkend angenommen und fortgeschrieben.

Schweißen (SF₆)

Bei der Anwendung Schweißtechnik kommt es zu Schwankungen im Verbrauch, die mit der Automobilkonjunktur zusammenhängen, weil die Anwender Zulieferer der Autoindustrie sind. Im Jahr 2018 haben wir erstmal die Meldung bekommen, dass in diesem Bereich kein SF₆ mehr eingesetzt wurde.

Optische Glasfasern (SF₆)

Die Verwendung von SF₆ bei der Produktion optischer Glasfasern ist in Deutschland relativ neu. Das Gas wird zur Fluorotierung eingesetzt. Mangels Angabe in den IPCC-Richtlinien hatten wir, gestützt auf Aussagen von Branchenexperten, den Emissionsfaktor vorläufig mit 70 % angesetzt. Der Verbrauch betrug 2008 etwa 7,6 t und sank im Krisenjahr 2009 auf 4,5 t. Im Jahr 2013 erreichte die Einsatzmenge ihren bisherigen Höchststand von 14,4 t. Dieser wurde 2020 mit einer Einsatzmenge von 42 t noch deutlich überboten.

Um für die Inventarverbesserung einen soliden Emissionsfaktor zu gewinnen, wurde im Herbst 2016 im Umweltbundesamt ein Fachgespräch mit Experten aus Produktion und Wissenschaft durchgeführt. Dort wurden die bei der Herstellung entstehenden Emissionen abgeschätzt; außerdem hatte einer der deutschen Hersteller angekündigt, Messungen durchzuführen, deren Ergebnisse Ende 2016 vorlagen. Die Ergebnisse dieser Messungen bestätigen die im Fachgespräch geäußerten Einschätzungen der nahezu vollständigen Zerstörung des SF₆ im Prozess der Dotierung. Folglich nehmen wir für das F-Gas-Inventar einen sehr kleinen Emissionsfaktor an, der aber der Vertraulichkeit unterliegt.

Einzelheiten zu der Anwendung von SF₆ für die Herstellung von optischen Glasfasern finden sich im Bericht „Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland 2015“.

Medizinische und kosmetische Anwendungen (FKW)

Der seit 2013 neu zu berichtende Stoff Perfluorodecalin (PFD; C₁₀F₁₈) wird in kosmetischen und medizinischen Anwendungen eingesetzt, was durch das ursprüngliche Einsatzgebiet als FKW-basiertes Blutersatzmittel erklärt werden kann. Perfluorodecalin wird unter der Produktbezeichnung „Flutec PP6“ vom britischen Hersteller F2 Chemicals vermarktet. C₁₀F₁₈ wird seit dem Jahr 2000 nach Deutschland eingeführt. Die jährlichen Importe von C₁₀F₁₈ als Bulkware wurden uns vom Hersteller F2 Chemicals, UK, vertraulich zur Verfügung gestellt. Sie sind dem Umweltbundesamt bekannt, können aber hier aus Vertraulichkeitsgründen nicht wiedergegeben werden.

Die Einsatzkonzentration von Perfluordecalin liegt bei 0,1 % pro Artikel. Bei allen beschriebenen Anwendungen von Perfluordecalin ist von vollständigen Emissionen aufgrund der raschen Verdampfung dieses Stoffes auszugehen.

1.6.3 ORC-Anlagen (2.G.4)

In Anlagen zur Elektrizitätsgewinnung, die auf dem Organic Rankine Cycle (ORC) basieren, kommen anstelle von Wasser verschiedene Substanzen als Arbeitsmittel in Frage, die bei niedrigeren Temperaturen verdampfen. Für Geothermieranlagen wurden oft Kohlenwasserstoffe wie Isobutan verwendet. Seit 2011 werden in neuen geothermischen ORC-Anlagen auch HFKW eingesetzt – wie der HFKW-365mfc (in Mischung mit dem perfluorierten Polyether Galden® HT-55) oder der HFKW-245fa. Zuvor wurde auch der HFKW-134a verwendet; sogar ein FKW (C_5F_{12}) war vorübergehend zum Einsatz gekommen.

Die ORC-Arbeitsmittel haben wir erstmals 2012 berichtet, als nach etwa acht Jahren ohne nennenswerte Einsatzmengen ein sprunghafter Anstieg auf über 170 t HFKW-Bestand zu verzeichnen gewesen war. Seit 2016 hat sich der Zuwachs des Bestands spürbar verlangsamt. Nachdem für den HFKW-365mfc für das Jahr 2016 keine Mengen berichtet wurden, d.h. ein Nullverbrauch, gab es 2017 wieder einen sehr geringen Verbrauch. Im Jahr 2020 allerdings wieder ein Nullverbrauch. Neue geothermische Großanlagen wurden nicht gebaut. Die von den Herstellern Solvay und Honeywell vertraulich mitgeteilten Verkaufsmengen (ohne die Mischungskomponente Galden) lagen signifikant unter denen der Jahre 2011 und 2012.

Die Emissionen des Jahres 2020 aus Befüllung und Betrieb schätzen wir auf knapp 13 t (nur HFKW).

FKW

Der Stoff C_5F_{12} (GWP 9.160) unterliegt ebenfalls der UNFCCC-Berichterstattung. In Gschrey et al 2015 wurden seine potenziellen Einsatzgebiete beschrieben: Lösemittel zur Präzisionsreinigung, Kontrastmittel, Wärmeüberträger. In Deutschland spielten diese Anwendungen nach unseren Recherchen aber keine Rolle.

Dieser FKW wurde dagegen ab 2003 als Arbeitsfluid in einer ORC-Anlage verwendet (Füllmenge 450 kg), die im Jahr 2010 wieder außer Betrieb genommen wurde. Die Emissionen aus dem Betrieb beliefen sich in der aktiven Zeit auf knapp 20 kg pro Jahr.

1.6.4 2019 Refinement

In der Kategorie **2.G Sonstige Produktherstellung und -verwendung** werden als neue Anwendungsfelder von F-Gasen die Abdichtung von Leiterplatten und die Textilindustrie genannt.

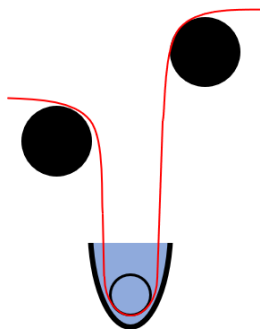
Im deutschen Inventar wird erstere bereits abgedeckt, nämlich die Verwendung von Lösemitteln für Polymere zur **Oberflächenbeschichtung in der Elektronik**, berichtet in der Kategorie 2.E. In der elektronischen Fertigung werden oft bestückte Leiterplatten, elektronische Bauelemente oder diverse Festplattenkomponenten mit einem Schutzfilm überzogen, der gegen Feuchtigkeit aus der Luft oder bestimmte Lösemittel abweisend wirken soll. Es handelt sich nicht um üblichen Schutzlack, sondern um sogenannte Oberflächen-Modifizierungsmittel (englisch: "surface modifier"). Der Lack besteht aus 2 bis 15 Prozent Feststoff (fluorhaltiges Acrylatpolymer), der in 85 bis 98 Prozent HFE-7100 oder HFE-7200 gelöst ist. Wir haben diesen Anwendungsbereich bereits in unser Inventar implementiert und werden die Daten, sobald eine stabile Datenlieferung gesichert ist, freiwillig unter 2.H.3 berichten.

Der Einsatz von F-Gasen für nasschemische Verfahren sowie Plasmaprozesse in der **Textilindustrie** zur Behandlung von Textilien, Teppichen und Leder (außerdem Papierfasern) wird als weitere Anwendung genannt, die zu relevanten Emissionen sowie Nebenprodukten mit hohem Treibhauspotenzial führen kann. Die Ausrüstung textiler Oberflächen mit wasser- und ölabweisenden Eigenschaften ist in den Bereichen Sport-, Outdoor- oder Berufsbekleidung für den Regenschutz bzw. die Schmutzabweisung gewünscht, bei persönlicher Schutzausrüstung und medizinischer Bekleidung (OP-Textilien) wegen der erforderlichen Schutz- und Barrierewirkung notwendig. Zumeist geschieht dies mit (Per)Fluorkohlenstoffpolymeren auf nasschemischem Wege³².

Dabei werden im Prozess der Beschichtung von Fasern Perfluoralkylcarbonsäuren (PFCAs) und Perfluoralkansulfonsäuren (PFSAs) verwendet, welche als sogenannte „C8“-Chemie bezeichnet werden, weil sie 8 Kohlenstoffatome enthalten. Die Stoffgruppe umfasst mehr als 4.700 verschiedene Verbindungen. Während des Herstellungsprozesses können sich perfluoralkylierte Säuren bilden, genauer gesagt Perfluoroktansulfonsäure (PFOS) und Perfluoroktansäure (PFOA). Diese beiden Chemikalien sind aufgrund ihrer persistenten und bioakkumulativen Natur besonders gefährlich. Aufgrund dieser Tatsache, die bereits seit Längerem bekannt ist, wurde die Verwendung von C8-fluorierten Polymeren in Textilien, Teppichen, Leder und Papier teilweise eingeschränkt. Als Alternative nutzt die Industrie Stoffe mit weniger Kohlenstoffatomen, die sog. „C6“-Chemie³³. Zu den kurzkettigen PFCA gehören Perfluorbutansäure (PFBA), Perfluorpentansäure (PFPeA), Perfluorhexansäure (PFHxA) und Perfluorheptansäure (PFHpA). Kurzkettige PFAS werden nach der Aufnahme in den menschlichen und Säugetierorganismus schneller ausgeschieden als diejenigen mit längeren Kohlenstoffketten³⁴.

Nasschemische Verfahren umfassen eine Vielzahl von Anwendungen, allerdings wird in über 80 % der Fälle der sogenannte Foulard-Prozess (siehe Abbildung 7) genutzt. Dabei wird der trockene Stoff in Bahnen über große Rollen zunächst durch die entsprechende (fluorierte) Flüssigkeit geleitet, dann über Walzen gepresst und im Anschluss getrocknet.

Abbildung 7: Schema Foulard-Prozess



Quelle: Eigene Abbildung, Öko-Recherche

Andere nasschemische Verfahren sind Vakuumextraktion, Sprühanwendungen, Schaumveredelung, Beschichtung und Laminierung. Dabei unterscheiden sich je Material und

³² Mohr, A., Geng, J (2016): Ressourceneffiziente und umweltentlastende Hydrophob und Oleophob-Ausrüstung von Textilien mittels Plasmatechnik als Alternative zu nasschemischen Fluorkohlenstoffimprägnierungen. Studie im Auftrag der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

³³ 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

³⁴ BfR (2020): Fragen und Antworten zu per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS), FAQ des BfR vom 21. September 2020. <https://mobil.bfr.bund.de/cm/343/fragen-und-antworten-zu-per-und-polyfluorierten-alkylsubstanzen-pfas.pdf>.

Technik sowohl Druck- als auch Temperaturverhältnisse. Jede Unterscheidung kann potentiell zu anderen Emissionen führen.

Eine Alternative zu diesen Methoden ist, wie bereits genannt, die Plasmabeschichtung mit gas-, dampf- und aerosolförmige Präkursoren³⁵. In diesem Fall werden FKW, wie C₃F₆, CF₄ oder C₄F₈, verwendet. Die Aufbringung erfolgt dabei in komplett geschlossenen Kammern, dabei wird das Gas je Technik in unterschiedlichem Maße umgesetzt (bei gasförmigen Präkursoren bleibt das Gas etwa zu 10 % unverbraucht). Restmengen können aber durch ein Hochleistungs-Mikrowellenplasma (Brenner) aufgespalten und in einem gewerblich erhältlichen Gaswäscher reduziert werden.

Wie auch im *2019 Refinement*-Bericht beschrieben, gibt es keine Daten zum Umfang des Einsatzes des Plasma-Prozesses. Gespräche mit Experten haben diese aber für Deutschland als selten eingestuft, da die Umsetzung kompliziert und die Präkursoren teilweise sehr teuer sind.

Bis zum jetzigen Zeitpunkt liegen, wie auch im *2019 Refinement*-Bericht beschrieben, keine umfassenden Daten zu Emissionen aus der Herstellung von Textilien, Teppichen, Leder oder Papier vor. Diese Aussagen können durch weitere Quellen verifiziert werden: Zum einen durch eine Antwort von TEGEWA³⁶ aus der „Contribution for Public Consultation on Annex XV restriction report PFHxA“³⁷. In dieser gibt der Verband auf die Frage zu Emissionen von PFHxA, dessen Salzen und zugehörigen Substanzen, welche auch aus Fluorpolymeren stammen können, an, keine Informationen zu diesem Thema zu haben.

Des Weiteren beschäftigt sich der bereits zitierte, bislang unveröffentlichte Bericht „A systemic view on fluorinated polymers and plastics in a low carbon, circular and non-toxic economy.“ mit der allgemeinen Nutzung von Fluorpolymeren und gibt als Wissenslücke an, dass für eine Vielzahl der Stoffe keine Kenntnis über die Einsatzmengen oder chemischen Eigenschaften, vor allem von in der Produktion als Nebensstoffe eingesetzten Substanzen, bestehe³⁸. Dazu gehört auch das für die Emissionsberichterstattung so wichtige Treibhauspotenziale (GWP) der Substanzen.

Der *2019 Refinement*-Bericht schlägt zur Ermittlung von Emissionen aus diesem Sektor konkret Messungen vor. In Anbetracht der immensen Wissenslücken in Bezug auf die unterschiedlichen Prozesse sowie genutzten Stoffe inklusive deren Eigenschaften ist es uns im Zuge dieser Berichterstattung nicht möglich, Emissionen für den Sektor Textil zu ermitteln. Um zu repräsentativen Ergebnissen kommen zu können, bedürfte es eines umfangreichen Forschungsprojektes.

³⁵ Ein Molekül, das als Ausgangsprodukt in eine Reaktion eingeht.

³⁶ Verband der Hersteller von Textil-, Papier-, Leder- und Pelzhilfs- und -farbmitteln, Tensiden, Komplexbildnern, Antimikrobiellen Mitteln, Polymeren Flockungsmitteln, Kosmetischen Rohstoffen und Pharmazeutischen Hilfsstoffen oder verwandten Produkten e. V.

³⁷ TEGEWA (2020): TEGEWA Contribution for Public Consultation on Annex XV restriction report PFHxA. https://www.bayerische-chemieverbaende.de/wp-content/uploads/2020/05/2020-05-13-annex-to-tegewa-on-pc_pfhxa-restriction_section-iii.-non-conf....pdf.

³⁸ EEA (2021, Veröffentlichung ausstehend): A systemic view on fluorinated polymers and plastics in a low carbon, circular and non-toxic economy.

1.7 Andere Bereiche (2.H.3)

In diesem Abschnitt werden alle Anwendungen berichtet, welche der Vertraulichkeit unterliegen. Dazu gehören die Wärmeüberträger (2.E.4), Lösemittelanwendungen (2.F.5) sowie aus der Quellgruppe 2.G.2 AWACS, Verwendung für Schuhsohlen, Schweißen, optische Glasfasern und die Anwendung als Medizinprodukte. Die Anwendungsbereiche werden, soweit möglich, bereits in den vorherigen Kapiteln beschrieben.

2 Fluorierte Treibhausgase für die freiwillige Berichterstattung

Die verpflichtende F-Gase-Berichterstattung unter UNFCCC umfasst die in den vorausgehenden Kapiteln behandelten Substanzgruppen HFKW und FKW sowie die Einzelsubstanzen SF₆ und NF₃.

Der Artikel 19 der EU F-Gase-Verordnung fordert ab 2015 eine Berichterstattung zusätzlicher fluoriierter Verbindungen, soweit sie im Anhang II der Verordnung aufgelistet sind, nämlich:

- ▶ ungesättigte teilchlor(fluorierte) Kohlenwasserstoffe,
- ▶ fluorierte Ether inklusive hydrofluorierter Ether (HFE) und perfluorierter Polyether (PFPMIE),
- ▶ weitere fluorierte Verbindungen wie SF₅CF₃.

Berichtspflichtig gegenüber der EU-Kommission sind allerdings nicht einzelne EU-Mitgliedsländer, sondern die Unternehmen, die in der EU solche Stoffe herstellen, ein- oder ausführen. Die berichteten Mengen werden nicht nach Ländern aufgegliedert, sondern beziehen sich auf die EU insgesamt.

Das Umweltbundesamt hat sich dafür entschieden, für Deutschland auch diese Stoffe im nationalen Rahmen zu erfassen und im Zentralen System Emissionen (ZSE) zu sammeln, um sie auf freiwilliger Basis zu berichten. Wie für die unter UNFCCC berichtspflichtigen F-Gase sollen auch für die zusätzlichen Substanzen die Aktivitätsraten Neuverbrauch, Bestand und Entsorgungsmengen sowie die dazu gehörigen Emissionen abgeschätzt werden, und zwar ab dem ersten Einsatzjahr bis zur Gegenwart.

Öko-Recherche hat im November 2015 eine Studie für das Umweltbundesamt vorgelegt, worin die Anwendungsgebiete fast aller zusätzlichen Substanzen und die Zeitreihen ihrer Aktivitätsdaten und Emissionen dargestellt werden (Gschrey et al. 2015). Auf dieser umfassenden Studie aufbauend haben wir 2016 erstmals die entsprechenden Daten berichtsmäßig implementiert. Im vorliegenden Bericht liefern wir darauf aufbauend die Daten für die Jahre 2019 und 2020. Dabei nehmen wir an mehreren Stellen Rekalkulationen und Korrekturen für vorausgehende Jahre vor.

Aus Vertraulichkeitsgründen werden die Emissionen häufig nur aggregiert und in CO₂-Äquivalenten angegeben.

2.1 Ungesättigte teilfluorierte Kohlenwasserstoffe

In den letzten Jahren wurden uHFKW von den amerikanischen Herstellern Chemours und Honeywell entwickelt und seit 2011 in den Markt eingeführt. Mengenrelevante Reinstoffe sind bisher in Deutschland vor allem der uHFKW-1234yf (GWP 4) und der uHFKW-1234ze(E) (GWP 7). In kommerziellem Maßstab wird der uHFKW-1234yf bisher ausschließlich als Kältemittel eingesetzt, der uHFKW-1234ze(E) als Treibmittel für XPS-Dämmstoffe, technische Aerosole und als Kältemittel in Chillern.

Als Kältemittel wird der Reinstoff uHFKW-1234yf seit 2012 in Klimaanlage neuer Pkw-Modelle als Alternative zu R134a eingesetzt, bisher überwiegend in Importfahrzeugen. Im Jahr 2020 waren in Deutschland fast alle neu zugelassenen klimatisierten Fahrzeuge mit R1234yf ausgestattet; einige Modelle auch mit CO₂. Der inländische Bestand von R1234yf in Fahrzeugklimaanlagen stieg dadurch auf 8.240 t (zum Vergleich R134a: 18.299 t).

Die MAC-Richtlinie gilt auch für die Gruppe 1 der kleinsten Gewichtsklasse der Nutzfahrzeuge N1. Aus diesen Gründen werden seit 2016 Nutzfahrzeuge N1 zunehmend ebenfalls mit R1234yf klimatisiert.

Seit 2013 kommt ein ungesättigter HFKW als Reinstoff-Kältemittel auch in stationärer Anwendung vor. Erstmals wurden in Deutschland Kaltwassersätze produziert, die als Kältemittel nicht R134a, sondern R1234ze verwenden. Außerdem wurde der chlorhaltige Stoff uHFKW-1233zd (E) (GWP 5) in Turbochillern eingeführt. Letztere Entwicklung ist allerdings erst sehr langsam, seit 2017 angelaufen.

Nicht als Reinstoff, sondern als Mischungskomponente wird R1234yf bisher in mehreren kommerziell verfügbaren Kältemitteln eingesetzt, nämlich in R448A (Anteil von R1234yf: 20 %), R449A (Anteil 25 %), R452A (Anteil 30 %), R455A (Anteil 75,5 %), R454C (Anteil 78,5 %) und R513A (Anteil 50 %). R1234ze ist nur in einem der drei genannten Gemische enthalten, nämlich mit 7 % in R448A. Mengenmäßig ist R449A (GWP 1397) am wichtigsten: Insgesamt über 1.000 t dieser Mischung kamen in bestehenden Kälteanlagen von Supermärkten zum Einsatz, und zwar als Ersatz für R404A. Auch R448A (GWP 1387) hat in dieser Anwendung deutlich an Bedeutung gewonnen und kommt auf einen Bestand von etwa 270 t. Der Ersatz von R404A in Altanlagen ist durch die F-GaseV nicht vorgeschrieben. Seit 2018 ist lediglich die Nachfüllung mit R404A-Frischware verboten. Der Einsatz der beiden Gemische in Bestandsanlagen ist somit freiwillig. Allerdings führten die ab 2018 massiven Preissteigerungen und Verknappung von R404A (bzw. die Einstellung des Verkaufs durch mehrere Importeure) in vielen Fällen zur Einführung dieser Drop-in-Kältemittelgemische.

Im Jahr 2015 wurde erstmalig R452A (GWP 2140) eingesetzt, nämlich von einem großen Hersteller von Kälteaggregaten für große Kühlfahrzeuge. Auch hier ist der Zweck der Ersatz von R404A. Allerdings werden nicht nur Altanlagen umgerüstet, sondern es handelt sich um Neubefüllungen. Mittlerweile haben alle in diesem Segment tätigen Unternehmen fast ihre gesamten Neuanlagen auf R452A umgestellt. Die Einsatzmenge von R452A wird für 2020 auf bereits 147 t geschätzt (2016 waren es erst 9 t), darin 44 t R1234yf. R452A kommt außerdem seit 2018 in Kühlcontainern zum Einsatz.

R455A und R454C kommen in Verflüssigungssätzen und steckerfertigen Geräten zur Anwendung. Dies aber erst seit 2019 und nur in sehr geringem Maße.

R513A wird nicht nur in Chillern verwendet, sondern auch in Kühlcontainern und gewerblichen Spülmaschinen.

uHFKW werden auch als Treibmittel für die Herstellung von XPS-Dämmstoffen und in bestimmten technischen Aerosolen eingesetzt. Dabei handelt es sich bisher ausschließlich um uHFKW-1234ze, und zwar als Reinstoff. Die verwendeten Mengen sind nicht unbeträchtlich und liegen für beide Anwendungen zusammen bei ca. 250 t (getrennte Angaben aus Vertraulichkeitsgründen nicht möglich).

Tabelle 13: Emissionen ungesättigter HFKW in Tonnen und kt CO₂-Äquivalenten 2012, 2015, 2017-2020

Substanz	Sektor	2012	2015	2017	2018	2019	2020
uHFKW-1234yf	Pkw-Klima-Anlagen	0,9	33,99	320,45	498,89	681,46	831,51
uHFKW-1234yf	Nutzfahrzeuge N1	-	-	0,21	0,42	3,51	6,09
uHFKW-1234yf	R448A, 449A Supermärkte	-	1,08	13,09	21,43	27,31	31,89
uHFKW-1234yf	R449A Verflüssigungssätze	-	-	0,19	0,37	0,57	0,79
uHFKW-1234yf	R455A Verflüssigungssätze + steckerfertige Geräte	-	-	-	-	0,12	0,36
uHFKW-1234yf	R454C Verflüssigungssätze + steckerfertige Geräte	-	-	-	-	-	0,10
uHFKW-1234yf	R452A Kühlfahrzeuge	-	0,06	1,50	3,47	5,47	7,02
uHFKW-1234yf	R452A Kühlcontainer	-	-	-	-	0,01	0,02
uHFKW-1234yf	R513A Kühlcontainer	-	-	-	-	0,02	0,04
uHFKW-1234yf	R513A Spülmaschinen	-	-	-	-	0,08	0,15
uHFKW-1234ze	R448A Supermärkte	-	0,02	0,9	1,75	2,37	2,86
uHFKW-1234ze	Verflüssigungssätze	-	-	-	-	0,16	0,47
uHFKW-1234ze	Große Chiller	-	0,15	1,13	4,24	7,90	12,19
uHFKW-1234ze	XPS und techn. Aerosole	-	34,33	99,81	78,66	165,37	140,34
uHFCKW-1233zd	Turbochiller	-	-	0,09	0,06	0,08	0,08
uHFKW-1234yf	Summe Emissionen in kt CO₂-Äq.	0,001	0,039	0,383	0,606	0,837	1,028
uHFKW-1234ze	Summe Emissionen in kt CO₂-Äq.	-	0,016	0,713	0,593	1,229	1,089
uHFCKW-1233zd	Summe Emissionen in kt CO₂-Äq.	-	-	0,00045	0,00030	0,00040	0,00040

GWP uHFKW-1234yf: 4; GWP uHFKW1234ze(E): 7; GWP uHFCKW-1233zd (E): 5 (nach EU F-Gase-Verordnung)

2.2 Hydrofluorierte Ether (HFE)

Die Anwendung von hydrofluorierten Ethern (HFE) wurde in Gschrey et al. 2015 beschrieben. Dort werden Mengendaten für den Zeitraum 2000 bis 2012 präsentiert. In diesem Bericht werden die Emissionen in t CO₂-Äquivalenten für die Jahre 2019 und 2020 hinzugefügt. Die Haupteinsatzgebiete von HFE sind erstens offene und geschlossene Anwendungen in der Industrie und zweitens die medizinische Anästhesie.

2.2.1 HFE in der Industrie

HFE für industrielle Anwendungen werden in Deutschland von der Firma 3M geliefert, die nach unserer Kenntnis diese Substanzen in den USA herstellt. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um vier Produkte der "7000er"-Reihe, nämlich um HFE-7100, HFE-7200, HFE-7300 und HFE-7500. Das Treibhauspotenzial dieser HFE ist deutlich niedriger als das der meisten gesättigten HFKW. Die GWP-Werte reichen von 59 (HFE-7200) bis 310 (HFE-7300). Der HFE-7100 liegt mit einem GWP von 297 dazwischen. In den meisten Anwendungen kommen die HFE-Typen nicht einzeln vor, sondern mehrere HFE-Typen gleichzeitig, die außerdem innerhalb einer Anwendung in ihrer Zusammensetzung wechseln können. Die Firma 3M meldet uns auf freiwilliger Basis die Summe der Verkäufe der HFE zwar getrennt nach offenen und geschlossenen Anwendungen, aber nicht nach den einzelnen Substanzen der Reihe.

Von 2002 bis 2011 produzierte auch Solvay Solexis (seit 2013 Solvay Specialty Polymers Italy S.p.A.) in Italien einen HFE, der auf den deutschen Markt gelangte. Bei diesem H-Galden genannten HFE handelt es sich um eine Gruppe mehrerer Einzelsubstanzen, die sich durch ihre Siedepunkte voneinander unterscheiden. H-Galden hat ein relativ hohes GWP (1870) und war konzipiert, um die Gruppe perfluorierter Polyether (PFPE) aus der Reihe "Galden" abzulösen, die ein extrem hohes GWP um 10.000 aufweisen. H-Galden konnte sich allerdings nicht am Markt behaupten; seine Produktion wurde 2011 eingestellt. Aktuelle Restverkäufe dienen der Nachfüllung. H-Galden wird nicht in offenen Anwendungen eingesetzt, sondern in geschlossenen Systemen der Halbleiterindustrie als Wärmeüberträger-Flüssigkeit.

Offene Anwendungen in der Industrie

HFE der "7000er"-Reihe kommen u.a. in Schmierstoffen, in der Präzisionsreinigung und in der Oberflächenbeschichtung von Elektronikbauteilen zum Einsatz. Diese offenen Anwendungen sind in der deutschen Industrie recht weit verbreitet. Besonders die Entwicklung in der Automobilindustrie trägt zu wachsendem Absatz dieser HFE bei.

Lösemittel für Polymere zur Oberflächenbeschichtung in der Elektronik

In der elektronischen Fertigung werden oft bestückte Leiterplatten, elektronische Bauelemente oder diverse Festplattenkomponenten mit einem Schutzfilm überzogen, der gegen Feuchtigkeit aus der Luft oder bestimmte Lösemittel abweisend wirken soll. Es handelt sich nicht um üblichen Schutzlack, sondern um sogenannte Oberflächen-Modifizierungsmittel (englisch: "surface modifier"). Der Lack besteht aus 2 bis 15 Prozent Feststoff (fluorhaltiges Acrylatpolymer), der in 85 bis 98 Prozent HFE-7100 oder HFE-7200 gelöst ist. Das Lösemittel verdunstet bei der Anwendung. Daher sind Verbrauch und Emissionen größengleich (Emissionsfaktor 100 %). Wir schätzen Verbrauch/Emission von HFE in dieser Anwendung auf Basis eigener Berechnungen für 2019 auf ca. 3,9 kt CO₂-Äquivalente und für 2020 auf 3,5 kt CO₂-Äquivalente.

Trägerflüssigkeit für Schmierstoffe

Die Verwendung als Trägermittel bzw. Lösemittel für Schmierstoffe bildet mit 5,4 kt CO₂-Äquivalenten im Jahr 2020 den größten Einzelposten des HFE-Absatzes von 3M Deutschland. Es handelt sich überwiegend um HFE-7100, HFE-7200 und HFE-7300.

Lösemittel in der Oberflächenreinigung

International werden Lösemittel in der Präzisionsreinigung und generell in der Elektronik als Hauptanwendung flüssiger HFE genannt. Anders als etwa in den USA, Japan oder auch in Frankreich spielen in Deutschland fluoridierte Medien in der Präzisionsreinigung aber nur eine marginale Rolle. Erst seit 2005 gibt es in Deutschland in nennenswertem Umfang Reinigungsanlagen mit HFE, und zwar meistens mit HFE-7100. Diesem wird zur Verbesserung der Reinigungsleistung oft Isopropanol zugesetzt. Die jährlichen Einsatzmengen in Deutschland sind 2020 deutlich angestiegen und liegen bei etwa 2,9 kt CO₂-Äquivalenten.

Tabelle 14: Emissionen von HFE (-7100, -7200, -7300, -7500) aus offenen industriellen Anwendungen [kt CO₂-Äquivalente] 2000-2020

Offene HFE-Anwendungen	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Summe [kt CO ₂ -Äq.]	1,081	6,600	8,787	11,684	13,983	12,882	12,001

Geschlossene Anwendung in der Halbleiter- und sonstigen Industrie

In der Halbleiterindustrie wird eine Reihe von fluoridierten Wärmeüberträgern zur Kühlung von Prozessschritten als Wärmeüberträger (Heat-Transfer-Fluid; HTF) eingesetzt (siehe Abschnitt 1.4.3). HFE sind als Alternativen zu vollfluoridierten Substanzen konzipiert, da sie aufgrund ihres Gehalts von Sauerstoff und Wasserstoff ein niedrigeres GWP aufweisen. Auch Solvay Specialty Polymers hat 2002 entsprechende Produkte ins Programm aufgenommen, und zwar HFE aus der H-Galden-Reihe. Wie bereits erwähnt, konnte sich diese HFE-Reihe am Markt nicht behaupten.

Die Hauptanwendung der HFE ist die Halbleiterindustrie, wo fluoridierte Wärmeüberträger in zahlreichen Abschnitten der Waferproduktion eingesetzt werden, weil klar definierte Prozesstemperaturen erforderlich sind. Zusätzlich zur Halbleiterindustrie kommen, allerdings in geringerem Umfang, HFE in diversen sonstigen Industrieanwendungen vor, wo Prozesse und Geräte mit konstanten Temperaturen gekühlt werden müssen. Nach Auskunft der Firma 3M nimmt die deutsche Halbleiterindustrie über die Hälfte der HFE in geschlossenen Anwendungen ab, die allgemeine Industrie den restlichen Anteil. Die – auslaufende - Anwendung der HFE der H-Galden-Reihe ist dagegen auf die Halbleiterindustrie beschränkt.

Unsere Emissionsabschätzung für HFE als Wärmeüberträger ist in der folgenden Tabelle 15 wiedergegeben. Inkludiert sind aufgrund der Vertraulichkeit der Werte nicht nur die HFE-7000er-Reihe (Durchschnitts-GWP: 222), sondern auch H-Galden (GWP: 1870). Es sei angemerkt, dass wir im Unterschied zu Gschrey et al. 2015 nicht mehr von einer Bestands-Emissionsrate von 10 % ausgehen, sondern aufgrund von Gesprächen mit Anwendern und Herstellern von Kühlanlagen für die Waferbearbeitung von 5 %.

Tabelle 15: Wärmeübertragung: HFE-Emissionen in der Halbleiter- und sonstigen Industrie [kt CO₂-Äquivalente] 2000-2020

Geschlossene HFE-Anwendungen	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Summe [kt CO ₂ -Äq.]	0,36	1,19	2,18	1,66	1,35	1,36	1,36

Emissionsfaktoren: Befüllung: 1 %; Bestand: 5 %; Entsorgung: 10 %.

2.2.2 HFE als Narkosegase in der Medizin

Überblick über die halogenierten Narkosegase in Deutschland seit 1990

Die drei heute in Deutschland genutzten fluorierten Narkosemittel für inhalative Vollnarkosen in der Humanmedizin (geschätzte Anteile nach Anwendungsfällen in Klammern) sind Sevofluran (> 65 % der Fälle), Desfluran (> 32 %) und Isofluran (< 3 %). Die Schätzungen dieser Werte aus der Studie Gschrey et al. 2015 haben sich in den Expertengesprächen für diesen Bericht erhärtet. Diese drei Substanzen haben die in der Vergangenheit genutzten Mittel Halothan und Enfluran abgelöst. Bei Messungen auf dem Schweizer Jungfrauoch im Jahr 2015 zeigten sie bereits relevante Konzentrationen in der Atmosphäre³⁹.

Isofluran enthält als einzige der heute noch verwendeten Substanzen außer Fluor auch Chlor, ist also kein HFE, sondern ein HCFE, der auch zur Schädigung der Ozonschicht beiträgt.

Tabelle 16: Chemische und ökologische Kenndaten der fünf halogenierten Narkosegase

Name	Chemische Formel	Industrielle Bezeichnung	ODP	GWP*	Atmosphärische Lebensdauer (Jahre)
Halothan	C ₂ HBrClF ₃	(kein Ether)	1,56	41	1,0 ^a
Enfluran	C ₃ H ₂ ClF ₅ O	HCFE-235ca2	0,04	583	8,2 ^b
Isofluran	CHF ₂ OCHClCF ₃	HCFE-235da2	0,03 ^b	350	3,2 ^c
Desfluran	CHF ₂ OCHF ₂ CF ₃	HFE-236ea2	-	989	14 ^d
Sevofluran	CH ₂ FOCH(CF ₃) ₂	HFE-347mcc3	-	216	1,1 ^d

* GWP-Werte von Halothan und Enfluran nach EPA, Federal Register/Vol. 79, No. 238, December 2014 (p.44338);

GWP-Werte von Isofluran und Desfluran nach 4. IPCC Sachstandsbericht; Sevofluran nach 5. IPCC-Sachstandsbericht.

a Carpenter et al. (2014).

b Langbein et al. (1999).

c Sulbaek Andersen et al. (2010).

d Sulbaek Andersen et al. (2012b).

Emissionen der Narkosegase 1990-2020

Genaue Erläuterung zur Ermittlung der Emissionen inklusive Quellen und Eingabewerten finden sich in „Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland 2013“. Die Werte der letzten beiden Berichtsjahre sind identisch, da für die Anzahl der Operationen auf Daten des

³⁹ Reimann, Stefan et al (2017): Kontinuierliche Messung von Nicht-CO₂-Treibhausgasen auf dem Jungfrauoch (HALCLIM-2015-18). Unter: https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/externe-studien-berichte/kontinuierliche-messung-von-nicht-co2-treibhausgasen-auf-dem-jungfrauoch.pdf.download.pdf/HALCLIM_6_2017.pdf.

Statistischen Bundesamtes zurückgegriffen wird⁴⁰, die zeitversetzt erscheinen. Die Werte werden entsprechend im Folgejahr angepasst.

Ausgehend vom jährlichen Verbrauch ergeben sich aus den Emissionsraten der einzelnen Gase folgende Emissionen für den Berechnungszeitraum, die in der Tabelle 17 dargestellt sind.

Tabelle 17: Emissionen der halogenierten Narkosegase in Deutschland 1990-2020 unter Einbeziehung ihrer Metabolisierungsraten [t]

Substanz	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Desfluran	0,0	0,0	31,6	65,0	103,0	102,7	106,1	107,7	107,7
Sevofluran	0,0	0,0	15,2	31,8	50,8	69,36	71,69	72,77	72,77
Isofluran	8,7	21,4	19,9	15,6	9,1	2,41	2,49	2,52	2,52
Enfluran	20,4	19,1	13,9	4,7	-	-	-	-	-
Halothan	6,2	4,1	-	-	-	-	-	-	-
Summe [t]	35,3	44,6	80,5	117,1	162,9	174,4	180,3	183,0	183,0

Es zeigt sich, dass die Emissionen von Halothan, welches die höchste Metabolisierungsrate aufweist, deutlich niedriger sind als der Verbrauch. In geringerem Maße zeigt sich diese Entwicklung bei Sevofluran, welches zu etwa 5 % metabolisiert wird.

In Tabelle 18 sind die klimawirksamen Emissionen der vier Narkosegase auf Ether-Basis, d.h. ohne Halothan, enthalten. Die Emissionen von HCFE und HFE als Narkosegase betrugen im Jahr 2020 ca. 123 t CO₂-Äquivalente (0,123 Mio. t CO₂-Äquivalente).

Tabelle 18: Emissionen der halogenierten Narkosegase in Deutschland 1990-2020 [t CO₂-Äquivalente] – ohne Halothan

Substanz	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Desfluran	0,0	0,0	31,2	64,3	101,8	101,5	104,9	106,5	106,5
Sevofluran	0,0	0,0	3,3	6,9	11,0	15,0	15,5	15,7	15,7
Isofluran	3,0	7,5	7,0	5,5	3,2	0,8	0,9	0,9	0,9
Enfluran	11,9	11,1	8,1	2,8	-	-	-	-	-
Summe [kt CO₂-Äq.]	14,9	18,8	49,5	79,4	116,0	117,4	121,3	123,1	123,1

⁴⁰ Statistisches Bundesamt: Gesundheit. Fallpauschalenbezogene Krankenhausstatistik (DRG-Statistik). Operationen und Prozeduren der vollstationären Patientinnen und Patienten in Krankenhäusern. Erscheint jährlich.

2.3 Perfluorierte Polyether (PFPE)

Perfluorierte Polyether (PFPE) sind eine umfangreiche Gruppe vollfluorierter Polymere, die im Unterschied zu vollfluorierten Kohlenwasserstoffen außer Kohlenstoff (C) und Fluor (F) auch Sauerstoff (O) enthalten, aber anders als HFKW oder HFE (Hydrofluorether) keinen Wasserstoff (H). Selbst bei hoher Molekularmasse sind sie noch flüssig. Ihr GWP ist sehr hoch (~ 10.000). Die EU F-Gase-Verordnung enthält nur für einen PFPE – den sogenannten PFPMIE oder Galden® HT-70 - ein GWP, nämlich 10.300. Dieser Wert stammt aus dem vierten IPCC-Sachstandbericht (AR4). In Gschrey et al 2015 wurde dieses GWP auf alle Galden-Produkte angewandt. Der Stoff PFPMIE ist im Anhang II der EU F-Gase-Verordnung aufgeführt und damit berichtspflichtig nach Artikel 19.

PFPE werden (1) beim Dampf-Löten von Leiterplatten, (2) als Wärmeüberträger in der Halbleiterindustrie, (3) als Arbeitsmittel-Komponente in ORC-Anlagen sowie (4) als Träger- bzw. Lösemittel für Schmierstoffe für extreme Temperaturbelastungen eingesetzt. Bei ORC-Anlagen und bei Wärmeüberträgern handelt es sich um geschlossene Anwendungen, beim Löten und bei Schmierstoffen um offene. In Gschrey et al 2015 werden diese Anwendungen im Detail beschrieben.

Weltweit einziger Hersteller von PFPE des hier in Frage kommenden niederen und mittleren Molekularmasse-Bereichs ist die Firma Solvay Specialty Polymers (früher Solvay Solexis) in Italien, die die Produktgruppe unter dem Handelsnamen Galden vermarktet.

2.3.1 GWP von PFPE

In Gesprächen mit Öko-Recherche erklärte das Unternehmen Solvay Specialty Polymers, dass es den PFPE mit der Bezeichnung PFPMIE nicht mehr herstelle, sondern nur noch andere PFPE, die definitionsgemäß der Berichtspflicht nicht unterlägen. Das Unternehmen erklärte sich zwar nicht bereit, für uns die Lieferungen der PFPE der Galden-Reihe nach Deutschland zusammenzustellen, hat aber die von uns im Jahr 2015 vorgelegten Eigenschätzungen in allgemeiner Form bestätigt. Die nachfolgenden Emissionsdaten sind daher deutlich unsicherer als die sonstigen Schätzungen und Berechnungen in diesem Bericht. Dies gilt besonders für die offenen Anwendungen in Schmierstoffen und beim Dampfphasen-Löten. Bei der Berechnung der Klimawirksamkeit folgen wir der EU F-Gase Verordnung und wenden auf PFPE generell ein GWP von 10.300 an.

2.3.2 Verwendung in ORC-Anlagen

Das Kapitel 1.6.3 im vorliegenden Bericht geht bereits auf die Anwendung in ORC (Organic Rankine Cycle)-Anlagen ein, weil der PFPE Galden, genauer Galden® HT-55, als 35 %-Komponente im ORC-Arbeitsmittel „Solkatherm SES 36“ verwendet wird - zusammen mit 65 % HFKW-365mfc. Solkatherm SES 36 wird seit 2011 in Deutschland eingesetzt. Die Daten wurden nicht von Solvay Solexis Italien, sondern von Solvay Fluor Deutschland, jetzt Daikin Chemicals, vertraulich bereitgestellt. In dieser Anwendung ist die Verwendung des PFPE in den letzten Jahren stark zurückgegangen, seit 2016 gab es in einigen Jahren sogar gar keinen Verbrauch.

2.3.3 Wärmeüberträger in der Halbleiterindustrie

Wärmeüberträger in der Halbleiterindustrie gelten als geschlossene Anwendungen und wurden, soweit sie berichtspflichtig sind, im Abschnitt 1.4.3 behandelt. Außer diesen Substanzen und den freiwillig berichteten HFE werden auch Galden-PFPE, insbesondere Galden® HT-135, eingesetzt. Die Einsatzmenge ist nicht mehr so hoch wie noch vor wenigen Jahren.

2.3.4 Dampfphasen-Reflowlöten von Leiterplatten mit PPFMIE (Perfluorpolymethylisopropylether)

Zusammengebaute Leiterplatten müssen im Allgemeinen gelötet werden, um eine dauerhafte Verbindung zwischen elektronischen Bauteilen und den Schaltkreisen auf der Leiterplatte herzustellen. Die heute am weitesten verbreitete Technologie wird als sog. „Surface-Mounting Technology“ bezeichnet, bei der sich das Lötmedium und das Bauteil auf derselben Seite der Platine befinden. Um das Produkt fertigzustellen, wird die gesamte Baugruppe auf 200 °C und mehr erhitzt, um das Lötmedium zu schmelzen (dieser Teil des Prozesses ist der „Reflow“) und die elektronischen Kontakte dauerhaft herzustellen. Reflow-Öfen werden häufig über erwärmte Luft (Konvektion), Infrarot oder Laser beheizt, in gewissem Umfang aber auch in der Dampfphase von kochendem GALDEN-PFPE, das auf den Leiterplatten kondensiert.

Dampfphasen-Reflow-Löten (eng. *Vapour-phase-reflow-soldering*; *VPRS*) funktioniert folgendermaßen: die zusammengesetzte Platine wird in eine hermetisch abgeschlossene Kammer eingelassen, in der sich am Boden kochendes GALDEN-PFPE befindet. Sie wird nun für 1-2 Minuten in den heißen Dampf gehängt, bei dem die Schmelzvorgänge stattfinden.

Emissionen können beim Be- und Entladen der Kammer entstehen, da diese hierfür geöffnet werden muss. Weitere Emissionen sind durch das Abdampfen von der Platine möglich.

Die genauen Angaben zu den entsprechenden Parametern der Emissionsabschätzungen können aus Gründen der Vertraulichkeit an dieser Stelle nicht wiedergegeben werden. Eine detaillierte Beschreibung liegt dem UBA vor. Dies gilt ebenso für die Emissionen, welche in Tabelle 19 aggregiert aufgezeigt sind.

2.3.5 Lösemittel in Schmierstoffen

Die niedrig siedenden PFPE der Galden®-Serie werden in beträchtlichem Umfang als Lösemittel zur Viskositätseinstellung der von Solvay Specialty Polymers auf PFPE-Basis produzierten hochmolekularen Schmierstoffe verwendet, die unter dem Handelsnamen Fomblin® verkauft werden. Solche Schmierstoffe werden u.a. in der Halbleiterherstellung für Vakuumpumpen eingesetzt, aber auch in Bereichen wie der Luftfahrt, Feinwerktechnik, Textilmaschinen, Kfz-Industrie, Druckbehältern usw. Bei der Anwendung emittieren die Lösemittel vollständig (Emissionsfaktor 100 %). Auch hier findet eine Fortschreibung der Daten statt.

2.3.6 Zusammenfassung der PFPE-Emissionen in Deutschland

In Tabelle 19 stellen wir die PFPE-Emissionen in der Summe dar. Insgesamt machen Perfluorpolyether im Jahr 2020 Emissionen in Höhe von etwa 227,4 kt CO₂-Äquivalenten aus.

Tabelle 19: PFPE-Emissionen aus Wärmeübertragung, Dampfphasen-Reflowlöten, Schmierstoffen und ORC-Anlagen 1990-2020 in Tonnen und kt CO₂-Äquivalenten

Substanz	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
PFPE [t]	10,92	12,22	16,55	20,01	22,49	22,33	22,06	22,09	22,08
PFPE [kt CO ₂ -Äq.]	112,2	125,4	170,0	205,6	231,4	229,9	227,2	227,5	227,4

2.4 Trifluormethylschwefelpentafluorid (SF₅CF₃)

Wegen seines hohen GWP von 17.700 wird SF₅CF₃ als „Super-Treibhausgas“ bezeichnet. Die chemische Struktur weist Ähnlichkeiten zu SF₆ auf. Daher gab es zunächst die Annahme, dass SF₅CF₃ aus SF₆ bei Entladungen und Schaltvorgängen in Hochspannungsanlagen generiert wird. Diese Annahme wurde inzwischen widerlegt.

Auf Grund seiner Eigenschaften kann SF₅CF₃ als Ersatz von SF₆ in der chemischen Ozeanographie als Tracergas für Langzeitmessungen der Durchmischung des Meeres eingesetzt werden. Sogenannte Tracer-Release-Experimente werden vom Helmholtz-Zentrum in Kiel (Geomare) weltweit durchgeführt, allerdings auf hoher See und nicht in deutschen Gewässern.

SF₅CF₃ muss gemäß Artikel 19 der EU F-Gase-Verordnung von herstellenden oder importierenden Unternehmen seit 2015 berichtet werden. Bis einschließlich des Berichtsjahres 2020 gab es allerdings in Deutschland keine SF₅CF₃-Emissionen.

2.5 Sulfuryldifluorid (SO₂F₂)

Neu aufgenommen in die Inventarerhebung wird der Stoff Sulfuryldifluorid (SO₂F₂), der als Alternative für das unter dem Montrealer Protokoll geregelte Methylbromid verwendet wird. Dieser wird nicht nur als Insektizid für Lebensmittel, sondern vor allem auch zur Bekämpfung von Holzschädlingen genutzt. Sulfuryldifluorid wird in Deutschland zur Begasung von Containern verwendet, in denen Holz exportiert wird. Es hat ein sehr hohes Treibhauspotenzial (GWP) von ~4800. Als Datengrundlage verwenden wir die öffentlichen Absatzzahlen des Wirkstoffabsatzes als Pflanzenschutzmittel des Bundesamtes für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit. Da außerdem keinerlei Maßnahmen zur Emissionsminderung oder Rückgewinnung des Gases bekannt sind, setzen wir einen Emissionsfaktor von 100 % an. Damit entspricht der Verbrauch den Emissionen. Diese lagen im Jahr 2020 bei 838 kt CO₂-Äquivalenten.

2.6 Weitere fluorierte Treibhausgase

Zu den weiteren fluorierten Treibhausgasen für das deutsche F-Gas-Inventar, die freiwillig berichtet werden können, zählen die beiden - in dieser Studie in Kapitel 1.4.3 über Wärmeüberträger bereits behandelten - Stoffe $C_9F_{21}N$ (Fluorinert FC-3283, Perfluor-Tri-N-Butylamin; GWP 8.690) und $C_5F_{11}NO$ (Fluorinert FC-3284, Perfluor-N-Methylmorpholin; GWP 9.500).

Eine dritte stickstoffhaltige vollfluorierte Substanz für die freiwillige Berichterstattung ist Perfluortributylamin (PFTBA, $C_{12}F_{27}N$) mit dem 3M-Handelsnamen Fluorinert FC-43. Ihr GWP ist 7.100.

Aufsehen erregte PFTBA Ende 2013 durch eine kanadische Studie der Universität Toronto. Ein Forscherteam fand heraus, dass zwar die Konzentration von PFTBA in der Atmosphäre sehr gering ist, dass es aber ein sehr starkes Treibhausgas darstellt. Mögliche Anwendungsgebiete von PFTBA sind u.a. Elektroindustrie, Kalibrierung in der Massenspektroskopie, Partikelzähler für Kraftstoff in Flugzeugen und Augenmedizin.

Die genannten Anwendungsgebiete konnten durch einen Mitarbeiter des Herstellers von PFTBA, der Firma 3M, bestätigt werden. In Deutschland wird Fluorinert FC-43 allerdings vor allem in der Medizin-Technik und als Test-Flüssigkeit in der Elektronik- und Halbleiterindustrie genutzt. Die verkauften Mengen werden uns vertraulich mitgeteilt. Aus den Anwendungsfeldern ergibt sich eine Emissionsrate von 100 %.

In der folgenden Tabelle 20 ist die Emissionsentwicklung der drei Substanzen aggregiert dargestellt.

Tabelle 20: Emissionen der drei stickstoffhaltigen fluorierten Treibhausgase $C_9F_{21}N$, $C_5F_{11}NO$ und $C_{12}F_{27}N$ in Tonnen und kt CO_2 -Äquivalenten 1990-2020

Substanz	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
$C_9F_{21}N$, $C_5F_{11}NO$, $C_{12}F_{27}N$ [t]	-	-	0,33	1,46	3,33	5,386	6,074	6,31	6,43
$C_9F_{21}N$, $C_5F_{11}NO$, $C_{12}F_{27}N$ [kt CO_2 -Äq.]	-	-	2,87	13,00	30,15	46,63	52,10	53,98	55,02

2.7 Die zusätzlichen F-Gase für die freiwillige Berichterstattung

Der abschließende Gesamtblick auf die zusätzlichen F-Gase, deren Emissionen das Umweltbundesamt für die freiwillige Berichterstattung ermittelt, zeigt den hohen Emissionsbeitrag von SO_2F_2 , auf welchen 73 % der insgesamt 1.135,6 kt CO_2 -Äquivalente entfallen. Dies hängt mit dem relativ hohen GWP von ~ 4800, der Verbrauchsmenge sowie dem Emissionsfaktor von 100 % zusammen.

Den zweitgrößten Beitrag an den Emissionen der freiwillig berichteten Gase liefern PFPE mit 227 kt CO_2 -Äquivalenten. Dies hängt mit dem hohen GWP von 10.300 für diese Substanzgruppe zusammen.

Die Emissionen der stickstoffhaltigen F-Gase $\text{C}_9\text{F}_{21}\text{N}$ (GWP 8.690), $\text{C}_5\text{F}_{11}\text{NO}$ (GWP 9.500) und $\text{C}_{12}\text{F}_{27}\text{N}$ (GWP 7.100) betragen insgesamt 55 kt CO_2 -Äq. (s. Tabelle 21).

Tabelle 21: Emissionen der vom Umweltbundesamt freiwillig berichteten zusätzlichen F-Gase nach Stoffen im Jahr 2020 in kt CO_2 -Äquivalenten

Anwendung	2020
uHFKW (1234yf, 1234ze, 1233zd)	2,2
Industrielle HFE (offen und geschlossen)	13,36
HFE für Anästhesie	0,123
PFPE	227
SF_5CF_3	-
SO_2F_2	838
Weitere (N-haltige) FKW	55
Summe [kt CO_2-Äq.]	1.135,6

Es bleibt festzustellen, dass die freiwillig berichteten Stoffe einen immer größeren Anteil der Emissionen ausmachen, was auch bedeutet, dass die tatsächlichen Gesamtemissionen der F-Gase weitaus höher sind als berichtet.

3 Quellenverzeichnis

In diesem Teil des Berichts werden die Erhebungsnachweise für die Berichtsjahre 2019 und 2020 wiedergegeben. Persönliche Telefon-Durchwahlnummern und E-Mail-Adressen werden in dieser öffentlichen Fassung aus Datenschutzgründen nicht genannt.

Damit die Gliederung der Datenquellen mit derjenigen nach CRF-Quellgruppen vergleichbar ist, wird deren Bezeichnung in Klammern hinter den Überschriften der einzelnen Sektoren angegeben. Die Nummerierung erfolgt nach den neuen UNFCCC reporting formats (CRF) bzw. den 2006 IPCC Guide-lines for National Greenhouse Gas Inventories.

3.1 F-Gas-Emissionen

Produktion von HFKW-134a, HFKW-227ea, SF₆ (2.B.9)

Daikin Chemical Europe GmbH, Hannover, Felix Flohr, Vertrauliche Mitteilungen an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

Solvay Special Chem, Hannover, Andreas Busse, Vertrauliche Mitteilungen an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

Solvay Special Chem, Hannover, Thomas Schwarze, Vertrauliche Mitteilung an Öko-Recherche, 2019.

Sekundäraluminium (2.C.3)

Statistisches Bundesamt Wiesbaden, Erhebung des klimawirksamen Stoffes „Schwefelhexafluorid“ (SF₆). Berichtsjahre 2019 und 2020.

https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/06/PD21_292_32421.html.

Öko-Recherche (Winfried Schwarz/Barbara Gschrey): Final Report: Service contract to assess the feasibility of options to reduce emissions of SF₆ from the EU non-ferrous metal industry and analyse their potential impacts, Prepared for European Commission, DG Environment, ENV.C.4/SER/2008/0059r1, Frankfurt/Main, October 2009.

Aluminiumproduktion (2.C.3)

Statistisches Bundesamt Wiesbaden, Erhebung des klimawirksamen Stoffes „Schwefelhexafluorid“ (SF₆). Berichtsjahre 2019 und 2020.

Datenmeldung an Umweltbundesamt. Berichtsjahre 2019 und 2020.

Magnesium-Guss (2.C.4)

ZF Gusstechnologie (ehemals Honsel GmbH & Co. KG, Druckgusswerk Nürnberg), Nopitschstraße 71, Nürnberg. Sina Placzek und Thorsten Gradzielski, Mitteilung an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

Takata-Petri AG, Aschaffenburg. Marcus Ubrig (Safety & Environment), Mitteilung an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

Volkswagen AG, Werk Kassel, Baunatal. Djamila Groch, Mitteilungen an Öko-Recherche zum Verbrauch an Schwefelhexafluorid und HFKW-134a, 2020 und 2021.

Der Verbrauch von SF₆, der nur noch in Druckgussbetrieben mit Jahresverbrauch unter 850 kg und generell im Sandguss erlaubt ist, wird nicht mehr von einzelnen Betrieben abgefragt, sondern ist der Erhebung des Statistischen Bundesamtes beim Gasehandel entnommen. Es finden lediglich ausgewählte Rückfragen zur Kontrolle statt.

Statistisches Bundesamt, Bonn: Mitteilungen an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

Statistisches Bundesamt Wiesbaden, Erhebung des klimawirksamen Stoffes „Schwefelhexafluorid“ (SF₆). Berichtsjahre 2019 und 2020.

Linde AG, Höllriegelskreuth. Hans-Jürgen Diehl (Zentraler Vertrieb Spezialgase), schriftliche Mitteilungen an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

Druckguss Heidenau, Dohna. Ulrich Kimmel, schriftliche Mitteilungen an Öko-Recherche 2020 und 2021.

Öko-Recherche (Winfried Schwarz/Barbara Gschrey): Final Report: Service contract to assess the feasibility of options to reduce emissions of SF₆ from the EU non-ferrous metal industry and analyse their potential impacts, Prepared for European Commission, DG Environment, ENV.C.4/SER/2008/0059rl, Frankfurt/Main, October 2009.

Halbleiterindustrie (2.E.1)

ZVEI, Fachverband Bauelemente der Elektronik (Dr. Marcus Dietrich, Technischer Referent Fachverband Electronic Components and Systems): PFC-Emissionsdaten der deutschen Halbleiterindustrie. Freiwillige Meldung der PFC-Emissionen der Deutschen Halbleiterindustrie an BMU, UBA und BMWi, 2020 und 2021.

Statistisches Bundesamt Wiesbaden, Erhebung des klimawirksamen Stoffes „Schwefelhexafluorid“ (SF₆). Berichtsjahre 2019 und 2020.

Winfried Schwarz, Barbara Gschrey, Thomas Kimmel, Sven Stöbener, Sabrina Reitz (Öko-Recherche GmbH): Implementierung der ab dem Berichtsjahr 2013 gültigen IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 2006 in die Inventurerhebung fluorierter Treibhausgase (HFKW, FKW, SF₆, NF₃), im Auftrag des Umweltbundesamts, FKZ 3712 41 103 1, November 2015.

Photovoltaik-Industrie (2.E.3)

Statistisches Bundesamt Wiesbaden, Erhebung des klimawirksamen Stoffes „Schwefelhexafluorid“ (SF₆). Berichtsjahre 2019 und 2020.

Öko-Recherche (Winfried Schwarz): SF₆ und NF₃ in der deutschen Photovoltaik-Industrie. Inventarverbesserung 2008 – Verbesserung und Ergänzung der Daten für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention in der Quellgruppe Photovoltaik, Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes, Förderkennzeichen 360 16 027, Dezember 2009 (unveröffentlicht).

Winfried Schwarz, Barbara Gschrey, Thomas Kimmel, Sven Stöbener, Sabrina Reitz (Öko-Recherche GmbH): Implementierung der ab dem Berichtsjahr 2013 gültigen IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 2006 in die Inventurerhebung fluorierter Treibhausgase (HFKW, FKW, SF₆, NF₃), im Auftrag des Umweltbundesamts, FKZ 3712 41 103 1, November 2015.

Wärmeüberträger (C₆F₁₄) (2.E.4)

ZVEI, Fachverband Bauelemente der Elektronik (Dr. Marcus Dietrich, Technischer Referent Fachverband Electronic Components and Systems), Mitteilung an das Umweltbundesamt, 2020 und 2021.

Tuma & Tousignant 2001: Reduktion von Emissionen aus Perfluorkohlenwasserstoffen (PFKWs) in Wärmeträgerflüssigkeiten, Vortrag beim SEMI Technical Symposium: Innovations in Semiconductor Manufacturing im Rahmen der SEMICON West, 16. Juli 2001, S. 3. Dieser ins Deutsche übersetzte Fachartikel wird auf der Website von 3M Deutschland GmbH verbreitet.

<https://multimedia.3m.com/mws/media/7955180/reducing-emissions-of-pfc-heat-transfer-fluids.pdf?fn=reducingemissionsPFC.pdf>.

Burton, C.S. 2004: Uses and Air Emissions of Liquid PFC Heat Transfer Fluids from the Electronics Sector. EPA Document # EPA-430-R-06-901.

Gewerbekälte (2.F.1a)

A. Zentralanlagen

Lebensmitteleinzelhandel > 400 m² Verkaufsfläche:

Schriftliche Mitteilungen Gisela Mies/Birgit Arndt, Nielsen (Trade Dimensions), 2020 und 2021.

Discountmärkte:

Schriftliche Mitteilungen Gisela Mies/Birgit Arndt, Nielsen (Trade Dimensions), 2020 und 2021.

B. Verflüssigungssätze und steckerfertige Geräte

Discountmärkte:

Schriftliche Mitteilungen Gisela Mies/Birgit Arndt, Nielsen (Trade Dimensions), 2020 und 2021.

Statista [Henrich, Philipp] (2020): Anzahl der Filialen im Lebensmittelhandel in Deutschland nach Betriebsformen in den Jahren 2013 bis 2020.

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/157293/umfrage/anzahl-der-geschaefte-im-deutschen-einzelhandel-nach-geschaefstypen/> (01.07.2019).

Kleine Lebensmittel-Einzelhandelsgeschäfte < 400 m²:

Schriftliche Mitteilungen Gisela Mies/Birgit Arndt, Nielsen (Trade Dimensions), 2020 und 2021.

Bäckerhandwerk (einschl. Filialen):

Zentralverband des Deutschen Bäckerhandwerks e. V. (2020): Wirtschaftsfaktor Bäckerhandwerk.

<https://www.baeckerhandwerk.de/baeckerhandwerk/zahlen-fakten/> (2020 und 2021).

Getränkeabholmärkte:

Statista [Henrich, Philipp] (2020): Anzahl der Getränkefachmärkte in Deutschland in den Jahren 2004 bis 2020.

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/157244/umfrage/anzahl-der-getraenkeabholmaerkte-in-deutschland/> (2020 und 2021).

Tankstellenshops:

Statista [Ahlswede, Andreas und Kords, Martin] (2020): Anzahl der Tankstellen in Deutschland von 1950 bis 2019.

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2621/umfrage/anzahl-der-tankstellen-in-deutschland-zeitreihe/>.

Statista [Kords, Martin] (2021): Anzahl der Tankstellen in Deutschland nach Tankstellentyp von 1999 bis 2020.

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/72262/umfrage/anzahl-der-tankstellen-in-deutschland-nach-tankstellentyp-zeitreihe/>.

Gastgewerbe (15 Untersektoren):

Dehoga Bundesverband (2020 und 2021): Wirtschaftsfaktor Gastgewerbe. <https://www.dehoga-bundesverband.de/zahlen-fakten/> (2020 und 2021).

Krankenhäuser:

<https://de.wikipedia.org/wiki/Krankenhaus>.

Fleischerfachbetriebe:

Deutscher Fleischer-Verband (2020 und 2021): Jahrbuch 2019 und 2020. S. 70.

https://www.fleischerhandwerk.de/fileadmin/content/03_Presse/Geschaeftsbericht/Jahrbuch_2020.pdf (2020 und 2021).

Fleischerfilialen:

Siehe Fleischerfachbetriebe.

Die Daten zum Facheinzelhandel für Nahrungsmittel (Delikatessen, Fisch, Obst und Gemüse usw.), Kühlzentrifugen, Verkaufsautomaten wurden auf Basis des Jahres 2010 linear für 2019 und 2020 fortgeschrieben, da keine neuen Daten verfügbar waren.

Pflegeheime:

https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Gesundheit/Pflege/PflegeDeutschlandergebnisse5224001159004.pdf?__blob=publicationFile.

Die Daten zum Zierpflanzenanbau wurden auf Basis des Jahres 2011 linear für 2019 und 2020 fortgeschrieben, da keine neuen Daten verfügbar waren.

R116 und R218:

R116 (C₂F₆) ist Bestandteil der Tiefkühlgemische R508A und R508B – mit 61 % R116 in R508A und 54 % R116 in R508B (Rest R23), für die ab 2006 Werte nach UStatG zur Verfügung stehen. Der 2020er Wert ist die Fortschreibung des gerundeten UStatG-Vorjahreswerts.

R218 (C₃F₈) ist in diversen Kältemittelmischungen enthalten: zu 20 % in R403 A/B (Isceon 69), zu jeweils 9 % in R413 A (Isceon 49) und Isceon 89. Auch hier wurde für 2020 der Vorjahreswert der UStatG-Erhebung fortgeschrieben.

Haushaltskühlgeräte (2.F.1b)

Greenpeace Deutschland, Hamburg, Wolfgang Lohbeck (Atmosphärenschtz), persönliche Mitteilung an Öko-Recherche lfd.

Industriekälte (2.F.1c)

Fleischanfall von geschlachteten Tieren in- und ausländischer Herkunft 2019 und 2020:

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft: Tabellen zur Ernährung und Fischerei, 186 - Schlachtmengen von Geflügel nach Geflügelarten, <https://www.bmel-statistik.de/ernaehrung-fischerei/tabellen-zu-ernaehrung-und-fischerei/#c7883> (2020).

Statistisches Bundesamt: Tiere und tierische Erzeugung, 41331-0001 - Schlachtungs- und Schlachtgewichtsstatistik, Schlachtmenge ohne Geflügel, https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Tiere-Tierische-Erzeugung/_inhalt.html (2020 und 2021).

Milch- und Rahmanlieferung der Erzeuger an milchwirtschaftliche Unternehmen 2019 und 2020:

<http://berichte.bmelv-statistik.de/>; Datei MBT-0204035-0000.

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2020 und 2021): Kuhmilchlieferrung nach Erzeuger- und Molkereistandort. <https://www.ble.de/DE/BZL/Daten-Berichte/Milch-Milcherzeugnisse/Mengen.html?nn=8906974> (2020 und 2021).

Weinerzeugung 2019 und 2020:

Deutsches Weininstitut (2020 und 2021): Pressemitteilung, Endgültige Zahlen: 10,4 Millionen Hektoliter Weinmost 2020.

<https://www.deutscheweine.de/presse/pressemeldungen/details/news/detail/News/endgueltige-zahlen-104-millionen-hektoliter-weinmost-2020/> (2020 und 2021).

Bierzeugung 2019 und 2020:

Statistisches Bundesamt (2020 und 2021): Bierproduktion 2019 und 2020: Brauereien erzeugten 2,2 % mehr als im Vorjahr.

https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2019/04/PD19_156_799.html (2020 und 2021).

Für alkoholfreies Bier:

Statista [Henrich, Philipp] (2019): Produktion von alkoholfreiem Bier in Deutschland in den Jahren 2005 bis 2020 (in 1.000 Hektoliter).

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/425881/umfrage/produktion-von-alkoholfreiem-bier-in-deutschland/> (01.07.2019).

Fruchtsaft 2019 und 2020:

Verband der Deutschen Fruchtsaft-Industrie e.V. (VdF) (2019): Orangensaft übernimmt wieder die Poleposition beim Verbraucher. <https://www.fruchtsaft.de/presse/meldungen/orangensaft-uebernimmt-wieder-die-poleposition-beim-verbraucher/> (2020).

Schriftliche Mitteilung an Öko-Recherche, Verband der deutschen Fruchtsaft-Industrie e. V., Aileen Koch, 2020.

Schokoladenproduktion 2019 und 2020:

BDSI (2020 und 2021): Produktion von Süßwaren gesamt 2019 und 2020.

https://www.bdsi.de/fileadmin/redaktion/Grafik_Statistik/Produktion_S%C3%BC%C3%9Fwaren_gesamt_2020_vorl-c.jpg (2020 und 2021).

Tiefkühlkost 2019 und 2020:

Deutsches Tiefkühlinstitut (2019): Die Deutschen sind wahre Tiefkühlfans.

https://www.tiefkuehlkost.de/tk-fuer-alle/aktuelles/presse/pressemeldungen/_y2019/_p2 (2020 und 2021).

Eisbahnen (Eisstadien in Deutschland) 2019 und 2020:

Hockeyarenas.net Verzeichnis der Stadien in Deutschland nach Baujahren. <http://www.hockeyarenas.net>.

Sonstige Industrie:

Verlässliche Kältemitteldaten, vergleichbar der Nahrungsmittelindustrie, sind für diesen Restbereich der Industriekälte kaum verfügbar. Unsere Annahme ist, dass der Hauptanwender (zu etwa 80 % der sonstigen Industriekälte) die Chemische Industrie ist, insbesondere in der Produktion von organischen und anorganischen Basischemikalien, Kunststoffen in primärer Form, Düngemitteln u. dergleichen. Für die installierte Kälteleistung in der sonstigen Industriekälte verwenden wir einen Pauschalwert von 500 MW. Diese Abschätzung stützt sich auf eine Auswertung des Abschnitts über die Chemieindustrie in DKV 2002 (Seiten 69-88). Darin wird die installierte Kälteleistung auf 335 MW beziffert. Die VDMA-Studie zum „Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland“ vom April 2011 führt zahlreiche Anwendungen und Sektoren der Industriekälte an und sieht gleichfalls in der Chemie, vor allem der Grundstoffchemie, den hauptsächlichen industriellen Verbraucher von Endenergie für Kältetechnik. Aus dem Energieverbrauch ist jedoch kein Rückschluss auf die Kälteleistung möglich. Anzumerken ist noch, dass ein großer Teil der Kälteleistung in der Chemie auf die Gasverflüssigung entfällt, für die halogenierte Kältemittel eine untergeordnete Rolle spielen.

Für die Umrechnung der von uns auf 500 MW geschätzten Kälteleistung in Kältemittelmengen verwenden wir spezifische technische Kennziffern.

Flüssigkeitskühlsätze, die in der Industrie in großem Umfang eingesetzt werden, sind in der „sonstigen Industriekälte“ nicht enthalten. Sie werden bei stationären Klimaanlagen (Chiller) behandelt, mit denen sie baugleich sind.

Steckerfertige Geräte (Rückkühler und Schaltschrankkühler):

Die Stückzahlen von Schaltschrankkühlern (313.000) und Öl- und Wasserrückkühler (< 200.000) sind entnommen aus der Studie VDMA (2011): Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland – Eine Abschätzung des Energiebedarfs von Kältetechnik in Deutschland nach Einsatzgebieten. Frankfurt am Main; S.60 und 61. Die Zahlenwerte wurden für 2019 und 2020 beibehalten.

Als durchschnittliche Füllmenge wurde 0,95 kg angegeben. Als dominierendes Kältemittel R134a. Die Geräte werden vorwiegend vorgefüllt importiert (Italien); Schaltschrankkühler werden auch in Deutschland hergestellt.

R227ea und R23:

Die Mengenangabe des Neuzugangs von R227ea für Klimatisierungs-Anwendungen bei hoher Außentemperatur wie in Arbeitskränen von Stahlwerken u. dgl. entspricht dem gerundeten Vorjahreswert nach UStatG-Erhebung.

Für das Tieftemperatur-Kältemittel R23, sofern es rein (nicht in Mischungen) eingesetzt wird, wurden ab 2006 die Werte nach UStatG verwendet. Für den Neuzugang des Jahres 2020 wurde der gerundete Vorjahreswert herangezogen, da zum Zeitpunkt der Inventarerhebung noch keine neuen Daten des Statistischen Bundesamtes vorlagen.

Kühlfahrzeuge (2.F.1d)

Kraftfahrt-Bundesamt, Statistische Mitteilungen FZ 8 (2020 und 2021): Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern Monatsergebnisse Dezember 2019 und 2020 nach zulässiger Gesamtmasse. Veröffentlicht im Dezember 2020 und 2021 (enthält Zahlen für das ganze Jahr).

Statistische Mitteilung des Kraftfahrt-Bundesamtes (2019): Fahrzeugzulassungen (FZ) Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter 1. Januar 2020, (FZ 23).

Statistische Mitteilung des Kraftfahrt-Bundesamtes (2020): Fahrzeugzulassungen (FZ) Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter 1. Januar 2021, (FZ 23).

Kühlcontainer (2.F.1d)

Port Technology:

https://www.porttechnology.org/news/dynamar_reefer_box_production_collapses. Im Artikel genannte Reduzierung der Produktion auf Zahl des letzten Jahres angewandt.

Persönliche Mitteilung Peter Hansen, Trane Technologies, 2021.

Pkw-Klimaanlagen (2.F.1e)

Statistische Mitteilung des Kraftfahrt-Bundesamtes (2019): Fahrzeugzulassungen (FZ) Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter 1. Januar 2020, (FZ 23).

Statistische Mitteilung des Kraftfahrt-Bundesamtes (2020): Fahrzeugzulassungen (FZ) Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter 1. Januar 2021, (FZ 23).

Statistisches Bundesamt (2020 und 2021): Fachserie 19, Reihe 1 - Abfallentsorgung 2019 und 2020.

VDA (Verband der Automobilindustrie), Daten zur Automobilwirtschaft, Ausgabe 2019 und 2020, Berlin o.J.

VDA Verband der Automobilindustrie), Analysen zur Automobilkonjunktur 2019 und 2020, Berlin, Juni 2020 und Juni 2021.

Adam Opel AG, Rüsselsheim. Ulrich Schulz (Manager EU Affairs – Environment), Mitteilung an Öko-Recherche, 2020.

Renault Deutschland AG, 50321 Brühl. Katharina Niessner (Koordinatorin Kommunikation), Mitteilungen an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

Volkswagen Deutschland, Frank Thoms, Mitteilungen an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

Die Modellreihen von Audi, BMW, Daimler (Mercedes), Kia, Mitsubishi, Porsche, SEAT, Volvo, Saab, Honda, Nissan, Skoda, Toyota, Ford, Suzuki und Mazda wurden nicht erfragt, da sie fast zu 100 % mit Klimaanlagen ausgestattet sind.

Nutzfahrzeug-Klimaanlagen (2.F.1e)

Kraftfahrt-Bundesamt, Statistische Mitteilungen FZ 8: Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern Monatsergebnisse Dezember 2019. Gegliedert nach zulässiger Gesamtmasse. Veröffentlicht im Januar 2020 (enthält Zahlen für das ganze Jahr).

Kraftfahrt-Bundesamt, Statistische Mitteilungen FZ 8: Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern Monatsergebnisse Dezember 2020. Gegliedert nach zulässiger Gesamtmasse. Veröffentlicht im Januar 2021 (enthält Zahlen für das ganze Jahr).

Statistische Mitteilung des Kraftfahrt-Bundesamtes: Fahrzeugzulassungen (FZ) Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter 1. Januar 2020, (FZ 15).

Statistische Mitteilung des Kraftfahrt-Bundesamtes: Fahrzeugzulassungen (FZ) Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter 1. Januar 2021, (FZ 15).

Statistisches Bundesamt (2020 und 2021): Fachserie 19, Reihe 1 - Abfallentsorgung 2019 und 2020.

Daimler AG, Stuttgart, 0711-17-0. Eberle Arwed für die Modelle Sprinter und Vito, Mitteilungen an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

Volkswagen AG, Werk Hannover. Frank Thoms für die Modelle Transporter/Caravelle, Crafter, Caddy, Mitteilungen an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

Renault Deutschland AG, 50321 Brühl. Katharina Niessner (Koordinatorin Kommunikation), Mitteilungen an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

Öko-Recherche: Establishing the leakage rates of mobile air conditioners in heavy duty vehicles (070501/2005/422963/MAR/C1). Part I trucks, For the European Commission (DG Environment), February 2007.

Busklimaanlagen (2.F.1e)

Kraftfahrt-Bundesamt, Statistische Mitteilungen FZ 8: Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern Monatsergebnisse Dezember 2019. Gegliedert nach zulässiger Gesamtmasse. Veröffentlicht im Januar 2020 (enthält Zahlen für das ganze Jahr).

Kraftfahrt-Bundesamt, Statistische Mitteilungen FZ 8: Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern Monatsergebnisse Dezember 2020. Gegliedert nach zulässiger Gesamtmasse. Veröffentlicht im Januar 2021 (enthält Zahlen für das ganze Jahr).

Statistische Mitteilung des Kraftfahrt-Bundesamtes: Fahrzeugzulassungen (FZ) Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter 1. Januar 2020, (FZ 15).

Statistische Mitteilung des Kraftfahrt-Bundesamtes: Fahrzeugzulassungen (FZ) Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter 1. Januar 2021, (FZ 15).

VDA (Verband der Automobilindustrie), The Economic Situation of the Automotive Industry in the Year 2019, Berlin, März 2020 (Tabellenteil).

Daimler Buses, EvoBus GmbH, Alexander Zaiser, Mitteilung an Öko-Recherche, 2021.

Öko-Recherche: Establishing the leakage rates of mobile air conditioners in heavy duty vehicles (070501/2005/422963/MAR/C1). Part II buses, For the European Commission (DG Environment), February 2007.

Landmaschinen-Klimaanlagen (2.F.1e)

Kraftfahrt-Bundesamt, Statistische Mitteilungen FZ 8: Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern Monatsergebnisse Dezember 2019. Gegliedert nach zulässiger Gesamtmasse. Veröffentlicht im Januar 2020 (enthält Zahlen für das ganze Jahr).

Kraftfahrt-Bundesamt, Statistische Mitteilungen FZ 8: Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern Monatsergebnisse Dezember 2020. Gegliedert nach zulässiger Gesamtmasse. Veröffentlicht im Januar 2019 (enthält Zahlen für das ganze Jahr).

VDMA Landtechnik, Dagmar Häser-Hördt, (Anzahl in Deutschland produzierter Mähdrescher und Feldhäcksler), Mitteilungen an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

Schiffsklimaanlagen (2.F.1e)

Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, Zentralstelle SUK/SEA, Zentrale Binnenschiffs-Bestandsdatei bei der WSV: Veränderungen des Schiffsbestandes der deutschen Binnenflotte für die Jahre 2019 und 2020. Schriftliche Mitteilungen an Öko-Recherche durch Dietmar Försch, WSV, Abteilung Schifffahrt, 2020 und 2021.

Verband für Schiffbau und Meerestechnik e.V. (VSM), Hamburg, Jahresberichte 2019/2020 und 2020/2021. <http://www.vsm.de/de/service/publikation-und-medien/jahresberichte>.

Christian De Bilde (Verband Deutscher Reeder VDR), 20354 Hamburg, Übersicht der Schiffe unter deutscher Flagge nach Typen und Baujahr ab 1997, Mitteilungen an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

Öko-Recherche: The analysis of the emissions of fluorinated greenhouse gases from refrigeration and air conditioning equipment used in the transport sector other than road transport and options for reducing these emissions (07010401/2006/445124/MAR/C4). For the European Commission (DG Environment), Brussels 2007.

Winfried Schwarz: Measures to reduce the climate impact of refrigerant emissions from ships, in: CE Delft & partners: Technical support for European action to reducing Greenhouse Gas Emissions from international transport, Delft, December 2009, p. 306-331.

Hafner, P. D.-I. A., Gabriell, D. C. H., & Widell, D. K. (2019): Refrigeration units in marine vessels: Alternatives to HCFCs and high GWP HFCs. Copenhagen: Nordisk Ministerråd. <http://norden.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1301641&dswid=719>.

Schienenfahrzeugklimaanlagen (2.F.1e)

The Railfaneurope.net Stock Lists: Railway Operators in Germany, Stand Juni 2020 und Juni 2021. <http://www.railfaneurope.net>.

Öko-Recherche: The analysis of the emissions of fluorinated greenhouse gases from refrigeration and air conditioning equipment used in the transport sector other than road transport and options for reducing these emissions (07010401/2006/445124/MAR/C4). For the European Commission (DG Environment), Brussels 2007.

Wärmepumpen (2.F.1f)

Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V., Berlin, Presseinformation: Wärmepumpen-Absatz 2019 und 2020 leicht rückläufig. Berlin, 2020 und 2021. <http://www.waermepumpe.de/presse/zahlen-daten/absatzzahlen/>.

Wärmepumpen-Wäschetrockner (2.F.1f)

BSH Bosch und Siemens Hausgeräte GmbH (Dr. Jörg Lindemann, BSH CTE-ES), München: Schriftliche Mitteilungen an Öko-Recherche am 2020 und 2021.

Miele & Cie. KG, Gütersloh (Bernd Rohde, GTZ/UR), schriftliche Mitteilungen an Öko-Recherche am 2020 und 2021.

Raumklimageräte (2.F.1f) einschließlich Multi-Split-Geräte mit und ohne VRF-Technologie

JARN – Japan Air Conditioning, Heating & Refrigeration News (Für mobile Geräte Fortschreibung, da keine neuen Daten bei JARN).

DAIKIN Airconditioning Germany GmbH, Oliver Blab, Mitteilungen an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

Flüssigkeitskühlsätze (2.F.1f)

Johnson Controls, Rainer Brinkmann; Mitteilung an Öko-Recherche, 2020.

Trane, Bastian Sauermann; Mitteilung an Öko-Recherche 2020.

Smardt OPK, Martin Huth; Mitteilung an Öko-Recherche 2020.

ENGIE, Daniel Keller; Mitteilung an Öko-Recherche 2020.

PU-Hartschaum und Integralschaum (2.F.2a,b)

Solvay Fluor & Derivate GmbH, Hannover, Andreas Busse, Mengenabschätzung für Solkane 365mfc.
Vertrauliche Mitteilungen an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

Statistisches Bundesamt Wiesbaden, Erhebung bestimmter klimawirksamer Stoffe, Berichtsjahr 2019.

Montageschaum (2.F.2b)

HAGO Dr. Schirm Chemotechnik, München, Jörn Meier-Wichmann, Mitteilungen an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

PDR Recycling GmbH + Co. Betriebs KG, Thurnau. Rebecca Schobert/Christopher Hartmann, Mitteilungen an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

DEBRATEC (vorm. Büka) Schwepnitz, Thomas Reihs (REACH-Verantwortlicher & Störfallbeauftragter),
Mündliche Mitteilungen an Öko-Recherche am 2020 und 2021.

Autra Den Braven Aerosol GmbH + Co KG, Reichenberg-Albertshausen. Jan Söder, schriftliche Mitteilungen an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

Öko-Recherche: HFKW-haltige Treibgase in PU-Montageschaum. Bewertung der
Emissionsreduktionspotenziale von Montageschäumen im Hinblick auf eine Konkretisierung der
Regelungen nach §9(1) der Verordnung (EG) 842/2006. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, FuE-
Vorhaben Förderkennzeichen 363 01 196, Dessau Januar 2009.

XPS-Dämmschaum (2.F.2a,b)

Statistisches Bundesamt Wiesbaden, Erhebung bestimmter klimawirksamer Stoffe, Berichtsjahr 2019.

Feuerlöschmittel (2.F.3)

Kidde Brand- und Explosionsschutz GmbH, Ratingen, Übersicht der installierten und emittierten FM-200-Mengen im Geschäftsbereich der Kidde Brand- und Explosionsschutz GmbH, Schreiben von Oliver Köhler (Buchhaltung), Ratingen, 2020 und 2021.

Allgemeine Aerosole (2.F.4b)

Debrattec GmbH, Schwepnitz, Thomas Reihs, schriftliche Mitteilungen an Öko-Recherche GmbH, 2020 und 2021.

Den Braven Aerosols GmbH + Co KG, Reichenberg-Albertshausen, Jan Söder, schriftliche Mitteilungen an Öko-Recherche 2020 und 2021.

Tunap Industrie Chemie GmbH & Co Produktions KG, Lichtenau (Sachsen), Sandy Oltorf (ehem. Wetzel), mündliche Mitteilungen an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

HAGO Dr. Schirm Chemotechnik, München, Jörn Meier-Wichmann, Mitteilungen an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

Novelties (2.F.4c)

Fédération Européenne des Aérosols (FEA), Brussels, www.aerosol.org, Alain D'haese, Mitteilungen an Öko-Recherche, 20.05.2011. Fortschreibung.

Lösemittel (2.F.5)

Honeywell Fluorine Products Europe BV. Tim Vink: Absatz HFKW-245fa, vertrauliches Schreiben an Öko-Recherche, bis 2018.

Winfried Schwarz, Barbara Gschrey, Thomas Kimmel, Sven Stöbener, Sabrina Reitz (Öko-Recherche GmbH): Implementierung der ab dem Berichtsjahr 2013 gültigen IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 2006 in die Inventarerhebung fluorierter Treibhausgase (HFKW, FKW, SF₆, NF₃), im Auftrag des Umweltbundesamts, FKZ 3712 41 103 1, November 2015.

Betriebsmittel zur Elektrizitätsübertragung (2.G.1)

Statistisches Bundesamt Wiesbaden, Erhebung des klimawirksamen Stoffes „Schwefelhexafluorid“ (SF₆). Berichtsjahre 2019 und 2020.

FNN, VIK, ZVEI und Solvay (Monitoring): SF₆-Daten 2019 für die Energieübertragung und -verteilung > 1 kV, Stand 2019 und 2020.

Die Monitoring-Daten schließen außer Schaltanlagen im engeren Sinn auch die sogenannten Bauteile sowie Starkstromkondensatoren mit ein.

Schallschutzscheiben und Autoreifen (2.G.2)

Statistisches Bundesamt, Bonn: Mitteilungen an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

Statistisches Bundesamt Wiesbaden, Erhebung des klimawirksamen Stoffes „Schwefelhexafluorid“ (SF₆). Berichtsjahre 2019 und 2020.

Spurengas (2.G.2)

Neuerhebung im Jahr 2015, Fortschreibung für 2019 und 2020.

Flugzeug-Radar (2.G.2)

Statistisches Bundesamt, Bonn: Mitteilung an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

Teilchenbeschleuniger (2.G.2)

Öko-Recherche-Vollerhebung "SF₆-Bestand und -Emissionen aus Teilchenbeschleunigern", in: Schwarz, W.; Gschrey, B.; Kimmel, T.; Leisewitz, A.; Sauer, J. (Öko-Recherche GmbH): Modelle für die Inventarerhebung von F-Gasen – Modelle zur Ermittlung der Inventardaten für die Emissionsberichterstattung fluorierter Treibhausgase (HFKW, FKW, SF₆) in ausgewählten Quellgruppen. Im Auftrag des Umweltbundesamts, FKZ 363 01 351, Februar 2012, S. 163-175 (Kapitel 9). Lineare Fortschreibung für 2019 und 2020.

Sportschuhsohlen, Glasfasern, Schweißtechnik, (2.G.2)

Statistisches Bundesamt Wiesbaden, Erhebung des klimawirksamen Stoffes „Schwefelhexafluorid“ (SF₆). Berichtsjahre 2019 und 2020.

Statistisches Bundesamt, Bonn: Mitteilungen an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

Linde AG, Höllriegelskreuth. Hans-Jürgen Diehl (Zentraler Vertrieb Spezialgase), Mitteilungen an Öko-Recherche, 2020 und 2021.

Öko-Recherche, Inventarverbesserung 2008 – Verbesserung und Ergänzung der Daten für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention in der Quellgruppe Photovoltaik (2.F.8.h). FKZ 360 16 027.

Warncke, K.; Gschrey, B.; Schwarz, W. (2016): Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland 2015. Daten von HF(C)KW, FKW, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE und PFPME für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für das Berichtsjahr 2015.

Medizinische Produkte: Perfluorodecalin (2.G.2)

Hadassah Winkley/Helen McNamee, Sales & Marketing Manager, F2 Chemicals Ltd.; schriftliche Mitteilungen an Öko-Recherche 2020 und 2021.

Tsai, W.T. Environmental Property Modeling of Perfluorodecalin and its Implications for Environmental Fate and Hazards, Aerosol and Air Quality Research, 11: 903–907, 2011.

Hardung, H. 2008: Semifluorierte und perfluorierte Verbindungen zur topischen und parentalen Anwendung, Dissertation.

ORC (2.G.4)

Barbara Gschrey, Winfried Schwarz, Thomas Kimmel, Bastian Zeiger, Sabrina Reitz (Öko-Recherche GmbH): Implementierung der ab dem Berichtsjahr 2013 gültigen IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 2006 in die Inventarerhebung fluorierter Treibhausgase (HFKW, FKW, SF₆, NF₃), im Auftrag des Umweltbundesamts, FKZ 3712 41 103 1, November 2015.

3.2 Inventarverbesserungen

AWACS

Thomas Schwarze, Solvay, schriftliche Mitteilung an Öko-Recherche 2020.

Dr. rer. nat. Kenny Hanke, Bundeswehr, mündliche Mitteilung an Öko-Recherche 2021.

Dampfphasen-Reflow-Löten

Michaela Königsberger, IBL-Löttechnik GmbH, mündliche und schriftliche Mitteilungen an Öko-Recherche 2021.

J. Metschir, Zabel, Zöller ASSCON Systemtechnik-Elektronik GmbH, mündliche und schriftliche Mitteilungen an Öko-Recherche 2021.

Kühlcontainer

Peter Hansen, Trane Technologies, mündliche und schriftliche Mitteilungen an Öko-Recherche 2021.

Jürgen Göller, Carrier, schriftliche Mitteilung an Öko-Recherche 2021.

Holger König, ref-tech, mündliche Mitteilung an Öko-Recherche 2021.

Yves Wild, Yves Wild Ingenieurbüro GmbH, mündliche Mitteilung an Öko-Recherche 2020.

Wärmepumpen und Splitgeräte mit R454C

Gschrey, B.; Kleinschmidt, J.; Barrault, S.: Briefing Paper: HFCs and HFC alternatives in split-air conditioning systems; März 2020. Verfügbar unter:

https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/0106/2020_03_25_hfc_alternatives_en.pdf.

VRF-Geräte mit R32

Christina Tremmel, Daikin, schriftliche Mitteilung an Öko-Recherche 2021.

Oliver Blab, Daikin, schriftliche Mitteilung an Öko-Recherche 2021.

Wärmepumpen-Wäschetrockner mit R450A

Bernd Rohde, Miele, mündliche Mitteilung an Öko-Recherche 2021.

Thomas Alpögger, LTX Simulation, Mitteilung an Öko-Recherche 2021.

2019 Refinement

IPCC 2019: *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). Published: IPCC, Switzerland. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>.

a. Chemische Industrie

2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Chapter 3: Chemical Industry Emissions.

European Topic Centre on Waste and Materials in a Green Economy (2021, Veröffentlichung ausstehend): A systemic view on fluorinated polymers and plastics in a low carbon, circular and non-toxic economy.

b. Metallproduktion

2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Chapter 4: Metal Industry Emissions.

Hanno Wolfgang Henning Vogel, Trimet Aluminium, mündliche Mitteilung an Öko-Recherche 2021.

Christian Lehmann, Umweltbundesamt, mündliche Mitteilung an Öko-Recherche 2021.

Jörg H. Schäfer, Gesamtverband der Aluminiumindustrie e. V. (GDA), mündliche Mitteilung an Öko-Recherche 2021.

Bernhard Kirchartz, Speira Limited, mündliche Mitteilung an Öko-Recherche 2021.

Thorsten Graubner, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Abbau Metalle, mündliche Mitteilung an Öko-Recherche 2021.

Max Niegisch, Leibniz Universität Hannover, Institut für Mineralogie, mündliche Mitteilung an Öko-Recherche 2021.

Prof. Dr. habil. Bernhard Schulz, Bergakademie Freiberg, Fachbereich Mineralogie, Professur für Lagerstättenlehre und Petrologie, mündliche Mitteilung an Öko-Recherche 2021.

c. Elektronik-Industrie

2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Chapter 6: Electronics Industry Emissions.

d. Anwendung als ODS-Ersatzstoffe

2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Chapter 7: Emissions of Fluorinated Substitutes for Ozone Depleting Substances.

e. Sonstige Produktherstellung- und verwendung

2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Chapter 8: Other Product Manufacture and Use.

European Topic Centre on Waste and Materials in a Green Economy (2021, Veröffentlichung ausstehend): A systemic view on fluorinated polymers and plastics in a low carbon, circular and non-toxic economy.

PD Dr. - Ing. Thomas Stegmaier, Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf, Leiter Kompetenzzentrum Textilchemie, Umwelt, Energie und stellvertretender Institutsleiter, mündliche und schriftliche Mitteilung an Öko-Recherche 2021.

Stefan Thumm, Verband der bayrischen Textil- und Bekleidungsindustrie, mündliche und schriftliche Mitteilung an Öko-Recherche 2021.

Mohr, A., Geng, J (2016): Ressourceneffiziente und umweltentlastende Hydrophob und Oleophob-Ausrüstung von Textilien mittels Plasmatechnik als Alternative zu nasschemischen Fluorkohlenstoffimprägnierungen. Studie im Auftrag der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.

Bundesinstitut für Risikobewertung (2020): Fragen und Antworten zu per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS). <https://mobil.bfr.bund.de/cm/343/fragen-und-antworten-zu-per-und-polyfluorierten-alkylsubstanzen-pfas.pdf>.

CHT Gruppe (2016): Glossar Textilveredelung. [https://www.cht.com/cht/medien.nsf/gfx/med_ASAN-9QYLMA_55ED6B/\\$file/Glossar-CHT-Textilveredlung-DE.pdf](https://www.cht.com/cht/medien.nsf/gfx/med_ASAN-9QYLMA_55ED6B/$file/Glossar-CHT-Textilveredlung-DE.pdf).

3.3 Fluorierte Treibhausgase für die freiwillige Berichterstattung

Ungesättigte teilfluorierte Kohlenwasserstoffe

Chemours, Laurent Zielezinski, mündliche Mitteilung an Öko-Recherche GmbH, 30.8.2018.

TEGA, Jörg Blachutzik, mündliche Mitteilung an Öko-Recherche GmbH, 2020 und 2021.

Hydrofluorierte Ether (HFE)

HFE in der Industrie

3M, Neuss, Norbert Socha, schriftliche Mitteilungen an Öko-Recherche GmbH, 2020 und 2021.

HFE als Narkosegase

Statistisches Bundesamt: Gesundheit. Fallpauschalenbezogene Krankenhausstatistik (DRG-Statistik). Operationen und Prozeduren der vollstationären Patientinnen und Patienten in Krankenhäusern. Erscheint jährlich.

Gschrey, Barbara; Schwarz, Winfried; Zeiger, Bastian; Warncke, Kristina; Volmer, Rebekka (2015): Emissionen fluorierte Treibhausgase in Deutschland 2013. Daten von HF(C)KW, FKW, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE und PPFMIE für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für das Berichtsjahr 2013.

Sulbaek Andersen, M P; Nielsen, O J; Wallington, T J; Karpichev, B; Sander, S P (2012a) Assessing the impact on global climate from general anesthetic gases, *Anesthesia & Analgesia*, 114 (5), 1081–1085.

Sulbaek Andersen M; Nielsen OJ; Karpichev B; Wallington TJ; Sander SP (2012b) Atmospheric chemistry of isoflurane, desflurane, and sevoflurane: Kinetics and mechanisms of reaction with chlorine atoms and OH radicals and global warming potentials. *J. Phys. Chem.*, 116, 5806–5820.

Vollmer, M K; Rhee, T S; Rigby, M; Hofstetter, D; Hill, M; Schoenenberger, F; Reimann, S (2015) Modern inhalation anesthetics: Potent greenhouse gases in the global atmosphere. *Geophysical Research Letters*, 42, 1606–1611.

Perfluorierte Polyether (PFPE)

Solvay Fluor und Solvay Solexis, Helena Lindgren (Solvay Solexis), Felix Flohr (Solvay Fluor), mündliche Mitteilung an Öko-Recherche GmbH, 14.6.2013.

ASSCON Systemtechnik GmbH und IBL Löttechnik GmbH, mündliche Mitteilungen an Öko-Recherche GmbH, Juni 2013 und 23.03.2020.

Solvay Specialty Polymers Italy, Franco Di Renzo, Grazielle Chiodini, Grazia Meroni, Antonio Russo, Telefonkonferenz mit Öko-Recherche GmbH, 16.12.2014.

Stickstoffhaltige Substanzen

3M, Neuss, Norbert Socha, schriftliche Mitteilungen an Öko-Recherche GmbH, 2020 und 2021.

3M, Norbert Socha und Kurt Werner, persönliches Gespräch mit Öko-Recherche am 16.12.2014.

Klaus-Peter Kretschmann, DB Systemtechnik, schriftliche Mitteilung, an Öko-Recherche am 11.12.2014.

Sulfuryldifluorid (SO₂F₂)

Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (2021): Absatzmengen von Wirkstoffen in Pflanzenschutzmitteln 1987-2020.

https://www.bvl.bund.de/DE/Arbeitsbereiche/04_Pflanzenschutzmittel/01_Aufgaben/02_ZulassungPSM/03_PSMInlandsabsatzAusfuhr/psm_PSMInlandsabsatzAusfuhr_node.html.

4 Emissionstabellen für 2020 im Vergleich mit 1990, 2000, 2005, 2010, 2015, 2018 und 2019

4.1 Chemische Industrie: Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF₆ (2.B.9)

	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
By-Product Emissionen (2.B.9.a) und herstellungsbedingte Emissionen (2.B.9.b)								
Emissionen HFKW, FKW [t]	382,3	127,6	75,4	29,6	22,6	20,5	17,5	14,9
Emissionen HFKW, FKW [kt CO ₂ -Äq.]	5.567,1	1.520,5	630,0	203,7	58	52,9	47,3	44,7
Emissionen SF ₆ [t]	5,0	9,0	10,0	3,8	0,057	0,044	0,046	0,039
Emissionen SF ₆ [kt CO ₂ -Äq.]	114,0	205,2	228,0	86,3	1,3	1,0	1,1	0,9
Summe Emissionen Produktion F-Gase [t]	387,3	136,6	85,4	33,4	22,7	20,6	17,6	14,9
Summe Emissionen Produktion F-Gase [kt CO₂-Äq.]	5.681,1	1.725,7	858,0	290,0	59,7	53,9	48,3	45,6

4.2 Metallproduktion (2.C)

	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
--	------	------	------	------	------	------	------	------

Aluminiumproduktion (2.C.3)

CF ₄ [t]	335,5	48,0	45,3	17,7	10,7	14,2	10,2	8,7
C ₂ F ₆ [t]	33,6	4,8	4,7	2,1	1,3	1,7	1,7	1,7
Emissionen FKW [t]	369,1	52,8	50,0	19,8	12,0	15,9	11,9	10,4
Emissionen FKW [kt CO ₂ -Äq.]	2.888,7	413,3	391,9	156,8	94,9	126,0	96,5	85,0

Magnesiumproduktion (2.C.4)

HFKW-134a [t]	-	-	0,6	8,3	16,8	12,8	7,3	5,8
Emissionen HFKW [kt CO ₂ -Äq.]	-	-	0,9	11,8	24,0	18,3	10,4	8,3

Aluminium- und Magnesiumproduktion (2.C.3, 2.C.4)

Emissionen SF ₆ [t]	7,4	13,8	30,5	6,5	1,2	3,2	2,2	2,3
Emissionen SF ₆ [kt CO ₂ -Äq.]	169,1	315,0	694,7	101,6	26,3	73,0	50,1	51,6
Summe Emissionen Metallproduktion [t]	376,5	66,6	81,1	34,6	31,7	31,9	21,4	18,4
Summe Emissionen Metallproduktion [kt CO₂-Äq.]	3.057,7	728,3	1.087,3	315,7	182,1	217,2	157,0	144,8

4.3 Elektronikindustrie (2.E)

	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Halbleiter- und Platinenproduktion (2.E.1)								
HFKW-23 [t]	3,4	1,1	1,1	0,8	0,96	1,0	0,99	0,95
Emissionen HFKW [kt CO ₂ -Äq.]	50,3	16,9	15,8	11,8	14,2	15,2	14,7	14,0
C ₂ F ₆ [t]	8,40	14,0	8,85	5,17	4,46	5,16	4,12	3,52
CF ₄ [t]	9,35	20,0	13,54	8,35	8,76	10,06	9,03	8,90
C ₃ F ₈ [t]	-	3,2	4,64	2,40	1,83	1,74	1,67	1,38
c-C ₄ F ₈ [t]	-	0,1	0,15	0,23	0,56	0,57	0,50	0,56
CH ₂ F ₂						0,05	0,04	0,02
Emissionen FKW [t]	17,75	37,27	27,17	16,15	15,62	17,52	15,32	14,35
Emissionen FKW [kt CO ₂ -Äq.]	171,58	347,5	250,47	148,39	141,16	158,50	136,98	126,59
Emissionen SF ₆ [t]	3,7	2,5	3,27	0,75	0,86	1,191	1,024	1,2
Emissionen SF ₆ [kt CO ₂ -Äq.]	84,36	56,3	74,60	17,06	19,61	27,15	23,35	27,17
Emissionen NF ₃ [t]	0,4	0,2	0,9	0,5	0,7	0,68	0,64	0,63
Emissionen NF ₃ [kt CO ₂ -Äq.]	6,88	4,1	16,0	7,8	11,9	11,75	10,96	10,80
Emissionen [t]	25,25	41,13	32,44	18,15	18,13	20,43	17,98	17,12
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	313,14	424,82	356,89	185,01	186,65	212,63	185,95	178,60
Photovoltaik (2.E.3)								
CF ₄ [t]	-	-	0,31	0,03	-	-	-	-
Emissionen FKW [kt CO ₂ -Äq.]	-	-	2,28	0,23	-	-	-	-

	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Emissionen SF ₆ [t]	-	-	0,9	2,3	-	-	-	-
Emissionen SF ₆ [kt CO ₂ -Äq.]	-	-	19,5	52,3	-	-	-	-
Emissionen NF ₃ [t]	-	-	-	3,1	-	-	-	-
Emissionen NF ₃ [kt CO ₂ -Äq.]	-	-	-	53,7	-	-	-	-
Emissionen [t]	-	-	1,2	5,4	-	-	-	-
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	-	21,8	106,2	-	-	-	-
Summe Emissionen Elektronikindustrie [t]	25,23	41,13	33,61	23,6	18,13	20,43	17,98	17,12
Summe Emissionen Elektronikindustrie [kt CO₂-Äq.]	313,14	424,82	378,67	291,22	186,86	212,68	185,95	178,60

4.4 Anwendung als ODS-Ersatzstoff (2.F)

	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
--	------	------	------	------	------	------	------	------

Kälte- und Klimaanlage (2.F.1)

Gewerbekälte (2.F.1.a)

Bestandsemissionen [t]

R134a	-	176,8	173,0	180,8	168,6	163,2	149,8	135,0
R404A	-	229,7	419,5	583,7	496,3	258,3	192,9	136,6
R407C	-	34,0	28,2	28,1	14,6	12,4	11,3	10,1
R23	-	1,6	2,4	2,0	1,8	2,0	2,0	2,0
R116	-	0,3	0,4	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
R-218	-	12,0	10,5	1,5	0,4	0,1	0,1	0,1
R422D	-	-	-	28,5	-	0,0	0,0	0,0
R152a	-	10,3	8,5	-	-	0,0	0,0	0,0
R125	-	70,9	42,4	0,6	0,7	0,5	0,4	0,3
R449A					3,8	63,5	80,6	94,0
R448A					0,2	23,7	32,5	39,4
R-455A						0,0	0,2	0,5
R-454C						0,0	0,1	0,2
R-452A - TK						1,4	1,9	2,1
R-513						1,4	2,8	4,6

Entsorgungsemissionen [t]

R134a	-	43,1	51,5	55,2	51,1	45,9	44,2	41,3
R404A	-	46,3	34,9	30,4	93,9	159,1	156,4	143,8
R407C	-	6,5	6,9	8,9	7,3	9,0	8,4	7,7
R23	-	-	0,3	0,9	0,8	0,6	0,5	0,7
R116	-	-	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
R218	-	-	3,9	2,6	0,3	0,2	0,1	0,1
R422D	-	-	-	-	-	0,0	0,0	0,0
R152a	-	-	3,3	-	-	0,0	0,0	0,0

	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
R125	-	-	42,6	2,6	-	0,3	0,2	0,2
R449A					-	-	-	-
R448A					-	-	-	-
R-455A						-	-	-
R-454C						-	-	-
R-452A - TK						-	-	-
R-513						-	-	-

Herstellungsemissionen [t]

R134a	-	1,7	1,6	1,8	2,3	1,8	1,1	0,7
R404A	-	3,1	3,9	4,0	2,0	0,1	0,1	0,0
R407C	-	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1
R23	-	-	-	-	0,1	0,1	0,1	0,1
R116	-	-	-	-	-	-	-	-
R218	-	0,1	-	-	-	-	-	-
R422D	-	-	-	1,2	-	-	-	-
R152a	-	-	-	-	-	-	-	-
R125	-	0,1	-	-	-	-	-	-
R449A					0,3	2,9	3,0	3,0
R448A					0,0	1,4	1,4	1,4
R-455A						0,0	0,1	0,1
R-454C						0,0	0,0	0,1
R-452A - TK						0,1	0,1	0,1
R-513						0,1	0,3	0,4
Emissionen [t]	-	624,2	819,4	929,0	843,9	748,1	690,1	624,5
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	1.756,8	2.523,6	2.962,2	2.726,4	2.147,1	1.887,3	1.618,6

Haushaltskälte (2.F.1.b)

Haushaltskühl- und gefriergeräte und Speiseeismaschinen

	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
<i>Haushaltskühl- und gefriergeräte</i>								
Bestandsemissionen R134a [t]	-	1,27	1,33	0,18	0,17	0,13	0,12	0,11
Entsorgungsemissionen R134a [t]	-	-	-	1,20	1,20	1,02	1,02	1,02
Emissionen [t]	-	1,27	1,33	1,38	1,37	1,15	1,14	1,13
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	1,82	1,90	1,97	1,96	1,65	1,63	1,61
<i>Speiseeismaschinen</i>								
Bestandsemissionen [t]								
R134a	-	0,02	0,05	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
R404A	-	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Entsorgungsemissionen [t]								
R134a	-	-	-	-	0,75	0,67	0,64	0,62
R404A	-	-	-	-	0,19	0,17	0,16	0,15
Emissionen [t]	-	0,03	0,06	0,10	1,04	0,94	0,90	0,86
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	0,05	0,12	0,19	2,00	1,80	1,73	1,66
Summe Haushaltskälte (2.F.1.b)								
Emissionen [t]	-	1,3	1,4	1,5	2,4	2,1	2,0	2,0
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	1,9	2,0	2,2	4,0	3,4	3,4	3,3
Industriekälte (2.F.1.c)								
Bestandsemissionen [t]								
R134a	-	45,0	49,5	42,2	36,6	33,2	32,0	30,9
R404A	-	77,5	127,6	160,5	176,1	182,7	178,4	170,7
R407C	-	19,4	31,9	40,1	44,0	45,7	44,6	42,7
R23	-	2,9	3,7	3,1	2,3	1,2	0,9	0,7
R227ea	-	2,3	3,2	1,5	1,0	0,7	0,6	0,5
R116	-	0,1	0,1	-	-	0,0	0,0	0,0

	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
R422D	-	-	-	34,8	67,6	61,5	52,2	42,6
Entsorgungsemissionen [t]								
R134a	-	-	18,7	29,6	25,0	22,2	21,2	20,3
R404A	-	-	6,1	6,6	6,0	12,2	13,8	14,1
R407C	-	-	1,5	1,7	1,5	3,0	3,5	3,5
R23	-	-	1,8	1,0	0,9	1,4	1,0	0,5
R227ea	-	-	0,7	0,9	0,6	0,3	0,4	0,2
R116	-	-	-	-	-	0,0	0,0	0,0
R422D	-	-	-	-	-	21,8	18,7	17,3
Herstellungsemissionen [t]								
R134a	-	1,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
R404A	-	2,7	1,5	2,3	1,8	1,7	1,6	1,6
R407C	-	0,7	0,4	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4
R23	-	-	-	-	-	-	-	-
R227ea	-	-	-	-	-	-	-	-
R116	-	-	-	-	-	-	-	-
R422D	-	-	-	2,8	0,9	0,1	-	-
Emissionen[t]	-	151,9	247,3	328,2	365,0	388,5	369,9	346,5
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	467,4	783,9	1010,3	1123,2	1199,3	1141,5	1066,4

Transportkälte (2.F.1.d)

Kühlfahrzeuge und Kühlcontainer

Kühlfahrzeuge

Bestandsemissionen [t]								
R134a	-	14	20,5	18,1	11,1	10,7	10,9	10,8
R404A	-	30	44,9	54,2	59,9	48,7	43,4	37,2
R410A	-	4	7,1	8,0	8,4	8,5	8,7	8,6
R134a Retrofit	-	-	-	-	-	-	-	-

	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
R152a v. 401B	-	-	-	-	-	-	-	-
R218 v. 413A	-	-	-	-	-	-	-	-
R452A					0,5	11,9	18,8	24,2
Entsorgungsemissionen [t]								
R134a	-	-	1,8	3,4	2,8	1,8	1,3	1,5
R404A	-	-	5,5	7,3	9,6	12,2	9,4	10,9
R410A	-	-	0,8	1,0	1,4	2,0	1,5	1,8
R134a Retrofit	-	-	0,8	-	0,5	-	-	-
R152a v. 401B	-	-	0,1	-	-	-	-	-
R218 v. 413A	-	-	0,1	-	-	-	-	-
R452A					-	-	-	-
Herstellungsemissionen [t]								
R134a	-	0,019	0,019	0,008	0,009	0,009	0,009	0,007
R404A	-	0,011	0,012	0,012	0,012	0,002	-	-
R410A	-	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003
R134a Retrofit	-	-	-	-	-	-	-	-
R152a v. 401B	-	-	-	-	-	-	-	-
R218 v. 413A	-	-	-	-	-	-	-	-
R452A					0,001	0,013	0,014	0,011
Emissionen [t]	-	50,0	80,4	91,3	93,00	95,83	94,07	94,95
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	155,2	248,7	295,8	311,7	304,6	286,7	280,5

Kühlcontainer

Bestandsemissionen [t]								
R134a	-	17	33,1	49,6	59,1	41,5	37,7	33,3
R404A	-	1	3,6	7,3	9,8	7,8	7,0	6,1
R-513							0,08	0,15
R-452A							0,05	0,08

	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Entsorgungsemissionen [t]								
R134a	-	-	-	8,1	7,8	11,5	13,0	13,4
R404A	-	-	-	-	1,1	1,9	2,2	2,2
R-513						-	-	-
R-452A						-	-	-
Emissionen [t]	-	17,5	36,6	64,9	77,9	62,7	60,0	55,3
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	27,2	61,2	110,9	138,7	113,9	108,4	99,5
Summe Transportkälte (2.F.1.d)								
Emissionen [t]	-	64,8	118,3	157,6	163,34	158,53	154,03	150,23
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	172,4	312,7	409,7	439,6	418,5	395,0	380,0
Mobile Klimaanlage (2.F.1.e)								
Pkw, Nutzfahrzeuge, Busse, Landmaschinen, Schienenfahrzeuge, Schiffe, Flugzeuge								
<i>Pkw</i>								
Bestandsemissionen [t]								
R134a	-	1.037,1	1.850,2	2.196,8	2.425,2	2097,1	1950,6	1829,9
Entsorgungsemissionen [t]								
R134a	-	0,9	2,0	18,1	42,5	47,3	38,5	37,7
Herstellungsemissionen [t]								
R134a	0,0	14,1	15,9	16,4	18,0	4,6	4,0	3,1
Emissionen [t]	-	1.052,0	1.868,1	2.231,2	2.484,5	2149,0	1993,1	1870,7
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	1.504,4	2.671,4	3.190,6	3.552,9	3073,1	2850,1	2675,1
<i>Nutzfahrzeuge</i>								
Bestandsemissionen [t]								
R134a	-	41,2	85,4	133,3	203,2	264,1	283,9	307,1
Entsorgungsemissionen [t]								
R134a	-	-	-	0,1	0,4	0,7	0,7	0,7

	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Herstellungsemissionen [t]								
R134a	-	0,6	1,0	1,0	1,9	1,8	1,8	1,6
Emissionen [t]	-	41,8	86,4	134,4	205,6	266,5	286,5	309,4
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	59,8	123,5	192,2	294,0	381,1	409,6	442,4
<i>Busse</i>								
Bestands- und Herstellungsemissionen [t]								
R134a	-	45,1	69,8	84,5	100,2	110,2	113,4	107,5
Entsorgungsemissionen [t]								
R134a	-	-	-	-	-	-	-	-
Emissionen [t]	-	45,1	69,9	84,5	100,2	110,5	113,6	107,7
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	64,5	99,9	120,9	143,3	158,0	162,5	154,0
<i>Landmaschinen</i>								
Bestandsemissionen [t]								
R134a	-	20,2	42,1	59,8	75,9	77,0	76,6	77,1
Entsorgungsemissionen [t]								
R134a	-	-	0,1	0,1	0,1	14,4	13,6	12,9
Herstellungsemissionen [t]								
R134a	-	-	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Emissionen [t]	-	20,2	42,5	60,3	76,4	91,7	90,5	90,35
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	28,9	60,8	86,2	109,2	131,2	129,4	129,2
<i>Schienenfahrzeuge</i>								
Bestandsemissionen [t]								
R134a	-	6,4	11,6	14,4	18,0	21,3	22,1	23,2
Entsorgungsemissionen [t]								
R134a	-	-	-	-	-	1,3	1,2	1,6

	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Herstellungsemissionen [t]								
R134a	-	0,1	0,08	0,04	0,07	0,10	0,06	0,09
Emissionen [t]	-	6,5	11,6	14,5	18,0	22,7	23,3	24,9
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	9,3	16,6	20,7	25,8	32,5	33,3	35,6
<i>Schiffe</i>								
Bestandsemissionen [t]								
R134a	-	5,6	14,7	23,4	19,2	21,5	21,9	22,8
Entsorgungsemissionen [t]								
R134a	-	-	-	-	-	-	-	-
Herstellungsemissionen [t]								
R134a	-	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Emissionen [t]	-	5,7	14,9	23,6	19,3	21,5	22,0	22,8
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	8,2	21,3	33,8	27,6	30,8	31,5	32,2
<i>Flugzeuge</i>								
Bestandsemissionen [t]								
R134a	-	0,2	0,2	0,2	0,21	0,21	0,21	0,21
Emissionen [t]	-	0,2	0,2	0,2	0,21	0,21	0,21	0,21
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	0,3	0,3	0,3	0,29	0,30	0,30	0,29
Summe Mobile Klimaanlage (2.F.1.e)								
Emissionen [t]	-	1.173,8	2.099,9	2.553,2	2.557,4	2.681,0	2.551,1	2.444,2
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	1.678,5	3.002,9	3.651,0	3.657,1	3.833,8	3.648,1	3.495,2
Stationäre Klimaanlage (2.F.1.f)								
Kaltwassersätze, Raumklimageräte, Wärmepumpen, WP-Wäschetrockner, Spülmaschinen								
<i>Kaltwassersätze</i>								
Bestandsemissionen [t]								

	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
R134a	-	62,4	72,0	88,2	73,2	62,8	60,5	57,6
R407C	-	9,4	46,0	77,9	83,8	72,8	69,4	65,1
R410A	-	0,0	1,9	19,1	42,5	54,0	56,8	58,8
Entsorgungsemissionen [t]								
R134a	-	-	3,9	7,5	30,0	18,5	18,2	21,9
R407C	-	-	-	-	21,9	30,1	29,9	35,3
R410A	-	-	-	-	-	-	2,2	5,5
Herstellungsemissionen [t]								
R134a	-	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
R407C	-	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
R410A	-	-	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
Emissionen [t]	-	72,2	124,3	193,3	251,9	238,8	237,6	244,8
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	106,5	195,1	316,0	424,8	412,7	413,0	427,1

Raumklimageräte

Bestandsemissionen [t]								
R407C	-	1,9	46,4	112,4	112,2	76,3	64,3	36,2
R410A	-	0,0	8,0	44,1	119,4	168,8	182,2	190,6
R32					-	2,8	11,3	27,6
Entsorgungsemissionen [t]								
R407C	-	-	-	7,4	86,4	96,4	67,7	69,5
R410A	-	-	-	-	8,9	34,5	38,9	49,1
R32					-	-	-	-
Herstellungsemissionen [t]								
R407C	-	0,1	0,6	0,6	0,2	-	-	-
R410A	-	-	0,2	0,6	1,2	1,7	1,5	1,4
R32					0,0	0,1	0,6	1,1
Emissionen [t]	-	1,9	55,1	165,1	328,4	380,6	366,5	375,4

	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	3,4	100,3	307,0	623,2	736,3	706,8	710,1

WP-Wäschetrockner

Bestands- und Herstellungsemissionen [t]								
R134a	-	-	-	0,5	2,8	5,1	5,8	6,5
R407C	-	-	-	0,1	0,8	1,1	1,1	1,1

Entsorgungsemissionen [t]

R134a	-	-	-	-	-	-	-	-
R407C	-	-	-	-	-	-	-	-
Emissionen [t]	-	-	-	0,7	3,6	6,1	6,8	7,6
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	-	-	1,0	5,4	9,2	10,2	11,2

Wärmepumpen

Bestandsemissionen [t]								
R134a	-	0,8	1,6	3,6	5,1	3,6	3,8	4,1
R404A	-	0,2	0,8	3,2	3,2	2,9	2,8	2,6
R407C	-	1,0	4,1	17,3	32,0	40,3	43,4	47,8
R410A	-	-	0,3	4,1	12,9	22,7	26,4	31,7

Entsorgungsemissionen [t]

R134a	-	-	-	0,5	1,4	1,2	1,2	1,5
R404A	-	-	-	0,3	0,8	1,3	1,5	2,1
R407C	-	-	-	0,3	4,5	6,7	7,1	9,6
R410A	-	-	-	-	-	0,4	0,8	1,6

Herstellungsemissionen [t]

R134a	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
R404A	-	-	0,1	0,1	-	-	-	-
R407C	-	0,1	0,4	1,1	1,1	1,4	1,5	2,1
R410A	-	-	0,1	0,4	0,8	1,5	1,5	2,2

	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Emissionen [t]	-	1,8	6,7	29,5	59,8	82,1	90,1	105,2
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	3,5	13,6	60,4	117,4	160,8	176,3	205,7

Spülmaschinen mit Wärmepumpenfunktion

Bestands- und Herstellungsemissionen [t]

R134a	-	-	0,001	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
R513A								0,0004
Entsorgungsemissionen [t]								
R134a	-	-	0,000	0,00	0,00	0,00	0,07	0,07
R513A								-
Emissionen [t]	-	-	0,002	0,01	0,01	0,08	0,08	0,08
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	-	0,002	0,01	0,02	0,12	0,08	0,08

Summe Stationäre Klimaanlage (2.F.1.f)

Emissionen [t]	-	76,3	186,9	390,6	647,2	690,7	707,7	709,8
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	114,0	310,0	687,1	1.175,7	1.265,1	1.308,1	1.321,0

Summe Kälte- und Klimaanlage (2.F.1)

Zwischensumme Emissionen [t]	-	2.161	3.493	4.314	4.860	4.555	4.324	4.141
Zwischensumme Emissionen [kt CO₂-Äq.]	-	4.348	6.975	8.606	9.489	8.665	8.096	7.594

Schaumherstellung (2.F.2)

PU Hart- und Integralschaum

Herstellungs- und Anwendungsemissionen [t]

HFKW-134a	-	94,9	80,9	45,9	14,9	22,2	20,5	15,0
HFKW-365mfc/245fa	-	-	97,9	117,3	346,4	240,3	253,5	237,3
HFKW-227ea	-	-	3,8	5,1	14,7	5,3	5,2	3,3
Emissionen [t]	-	94,9	182,7	168,4	376,1	267,8	279,3	255,6
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	135,7	216,9	186,9	387,4	257,5	266,1	234,9

	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020

XPS-Schaum

Herstellungs- und Anwendungsemissionen [t]

HFKW-134a	-	-	353,0	339,1	288,5	185,7	24,5	24,5
HFKW-152a	-	-	683,5	323,0	222,1	255,0	204,0	204,0
Emissionen [t]	-	-	1036,5	662,1	510,6	440,7	228,5	228,5
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	-	589,5	525,0	440,0	297,1	60,3	60,3

PU Montageschaum

Herstellungs- und Anwendungsemissionen [t]

HFKW-134a	-	756,3	392	91,4	39,6	11,1	9,0	12,3
HFKW-152a	-	718,8	77,1	34,7	39,6	48,8	47,3	46,7
Emissionen [t]	-	1.475,0	469,1	126,1	79,2	60,0	56,3	59,0
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	1.170,6	570,1	135,0	61,6	22,0	18,8	23,4

Summe Schaumherstellung (2.F.2)

Zwischensumme Emissionen [t]	-	1569,9	1688,2	1027,3	965,2	768,5	564,0	543,1
Zwischensumme Emissionen [kt CO₂-Äq.]	-	1306,3	1388,5	918,4	888,0	576,6	345,1	318,6

Feuerlöschmittel (2.F.3)

Bestandsemissionen [t]

HFKW-227ea	-	0,5	1,82	9,4	15,2	18,7	18,6	16,6
HFKW-236fa	-	-	0,19	1,4	2,9	3,8	4,1	4,5
HFKW-23	-	-	0,01	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2

Befüllungsemissionen [t]

HFKW-227ea	-	0,08	0,01	0,03	0,01	-	-	-
HFKW-236fa	-	-	0,02	0,08	0,006	0,008	0,008	0,008
HFKW-23	-	-	-	-	-	-	-	-

	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Entsorgungsemissionen [t]								
HFKW-227ea	-	-	-	-	-	0,22	0,39	7,22
HFKW-236fa	-	-	-	-	-	-	-	-
HFKW-23	-	-	-	-	-	-	-	-

Summe Feuerlöschmittel (2.F.3)

Zwischensumme Emissionen [t]	-	0,59	1,98	11,00	18,32	22,98	23,37	28,53
Zwischensumme Emissionen [kt CO₂-Äq.]	-	1,91	7,45	45,66	80,24	101,56	104,97	123,75

Aerosole (2.F.4)

Asthmasprays (MDIs)

Anwendungsemissionen [t]

HFKW-227ea	-	36,8	26,4	16,0	9,4	6,9	6,2	5,6
------------	---	------	------	------	-----	-----	-----	-----

Herstellungs- und Anwendungsemissionen [t]

HFKW-134a	-	46,9	175,9	198,9	212,1	220,0	222,0	224,0
Emissionen [t]	-	83,7	202,2	214,9	221,5	226,9	228,2	229,6
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	185,5	336,4	335,9	333,6	336,8	337,4	338,2

Andere Aerosole

Anwendungsemissionen [t]

HFKW-134a	-	160	160	170,1	189,11	13,1	10,7	2,6
HFKW-152a	-	10	10	25,9	7,1	-	-	-

Herstellungsemissionen [t]

HFKW-134a	-	2,4	2,4	2,6	2,8	0,1	0,1	-
HFKW-152a	-	0,2	0,2	0,4	0,1	-	-	-
Emissionen [t]	-	172,6	172,6	199	199,11	13,2	10,8	2,6
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	233,5	342,2	204,8	274,5	18,8	15,4	3,8

Summe Aerosole (2.F.4)

	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Zwischensumme Emissionen [t]	-	256,2	455,3	419,5	425,7	240,1	238,9	232,2
Zwischensumme Emissionen [kt CO₂-Äq.]	-	419,0	680,7	594,2	616,2	355,6	352,7	342,0
Summe Emissionen Anwendung als ODS-Ersatzstoff [t]	-	3.947	5.622	5.787	6.364	5.689	5.263	5.082
Summe Emissionen Anwendung als ODS-Ersatzstoff [kt CO₂-Äq.]	-	5.994	9.000	10.181	11.244	9.915	9.143	8.675

4.5 Sonstige Produktherstellung und -verwendung (2.G)

	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
--	------	------	------	------	------	------	------	------

Elektrische Betriebsmittel (2.G.1)

Schaltanlagen und Produktion elektrischer Bauteile für die Energieübertragung

SF ₆								
Befüllungsemissionen Schaltanlagen [t]	25,9	9,5	6,2	4,3	3,8	2,1	2,2	1,6
Befüllungsemissionen Bauteile [t]	4,1	26,6	12,0	6,2	6,9	3,6	2,7	1,8
Bestandsemissionen Schaltanl. & Bauteile [t]	8,1	7,3	8,5	7,1	6,5	6,2	6,1	6,0
Entsorgungsemissionen Schaltanl. & Bauteile [t]	-	-	0,3	1,2	0,2	0,2	0,5	0,3

Summe Elektrische Betriebsmittel (2.G.1)

Zwischensumme Emissionen [t]	38,1	43,4	27,1	18,7	17,5	12,1	11,5	9,60
Zwischensumme Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	867,8	990,0	617,1	426,3	398,1	276,0	262,8	218,9

SF₆ und FKW aus sonstiger Produktverwendung (2.G.2)

Teilchenbeschleuniger (2.G.2.b)

SF ₆								
Befüllungsemissionen [t]	0,02	0,02	-	-	-	-	-	-
Bestandsemissionen [t]	5,20	4,98	4,92	4,13	4,14	4,15	4,16	4,16
Entsorgungsemissionen [t]	-	-	-	-	-	-	-	-
Emissionen SF ₆ [t]	5,21	4,99	4,92	4,13	4,14	4,15	4,16	4,16
Emissionen SF ₆ [kt CO ₂ -Äq.]	118,85	113,78	112,13	94,19	94,47	94,68	94,75	94,82

Isolierglasfenster (2.G.2.c)

SF ₆								
Befüllungsemissionen [t]	59,9	28,6	5,7	1,4	-	-	-	-
Bestandsemissionen [t]	9,0	20,4	19,6	16,0	11,4	8,1	6,8	5,4

	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Entsorgungsemissionen [t]	-	5,6	37,2	75,0	103,0	136,5	142,5	105,7
Emissionen SF ₆ [t]	68,9	54,6	62,6	92,3	114,4	144,6	149,3	111,1
Emissionen SF ₆ [kt CO ₂ -Äq.]	1.570,6	1.244,5	1.426,2	2.104,6	2.608,5	3.297,4	3.403,9	2.533,3

Adiabatisch (2.G.2.d)

Autoreifen

SF ₆								
Entsorgungsemissionen [t]	65	50,00	2,7	0,579	0,052	-	-	-
Emissionen SF ₆ [t]	65	50,00	2,7	0,579	0,052	-	-	-
Emissionen SF ₆ [kt CO ₂ -Äq.]	1.482,0	1.140,0	61,6	13,2	1,2	-	-	-

Sonstige (2.G.2.e)

Spurengas

Emissionen SF ₆ [t]	0,50	0,50	0,50	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Emissionen SF ₆ [kt CO ₂ -Äq.]	11,4	11,40	11,40	91,20	91,20	91,20	91,2	91,2

Summe SF₆ und FKW aus sonstiger Produktverwendung (2.G.2)

Zwischensumme Emissionen [t]	152,1	139,9	87,0	113,5	132,2	160,4	165,7	124,6
Zwischensumme Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	3.467,9	3.189,7	1.981,4	2.581,9	2.972,6	3.614,3	3.739,9	2.807,2

ORC-Anlagen (2.G.4)

Herstellungs- und Bestandsemissionen [t]

HFKW-245fa	-	-	-	-	8,59	10,7	10,5	12,94
HFKW-365mfc	-	-	-	-	0,85	0,84	0,91	0,84
Solkatherm Galden	-	-	-	-	0,45	0,45	0,45	0,45

	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
HFKW-134a	-	-	-	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14

Entsorgungsemissionen [t]

HFKW-245fa	-	-	-	-	-	-	-	-
HFKW-365mfc	-	-	-	-	-	-	-	-
Solkatherm Galden	-	-	-	-	-	-	-	-
HFKW-134a	-	-	-	-	-	-	-	-
Emissionen [t]	-	-	-	0,14	9,57	11,06	11,55	13,97
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	-	-	0,20	9,72	11,24	11,74	14,24
Emissionen C ₅ F ₁₂ [t]	-	-	0,02	0,09	-	-	-	-
Emissionen C ₅ F ₁₂ [kt CO ₂ -Äq.]	-	-	0,16	0,82	-	-	-	-

Summe ORC-Anlagen (2.G.4)

Zwischensumme Emissionen [t]	-	-	0,02	0,23	9,57	11,06	11,55	13,97
Zwischensumme Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	-	0,16	1,03	9,72	11,24	11,74	14,24
Summe Emissionen <i>Sonstige Produktherstellung und - verwendung</i> [t]	190,2	183,3	183,3	114,1	132,5	183,5	188,8	148,2
Summe Emissionen <i>Sonstige Produktherstellung und - verwendung</i> [kt CO ₂ -Äq.]	4.335,7	4.179,7	4.179,7	2.598,7	3.009,2	3.901,6	4.014,4	3.040,3

4.6 Vertrauliche Daten (2.H.3)

	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
Radar, Schweißen, Optische Glasfasern, Sohlen, Medizin- und Kosmetikprodukte, Wärmeüberträger, Lösemittel								
Summe Emissionen <i>Vertrauliche Daten</i> [t]	13,5	34,47	21,32	16,83	12,41	9,93	10,79	7,44
Summe Emissionen <i>Vertrauliche Daten</i> [kt CO ₂ -Äq.]	294,3	714,5	406,0	295,3	186,6	135,9	157,6	96,0

4.7 Fluorierte Treibhausgase für die freiwillige Berichterstattung

	2000	2005	2010	2015	2017	2018	2019	2020
Gesamtemissionen [t] je Anwendung								
uHFKW (1234yf, 1234ze, 1233zd)	-	-	-	77,34	437,95	610,43	896,12	1036,32
Industrielle HFE (offen und geschlossen)	5,09	31,27	43	57,67	57,93	66,07	61,14	57,14
HFE für Anästhesie	80,5	117,1	162,9	174,4	179,2	180,3	183,0	183,0
PFPE	16,55	20,01	22,49	22,33	22,06	22,06	22,09	22,08
SF ₅ CF ₃	-	-	-	-	-	-	-	-
SO ₂ F ₂	-	-	47,5	48,2	31,2	53,6	154,8	154,8
Weitere (N-haltige) FKW	0,33	1,46	3,33	5,612	5,848	6,074	6,31	6,43
Summe Emissionen F-Gase für die freiwillige Berichterstattung [t]	102,47	169,84	279,22	385,55	734,19	938,53	1323,46	1459,77
Summe Emissionen F-Gase für die freiwillige Berichterstattung [kt CO₂-Äq.]	49,7	95,24	324,58	330,46	261,73	355,31	769,13	768,30

4.8 Gesamtemissionen

Gesamt-emissionen [t]	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
HFKW	386	4.076	5.699	5.825	6.414	5.734	5.300	5.117
FKW	388	106	96	42	32	37	31	28
SF ₆	206	209	159	145	151	174	178	135
NF ₃	0	0	1	4	1	0,68	0,64	0,63
Freiwillig berichtete Treibhausgase	46	103	170	279	386	939	1.323	1.460
Summe [t]	1.026	4.494	6.125	6.295	6.984	6.885	6.833	6.741

Gesamt-emissionen [Mt CO ₂ -Äq.]	1990	2000	2005	2010	2015	2018	2019	2020
HFKW	5,62	7,53	9,65	10,41	11,35	10,01	9,23	8,76
FKW	3,07	0,91	0,81	0,36	0,27	0,31	0,26	0,24
SF ₆	4,70	4,76	3,61	3,31	3,44	3,97	4,06	3,09
NF ₃	0,01	0,00	0,02	0,06	0,01	0,01	0,01	0,01
Freiwillig berichtete Treibhausgase	0,00001	0,05	0,10	0,32	0,33	0,36	0,77	0,77
Summe [Mt CO₂-Äq.]	13,40	13,25	14,19	14,46	15,40	14,66	14,33	12,87