

TEXTE

50/2024

Inventarermittlung der F-Gase 2021/2022

Daten von HF(C)KW, FKW, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE und PFPME für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für die Berichtsjahre 2021 und 2022

von:

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

Herausgeber:
Umweltbundesamt

TEXTE 50/2024

Projektnummer 173638

FB001364

Abschlussbericht

Inventarermittlung der F-Gase 2021/2022

Daten von HF(C)KW, FKW, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE und PFPME für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für die Berichtsjahre 2021 und 2022

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
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Öko-Recherche
Münchener Str. 23a
60329 Frankfurt

Abschlussdatum:

Oktober 2023

Redaktion:

Fachgebiet III 1.4 Stoffbezogene Produktfragen
Kerstin Martens

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, März 2024

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

Kurzbeschreibung: Inventarermittlung der F-Gase 2021/2022

Der Bericht präsentiert die Emissionsdaten der fluorinierten Treibhausgase HF(C)KW, FKW, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE und PFPME (F-Gase) für die Jahre 1995-2022 für Deutschland.

Die Emissionen bewegten sich in den Jahren 1995 bis 1998 auf hohem, relativ konstantem Niveau. Im Jahr 1999 gab es ein sprunghaftes Absinken. Zwischen den Jahren 2000 und 2017 fand ein leichter Aufwärtstrend statt. Ab 2018 kam es zu einem deutlichen Abwärtstrend. Dieser hat sich fortgesetzt, und so lagen die Emissionen im Jahr 2022 bei 4.805 t, was 9,6 Mio. t in CO₂-Äquivalenten entspricht. Damit machen sie etwa 1,2 % der Gesamtemissionen aller Treibhausgase in Deutschland aus, die 2022 bei etwa 746 Mio. t CO₂-Äquivalenten lagen (Umweltbundesamt 2023c).

„Dieser Bericht ist entsprechend der Strukturierung des Nationalen Inventarberichts (NIR) aufgeteilt. In diesem alle Treibhausgase umfassenden Bericht werden die fluorinierten 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.3 werden vertrauliche Emissionen verschiedener Sektoren aggregiert berichtet. Darunter fallen die Emissionen aus der Herstellung von Solarzellen mit FKW (2.E.3), aus der Verwendung als 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 Perfluordecalin in medizinischen und kosmetischen Anwendungen (2.G.2.e). Außerdem gibt es Informationen zu freiwillig berichteten fluorinierten Treibhausgasen.“ (Warncke und Gschrey 2021b).

Abstract: Inventory of F-Gases 2021/2022

This report presents the 1995-2022 data on the German emissions of fluorinated greenhouse gases H(C)FCs, PFCs, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE, and PFPME (F-gases).

Emissions were at a relatively constant and high level between 1995 and 1998. In 1999 there was a sharp decline. A slight upward trend took place between 2000 and 2017. From 2018 there was a clear downward trend. This trend has continued and emissions in 2022 were 4,805 t, which corresponds to 9.6 million tonnes of CO₂ equivalents. This means they account for around 1.2 % of the total emissions of all greenhouse gases in Germany, which amounted to around 746 million tonnes of CO₂ equivalents in 2022 (Umweltbundesamt 2023c).

“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.H.3. This includes emissions from the wafer production with PFC

(2.E.3), 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) and also information on voluntarily reported fluorinated greenhouse gases." (Warncke und Gschrey 2021b)

1.5	Sonstige Produktherstellung und -verwendung (2.G).....	51
1.5.1	Elektrische Betriebsmittel (2.G.1)	53
1.5.1.1	Elektrische Anlagen der Energieübertragung und -verteilung.....	53
1.5.1.2	Produktion elektrischer Bauteile für die Energieübertragung (T&D-Bauteile).....	54
1.5.2	SF ₆ und FKW aus sonstiger Produktverwendung (2.G.2)	54
1.5.2.1	Militär - AWACS (2.G.2.a)	54
1.5.2.2	Teilchenbeschleuniger (2.G.2.b)	54
1.5.2.3	Isolierglasfenster (2.G.2.c).....	54
1.5.2.4	Adiabatische Anwendungen – Autoreifen und Sportschuhe (2.G.2.d)	55
1.5.2.5	Sonstige: Spurengas, Schweißen, optische Glasfasern, medizinische und kosmetische Anwendungen (2.G.2.e)	55
1.5.3	ORC-Anlagen (2.G.4).....	56
1.6	Andere Bereiche (2.H.3)	56
2	Fluorierte Treibhausgase für die freiwillige Berichterstattung.....	57
2.1	Ungesättigte teilfluorierte Kohlenwasserstoffe	57
2.2	Teilfluorierte Ether (HFE).....	60
2.2.1	HFE in der Industrie.....	60
2.2.2	HFE als Narkosegase in der Medizin.....	61
2.3	Perfluorierte Polyether (PFPE).....	63
2.3.1	GWP von PFPE.....	63
2.3.2	Verwendung in ORC-Anlagen	63
2.3.3	Wärmeüberträger in der Halbleiterindustrie	63
2.3.4	Dampfphasen-Reflow-Löten von Leiterplatten mit PPFMIE (Perfluorpolymethylisopropylether)	64
2.3.5	Lösemittel in Schmierstoffen.....	64
2.3.6	Zusammenfassung der PFPE-Emissionen in Deutschland	64
2.4	Trifluormethylschwefelpentafluorid (SF ₅ CF ₃)	64
2.5	Sulfuryldifluorid (SO ₂ F ₂).....	65
2.6	Weitere fluorierte Treibhausgase	65
2.7	Die zusätzlichen F-Gase für die freiwillige Berichterstattung.....	66
3	Quellenverzeichnis	67
4	Emissionstabellen für 2022 im Vergleich mit 1990, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 und 2021	70
4.1	Chemische Industrie: Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF ₆ (2.B.9)	70
4.2	Metallproduktion (2C).....	71
4.3	Elektronikindustrie (2.E).....	72

4.4	Anwendung als ODS-Ersatzstoff (2.F).....	74
4.5	Sonstige Produktherstellung und -verwendung (2.G).....	89
4.6	Vertrauliche Daten (2.H.3).....	92
4.7	Fluorierte Treibhausgase für die freiwillige Berichterstattung.....	93
4.8	Gesamtemissionen.....	94

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	F-Gas-Emissionen in Mio. t CO ₂ -Äquivalenten (1990-2022)	17
Abbildung 2:	F-gas emissions in million tonnes of CO ₂ equivalents (1990-2022).....	19
Abbildung 3:	Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland [Mio. t CO ₂ -Äquivalente] 1995-2022	23
Abbildung 4:	Anteile der klimawirksamen F-Gas-Emissionen bezogen auf CO ₂ -Äquivalente nach Sektoren in Deutschland 2022 (%)	24
Abbildung 5:	Anteile der verschiedenen Sektoren an den HFKW-Emissionen bezogen auf Tonnen in Deutschland 2022 (%)	34
Abbildung 6:	Anteile der Emissionen der verschiedenen Subsektoren im Sektor Kälte- und Klimaanlage bezogen auf Tonnen in Deutschland 2022 (%).....	35
Abbildung 7:	Anteile der Emissionen der verschiedenen Subsektoren im Sektor Kälte- und Klimaanlage bezogen auf CO ₂ -Äquivalente in Deutschland 2022 (%)	36
Abbildung 8:	Anteile der klimawirksamen Emissionen bezogen auf CO ₂ -Äquivalente des Sektors 2.G und 2.H.3 in Deutschland 2022 (%)	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Emissionen fluorierter Treibhausgase [t] 1995-2022	22
Tabelle 2:	Emissionen fluorierter Treibhausgase [Mio. t CO ₂ -Äquivalente] 1995-2022	22
Tabelle 3:	Emissionen bei der Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF ₆ [t] 1995-2022	25
Tabelle 4:	Emissionen bei der Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF ₆ [kt CO ₂ -Äquivalente] 1995-2022	25
Tabelle 5:	Emissionen aus der Metallproduktion [t] 1995-2022	26
Tabelle 6:	Emissionen aus der Metallproduktion [kt CO ₂ -Äquivalente] 1995-2022	26
Tabelle 7:	Emissionen in der Elektronik-Industrie [t] 1995-2022.....	28
Tabelle 8:	Emissionen in der Elektronik-Industrie [kt CO ₂ -Äquivalente] 1995-2022	29
Tabelle 9:	HFKW-Emissionen [Mio. t CO ₂ -Äquivalente] 1995-2022.....	33
Tabelle 10:	Kältemittelanteile in Neuanlagen in Prozent in großen Supermärkten > 1500 m ² (2015-2022)	38
Tabelle 11:	Kältemittelanteile in Neuanlagen in Prozent in Discountern (2015-2022)	39
Tabelle 12:	Kältemittelanteile in Neuanlagen in Prozent im Bereich Klimaanlagen (2016-2022)	42
Tabelle 13:	Kältemittelanteile des neuen Chiller-Modells für die unterschiedlichen Leistungsklassen (2015-2025)	44
Tabelle 14:	Kältemittelanteile in Neuanlagen in Prozent in gewerblichen Geschirrspülmaschinen (2016-2022)	47
Tabelle 15:	SF ₆ -Emissionen und vertrauliche Emissionen (2.H.3) [t] 1995- 2022.....	51
Tabelle 16:	SF ₆ -Emissionen und vertrauliche Emissionen (2.H.3) [Mio. t CO ₂ -Äquivalente] 1995-2022	52
Tabelle 17:	Emissionen ungesättigter HFKW in Tonnen und kt CO ₂ - Äquivalenten 2012, 2015, 2017, 2020-2022.....	58
Tabelle 18:	Emissionen von HFE (-7100, -7200, -7300, -7500) aus offenen industriellen Anwendungen [kt CO ₂ -Äquivalente] 2000-2022	61
Tabelle 19:	Wärmeübertragung: HFE-Emissionen in der Halbleiter- und sonstigen Industrie [kt CO ₂ -Äquivalente] 2000-2022	61
Tabelle 20:	Chemische und ökologische Kenndaten der fünf halogenierten Narkosegase.....	62
Tabelle 21:	Emissionen der halogenierten Narkosegase in Deutschland 1990-2022 unter Einbeziehung ihrer Metabolisierungsraten [t]	62

Tabelle 22:	Emissionen der halogenierten Narkosegase in Deutschland 1990-2022 [kt CO ₂ -Äquivalente] – ohne Halothan.....	63
Tabelle 23:	PFPE-Emissionen aus Wärmeübertragung, Dampfphasen- Reflow-Löten, Schmierstoffen und ORC-Anlagen 1990-2022 in Tonnen und kt CO ₂ -Äquivalenten	64
Tabelle 24:	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 1990-2022	65
Tabelle 25:	Emissionen der vom Umweltbundesamt freiwillig berichteten zusätzlichen F-Gase nach Stoffen im Jahr 2022 in kt CO ₂ - Äquivalenten	66

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
2019 Refinements	2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Überarbeitung der IPCC-GL)
a	Jahr
AC	Air Conditioning (Klimatisierung)
AR4	Fourth IPCC Assessment Report (4. IPCC Sachstandsbericht)
AR5	Fifth IPCC Assessment Report (5. IPCC Sachstandsbericht)
AR6	Sixth IPCC Assessment Report (6. IPCC Sachstandsbericht)
AWACS	Airborne Early Warning and Control System (im Flugzeug befindliches Radarsystem)
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
CF₄	Tetrafluormethan
C₂F₆	Hexafluorethan
ChemKlimaschutzV	Chemikalien-Klimaschutzverordnung
CVD	Chemical Vapour Deposition (chemische Gasphasenabscheidung)
DX	Direct Expansion (Direktverdampfung)
E-PRTR	European Pollutant Release and Transfer Register (Europäisches Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister)
EF	Emissionsfaktor
F-Gase	Fluorierte Treibhausgase
F-Gas-Verordnung	Verordnung (EU) Nr. 517/2015 über fluorierte Treibhausgase
FKW	Vollhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
FCKW	Vollhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
HFCKW	Teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe
HFE	Hydrofluorether
HFKW	Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
HFO	Hydrofluorolefine (ungesättigte HFKW)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)
IPCC-GL	Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines (IPCC-Richtlinien)
kt	Kilotonne

Abkürzung	Erläuterung
MAC	Mobile Air Conditioning (mobile Klimatisierung)
MAC-Richtlinie	Richtlinie 2006/40/EG über Emissionen aus Klimaanlage in Kraftfahrzeugen
Mio.	Millionen
NAEWF	NATO Airborne Early Warning Force (militärisches Hauptquartier der NATO zur Führung der NATO-AWACS-Frühwarnflotte)
NF₃	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	Perfluorpolyether
PFPME	Perfluorpolymethylisopropylether
PFTBA	Perfluortributylamin
PU	Polyurethan
PV-Industrie	Photovoltaik-Industrie
RAC	Refrigeration and Air Conditioning (Kühlung und Klimatisierung)
REACH-Verordnung	Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe
SF₆	Schwefelhexafluorid
SUV	Sports Utility Vehicle (Geländelimousinen)
SV	Selbstverpflichtung
t	Tonne
T&D	Transmission and Distribution (of electric power) (Übertragung und Verteilung (von Elektrizität))
TEAP	Technology and Economic Assessment Panel (UN Gremium für Technologie- und Wirtschaftsbewertung)
UBA	Umweltbundesamt
uHFKW	Ungesättigte teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
UN	United Nations (Vereinte Nationen)
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change (Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen)
UNEP	United Nations Environment Programme (Umweltprogramm der Vereinten Nationen)

Abkürzung	Erläuterung
US EPA	United States Environmental Protection Agency (Umweltschutzbehörde der Vereinigten Staaten von Amerika)
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.

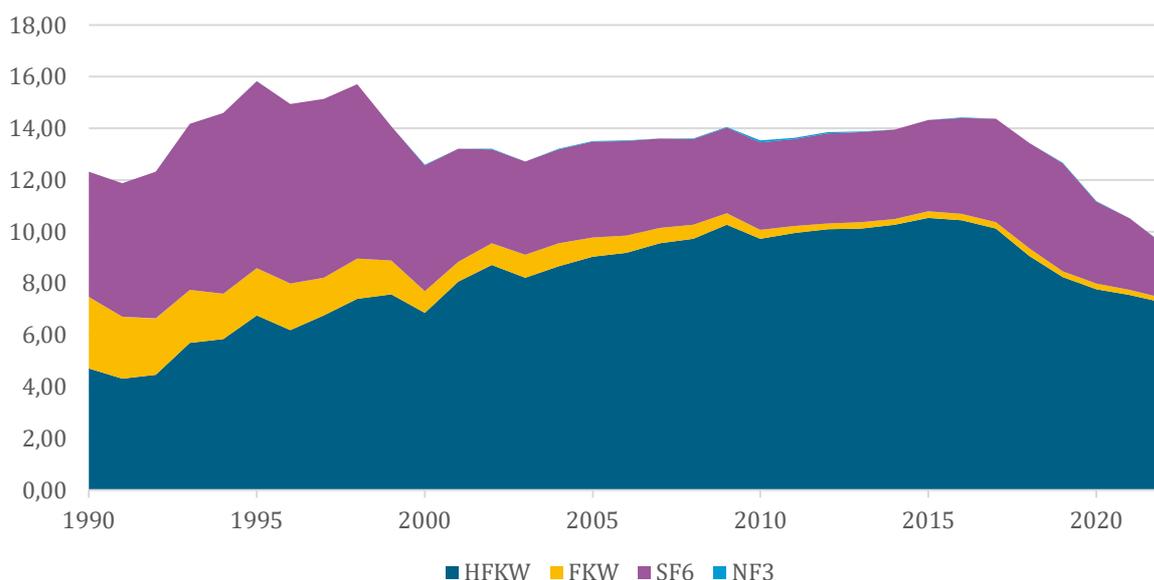
Die Anforderungen an die Berichterstattung von Annex I-Ländern, zu denen die Bundesrepublik Deutschland gehört, sind in den UNFCCC Annex I Reporting Guidelines festgelegt. Für die Ermittlung der Daten und datenbezogenen Informationen sind durch das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines 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, 2018) auch jährlich Treibhausgasemissionen an die Europäische Kommission berichten. Die Berichterstattung fluoriierter Treibhausgase (F-Gase) ist ebenfalls in der Verordnung (EU) Nr. 517/2014 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014) vorgeschrieben.“ (Warncke und Gschrey 2021b)

Dieser Bericht präsentiert die Emissionsdaten der fluorierten Treibhausgase HF(C)KW, FKW, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE und PFPME (F-Gase) für die Jahre 1995-2022 für Deutschland. Ziel ist es, eine qualifizierte Datenlage für die Emissionsberichterstattung der Berichtsjahre 2021 und 2022 für diese Gase zu liefern.

Die Emissionen bewegten sich in den Jahren 1995 bis 1998 auf hohem, relativ konstantem Niveau. Im Jahr 1999 gab es ein sprunghaftes Absinken. Zwischen den Jahren 2000 und 2017 fand ein leichter Aufwärtstrend statt. Ab 2018 kam es zu einem deutlichen Abwärtstrend. Dieser hat sich fortgesetzt, und so lagen die Emissionen im Jahr 2022 bei 4.805 t, was 9,6 Mio. t in CO₂-Äquivalenten entspricht. Damit machen sie etwa 1,2 % der Gesamtemissionen aller Treibhausgase in Deutschland aus, die 2022 bei etwa 746 Mio. t CO₂-Äquivalenten lagen (Umweltbundesamt 2023c).

Abbildung 1: F-Gas-Emissionen in Mio. t CO₂-Äquivalenten (1990-2022)



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

„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.3 werden vertrauliche Emissionen verschiedener Sektoren aggregiert berichtet. Darunter fallen die Emissionen aus der Herstellung von Solarzellen mit FKW (2.E.3), 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 Perfluorodecalin in medizinischen und kosmetischen Anwendungen (2.G.2.e). Außerdem gibt es Informationen zu freiwillig berichteten fluorierten Treibhausgasen. Die einzelnen Kapitel sind wiederum in Untersektoren aufgeteilt.“ (Warncke und Gschrey 2021b)

Für die Berechnungen der CO₂-Äquivalente wurden für diesen Bericht zum ersten Mal die GWP-Werte des Fünften IPCC-Sachstandsberichts (Stocker et al. 2013) verwendet, da sie nach dem Übereinkommen von Paris (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2016) ab dem Berichtsjahr 2021 verpflichtend unter UNFCCC anzuwenden sind. In einigen Fällen sind die GWP-Werte niedriger, in anderen höher als die des Vierten IPCC-Sachstandsberichts (Solomon et al. 2007), die bisher für die Berechnungen herangezogen wurden. Ein Vergleich der GWP-Werte kann im Internet auf den Seiten des Umweltbundesamtes (Umweltbundesamt 2022) eingesehen werden. Für alle in der Folge genannten Emissionsdaten zwei Angaben zu den CO₂-Äquivalenten zu machen, ist für die Lesbarkeit nicht sinnvoll. Durch diesen Umstand sind die Werte der Emissionen in CO₂-Äquivalenten in diesem Bericht nicht mehr mit denen aus den vorangegangenen Berichten zu vergleichen. Allerdings stellen die Angaben in metrischen

Tonnen weiterhin die Vergleichbarkeit sicher, wobei Modellanpassungen zu beachten sind, die zu veränderten Werten führen.

Der erste Abschnitt im Nationalen Inventarbericht zu den Emissionen von fluorierten Treibhausgasen ist das Kapitel 2.B.9. „Chemische Industrie, Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF₆“. In diesem Bereich lagen die Emissionen von HFKW und SF₆ 2022 bei 7 (metrischen) Tonnen, was etwa 24 kt CO₂-Äquivalenten entspricht und damit einen geringen Anteil an den Gesamtemissionen fluorierter Treibhausgase hat. Hier sanken die Emissionen seit Beginn der Erhebungen stetig; im Jahr 2022 fand jedoch, aufgrund höherer Verbrauchsmengen, ein leichter Anstieg statt.

Im Sektor Metallproduktion (2.C.3; 2.C.4) umfassten die Emissionen im Jahr 2022 ca. 17 Tonnen, was ca. 142 kt CO₂-Äquivalenten entspricht. Auch in diesem Sektor sanken die Emissionen stetig, es fand aber im Jahr 2022, aufgrund höherer Verbrauchsmengen, ein leichter Anstieg statt.

Im Sektor Elektronik-Industrie (2.E) sind die Halbleiter- und Platinenproduktion, die Photovoltaik sowie die Anwendung von fluorierten Substanzen als Wärmeüberträger enthalten. Aus diesen Sektoren fanden Emissionen in Höhe von 20 Tonnen im Jahr 2022 statt (241 kt CO₂-Äquivalente), vorwiegend FKW, aber auch NF₃. Auch in diesem Sektor sanken die Emissionen stetig, es fand aber im Jahr 2022, aufgrund höherer Verbrauchsmengen, ein leichter Anstieg statt.

Den größten Anwendungsbereich fluorierter Gase bilden die ODS-Ersatzstoffe (2.F) und verursachten 2022 mit 4.657 metrischen Tonnen ca. 97 % aller F-Gas-Emissionen (75 % bezogen auf CO₂-Äquivalente, nämlich 7.185 kt). Der Sektor 2.F enthält alle Kältemittelanwendungen in stationären und mobilen Kälte- und Klimaanlage sowie Treibmittel für Schäume und Aerosole und außerdem Feuerlösch- und Lösemittel. Der Bereich 2.F ist allerdings auch für den starken Rückgang der Gesamt-F-Gas-Emissionen verantwortlich, da in vielen Kälte- und Klimaanlage seit vielen Jahren auf Alternativen zu Stoffen mit hohem GWP gesetzt wird.

Der Bereich 2.G, die „Sonstige Produktherstellung und -verwendung“, ist zwar nur für etwa 2 % der Emissionen in metrischen Tonnen (102 Tonnen), allerdings wegen des hohen Treibhauspotenzials von SF₆ für 20 % der Emissionen in CO₂-Äquivalenten verantwortlich, was 1.960 kt entspricht. Der größte Anwendungsbereich von SF₆, die elektrischen Betriebsmittel, sind hier enthalten. Außerdem fluorierte Gase in ORC-Anlagen, sowie Sportschuhen und Medizinprodukten. Die Emissionen aus diesem Bereich sinken stetig.

„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 Perfluorpolyether (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)).“ (Warncke und Gschrey 2021b).

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.

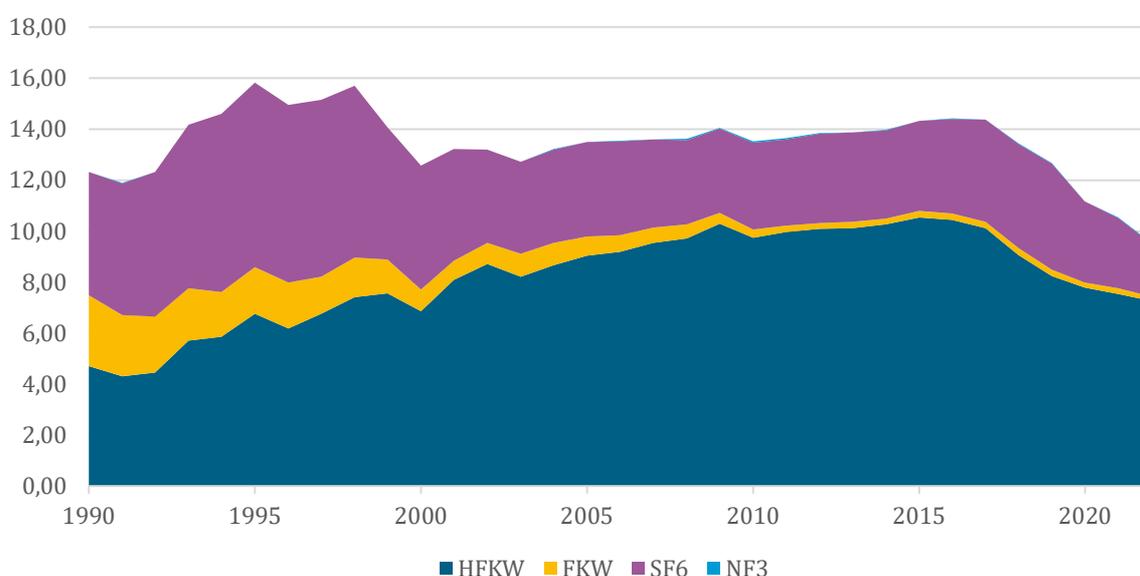
The reporting requirements of Annex I countries, to which the Federal Republic of Germany belongs, are set out in the UNFCCC Annex I Reporting Guidelines. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) has established guidelines that include methods to determine the data and data-related information. 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-Verordnung, 2018). The reporting of fluorinated greenhouse gases (F-gases) is also prescribed in Regulation (EU) No. 517/2014 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014).” (Warncke und Gschrey 2021b)

This report presents the 1995-2022 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 2021 and 2022 for these gases.

Emissions remained at a high, relatively constant level from 1995 to 1998. There was a sharp drop in 1999. There was a slight upward trend between 2000 and 2017. From 2018, there was a clear downward trend. This trend has continued and emissions in 2022 amounted to 4,805 t, which corresponds to 9.6 million tonnes of CO₂ equivalents. They therefore account for around 1.2 % of the total emissions of all greenhouse gases in Germany, which amounted to around 746 million tonnes of CO₂ equivalents in 2022 (Umweltbundesamt 2023c).

Abbildung 2: F-gas emissions in million tonnes of CO₂ equivalents (1990-2022)



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

“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.H. This includes emissions from the wafer production with PFC (2.E.3), 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) and also information on voluntarily reported fluorinated greenhouse gases. Most of these chapters are again partitioned into subchapters.” (Warncke und Gschrey 2021b)

For the first time, the GWP values of the Fifth IPCC Assessment Report (Stocker et al. 2013) were used for the calculations of CO₂ equivalents for this report, as they are mandatory under the UNFCCC in accordance with the Paris Agreement (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2016), starting from the 2021 reporting year. In some cases, the GWP values are lower, in others higher than those of the Fourth IPCC Assessment Report (Solomon et al. 2007), which were previously used for the calculations. A comparison of the values can be found on the website of the Federal Environment Agency (Umweltbundesamt 2022).

Readability-wise, it doesn't make sense to provide two sets of CO₂ equivalents for all the emission data given below. As a result, the values for emissions in CO₂ equivalents in this report cannot be compared directly with those from previous reports. However, the figures in metric tonnes are still comparable but model adjustments that lead to changed values have to be kept in mind.

The first section in the National Inventory Report on emissions of fluorinated greenhouse gases is Chapter 2.B.9 "Chemical industry, production of halogenated hydrocarbons and SF₆". In this sector, emissions of HFCs and SF₆ amounted to 7 metric tonnes in 2022, which corresponds to around 24 kt CO₂ equivalents and thus accounts for a small proportion of total emissions of fluorinated greenhouse gases. Here, emissions have fallen steadily since the start of the reporting; however, there was a slight increase in 2022 due to higher consumption volumes.

In the metal production sector (2.C.3; 2.C.4), emissions in 2022 amounted to approx. 17 metric tonnes, which corresponds to approx. 142 kt CO₂ equivalents. Emissions also fell steadily in this sector, but there was a slight increase in 2022 due to higher consumption volumes.

The electronics industry sector (2.E) includes semiconductor and circuit board production, photovoltaics and the use of fluorinated substances as heat exchangers. Emissions from these sectors amounted to 20 metric tonnes in 2022 (241 kt CO₂ equivalents), mainly HFCs, but also NF₃. Emissions also fell steadily in this sector, but there was a slight increase in 2022 due to higher consumption volumes.

ODS substitutes (2.F) make up the largest sector of fluorinated gases and, at 4,657 metric tonnes, caused around 97 % of all F-gas emissions in 2022 (75 % in terms of CO₂ equivalents, namely 7,185 kt). Sector 2.F includes all refrigerant applications in stationary and mobile refrigeration and air conditioning systems as well as blowing agents for foams and aerosols and also fire

extinguishing agents and solvents. However, sector 2.F is also responsible for the sharp decline in total F-gas emissions, as many refrigeration and air conditioning applications have been using alternatives to substances with a high GWP for many years.

Sector 2.G, "Other product manufacture and use", is only responsible for around 2 % of emissions in metric tonnes (102 tonnes), but due to the high global warming potential of SF₆, it is responsible for 20 % of emissions in CO₂ equivalents, which corresponds to 1,960 kt. The largest area of application for SF₆, electrical equipment, is included here. In addition, fluorinated gases in ORC systems, as well as sports shoes and medical products. Emissions from this area are falling steadily.

“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)).“ (Warncke und Gschrey 2021b)

1 Die F-Gas-Emissionen von 1995 bis 2022

Die Emissionen fluoriertes Treibhausgase (F-Gase), die laut UNFCCC berichtspflichtig sind, stiegen seit 2000 relativ konstant an. Allerdings ist seit 2018 ein deutlicher Rückgang der Emissionen sichtbar. Im Berichtsjahr 2021 sanken sie auf 4.979 t, was dem CO₂-Äquivalent von 10,5 Mio. t entspricht. Dieser Trend setzte sich fort, so dass auch im Jahr 2022 ein deutlicher Rückgang der Emissionen auf 4.805 t (9,6 Mio. t CO₂-Äquivalente) zu beobachten ist (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2).

Tabelle 1: Emissionen fluoriertes Treibhausgase [t] 1995-2022

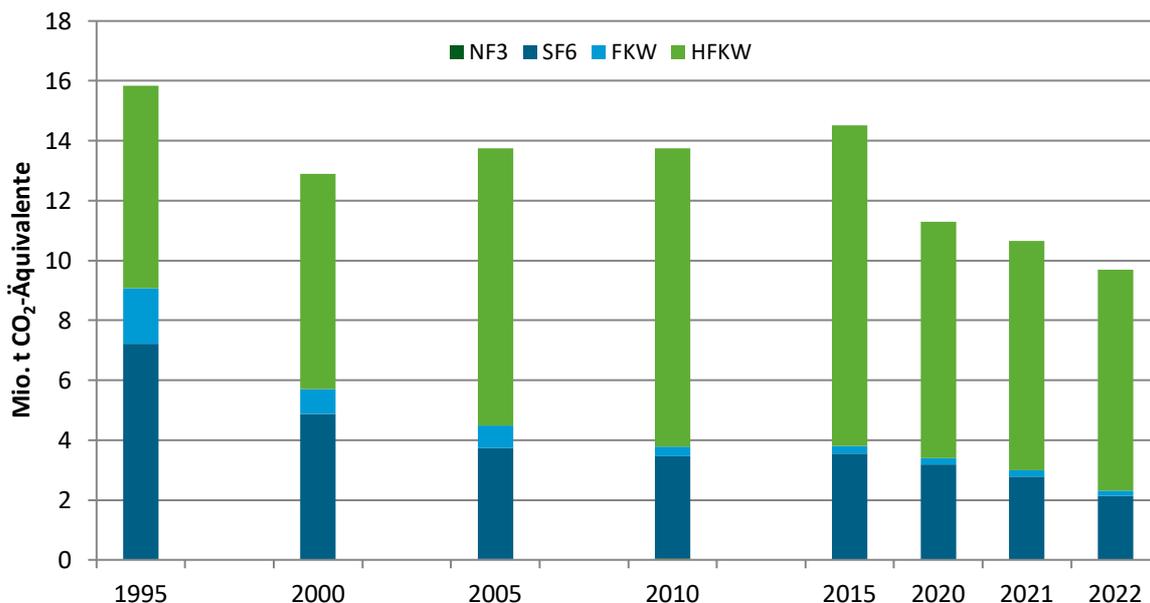
	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
HFKW	386	4.080	5.709	5.820	6.404	4.988	4.834	4.691
FKW	388	106	96	42	32	27	27	23
SF ₆	206	209	159	145	151	135	118	91
NF ₃	0	0,24	0,93	3,57	0,69	1	1	1
Insgesamt	980	4.395	5.965	6.011	6.588	5.152	4.979	4.805

Tabelle 2: Emissionen fluoriertes Treibhausgase [Mio. t CO₂-Äquivalente] 1995-2022

	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
HFKW	4,71	6,87	9,03	9,73	10,53	7,78	7,54	7,25
FKW	2,76	0,83	0,75	0,33	0,25	0,21	0,21	0,17
SF ₆	4,84	4,88	3,71	3,40	3,53	3,18	2,76	2,13
NF ₃	0,01	0,00	0,02	0,06	0,01	0,01	0,01	0,02
Insgesamt	12,32	12,58	13,51	13,52	14,33	11,18	10,53	9,56

Wie Tabelle 2 und Abbildung 3 zeigen, bewegen sich die klimawirksamen Emissionen von F-Gasen seit ihrer Einführung Anfang der 1990er Jahre bis zum Jahr 2015 auf relativ konstantem Niveau (ca. 13 Mio. - 15 Mio. t CO₂-Äquivalente). Seit 2020 lässt sich ein deutlicher Rückgang der Emissionen verzeichnen, der auf die Regelungen der aktuellen EU F-Gas-Verordnung (EU) Nr. 517/2014 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014) und der ersten EU F-Gas-Verordnung (EG) Nr. 842/2006 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2006a) zurückzuführen ist, auf die im Folgenden immer wieder eingegangen wird.

Abbildung 3: Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland [Mio. t CO₂-Äquivalente] 1995-2022



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Die zu knapp 75 % an allen klimawirksamen F-Gas-Emissionen beteiligten **HFKW** sind 2022 im Vergleich zum Vorjahr um 0,3 Mio. t CO₂-Äquivalente gesunken. Dieser Effekt lässt sich durch zunehmende Anteile natürlicher Kältemittel in nahezu allen Sektoren von Kälte- und Klimaanlage erklären.

Seit 2017 ist ein stetiger Rückgang der HFKW-Emissionen in metrischen Tonnen zu verzeichnen, der sich besonders in den letzten beiden Jahren manifestierte. Die durch die EU F-Gas-Verordnung (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014) eingeführten Regelungen, wie das HFKW-Phase-down und das Verbot bestimmter Stoffe sowie regelmäßige Dichtheitskontrollen und Rückgewinnung durch zertifiziertes Personal, zeigen Wirkung.

Die seit 1995 stark zurück gegangenen **FKW**-Emissionen sanken in der Elektroindustrie im Jahr 2022 auf 14 t, bzw. 0,11 Mio. t CO₂-Äquivalente. Im Jahr 2018 lagen sie noch bei 17 t bzw. 0,15 Mio. t CO₂-Äquivalente. Der Stoff Perfluordecalin wurde 2013 erstmals berichtet und wird überwiegend in medizinischen Produkten verwendet. Mengenmäßig ist er jedoch weiterhin von geringer Bedeutung.

SF₆-Emissionen nahmen seit der globalen Wirtschaftskrise von 2009 wieder stetig zu. Allerdings zeigte sich im Jahr 2020 mit 135 t erstmals ein deutlicher Rückgang von über 40 t im Vergleich zum Vorjahr. Dieser setzte sich weiter fort auf 91 t im Jahr 2022.

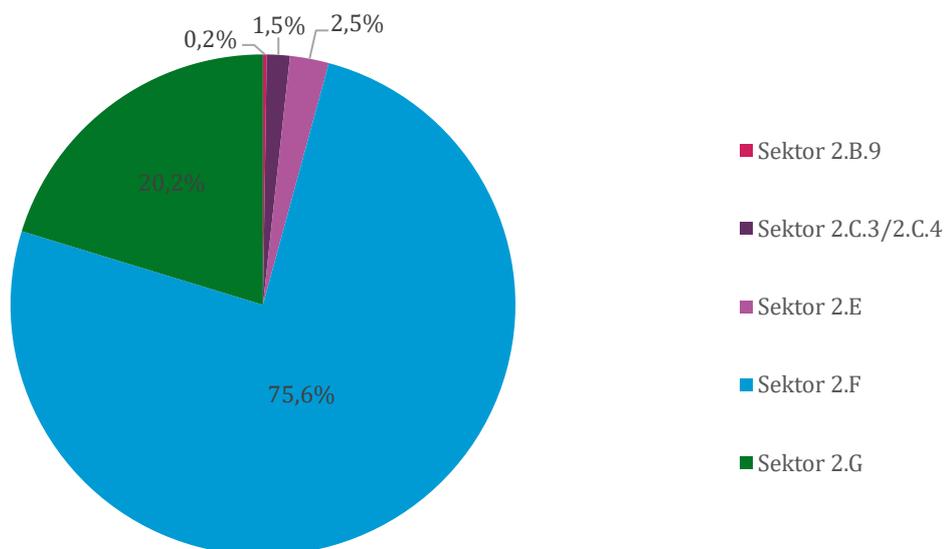
In Folge der Krise im Jahr 2009 brach die Magnesiumproduktion und die Herstellung photovoltaischer Zellen deutlich ein, was zu einem Rückgang des Verbrauchs von SF₆ als Schutzgas bzw. als Reinigungsgas für siliziumbeschichtete Dünnschicht-Solarzellen führte. Die Entsorgung alter Schallschutzscheiben (Kapitel 1.5.2.3) erklärt einerseits die gestiegenen SF₆-Emissionen der letzten Jahre, und andererseits den nun deutlichen Rückgang in diesem Bereich, der sich in den nächsten Jahren fortsetzen wird, da diese Emissionen stark und stetig abnehmen.

NF₃-Emissionen stammen aus der Halbleiter- und der Photovoltaikindustrie und stellen 0,1 % der gesamten klimawirksamen F-Gas Emissionen dar. Mengenmäßig schwanken sie seit 1995 zwischen 1 t und 4 t und erreichten ihren Höchststand im Jahr 2010, mit 3,5 t bzw. 0,057 Mio. t CO₂-Äquivalenten. Seit dem Folgejahr nahmen sie wieder ab und lagen 2014 nur noch bei knapp über 1 t bzw. 0,020 Mio. t CO₂-Äquivalenten. In den Jahren 2021 und 2022 fand allerdings ein Anstieg statt und die Emissionen lagen bei 0,14 und 0,16 Mio. t CO₂-Äquivalenten. Bedingt ist dies durch den steigenden Verbrauch der Halbleiterindustrie.

Abbildung 4 stellt die Anteile der klimawirksamen F-Gas-Emissionen basierend auf der Strukturierung des Nationalen Inventarberichts (NIR) dar. Dieser Bericht umfasst alle Treibhausgase und behandelt in den Sektor-Abschnitten 2.B, 2.C, 2.E, 2.F, 2.G und 2.H die fluoridierten Treibhausgase. Diese enthalten Informationen zu 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 4 in den jeweiligen Kategorien subsumiert)

Abbildung 4: Anteile der klimawirksamen F-Gas-Emissionen bezogen auf CO₂-Äquivalente nach Sektoren in Deutschland 2022 (%)



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

In Abbildung 4 ist zu sehen, dass mit 76 % der bei weitem größte Anteil der Gesamtemissionen von jenen F-Gasen stammt, die als ODS-Ersatzstoffe eingesetzt werden (Sektor 2.F). Die Anwendungsbereiche aus Sektor 2.G sind für rund ein Fünftel aller F-Gas-Emissionen verantwortlich. Im Folgenden werden alle Sektoren und Subsektoren ausführlich erläutert.

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

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

Tabelle 3: Emissionen bei der Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF₆ [t] 1995-2022

	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
HFKW (134a, 227ea, 23)	365,0	127,6	75,4	29,6	22,5	14,8	5,7	6,9
SF ₆	7,0	9,0	10,0	3,8	0,057	0,039	0,041	0,048
Insgesamt	372,0	136,6	85,4	33,4	22,6	14,8	5,8	6,9

Tabelle 4: Emissionen bei der Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF₆ [kt CO₂-Äquivalente] 1995-2022

	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
HFKW (134a, 227ea, 23)	4.470,5	1.277,1	531,7	176,9	58,7	44,9	16,7	23,1
SF ₆	164,5	211,5	235,0	88,9	1,3	0,9	1,0	1,1
Insgesamt	4.635,0	1.488,6	766,7	265,9	60,0	45,8	17,6	24,3

1.1.1 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 verzeichnen. Die noch in Betrieb befindliche zweite Anlage ist direkt mit einer thermischen Spaltanlage verrohrt, welche einen hohen Wirkungsgrad aufweist. Die Annahmen in diesem Sektor wurden 2018 bis 2023 in vertraulicher Kommunikation erneut überprüft. Der vorher angenommene Zwangsanfall von 0,03 kg HFKW-23 je produziertem kg HFCKW-22 wurde nach Expertenabsprachen auf 0,02 kg angepasst. Weiterhin ist der Emissionsfaktor nun an die 2019 Refinements angelehnt und wird mit 0,004 % angenommen.

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

HFKW

Die Emissionen aus der Herstellung von HFKW-227ea unterliegen in den letzten Jahren nachfragebedingten Schwankungen. Die Produktion von HFKW-134a wurde Mitte des Jahres 2021 komplett eingestellt und lag 2022 bei Null. Grund für diese Entwicklungen ist die abnehmende Nachfrage bedingt durch die Maßnahmen der EU F-Gas-Verordnung.

SF₆

Aufgrund von Gesprächen mit Industrievertretern im Jahr 2020 wurde der Emissionsfaktor von 2019 bis 2014 neu berechnet. Da ein Plasmabrenner zur Reinigung der Abluft installiert wurde, sanken die entstehenden Emissionen stark.

1.2 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 5: Emissionen aus der Metallproduktion [t] 1995-2022

	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
Primäraluminiumproduktion								
FKW: CF ₄ , C ₂ F ₆	230,0	52,8	50,0	19,8	12,0	9,7	8,3	4,9
Magnesiumproduktion								
HFKW- 134a	-	-	0,6	8,3	16,8	5,8	6,6	8,1
Magnesium- und Aluminiumgießereien								
SF ₆	7,7	13,8	30,5	6,5	2,9	2,3	2,2	4,1
Insgesamt	237,8	66,6	81,1	34,6	31,7	17,74	17,12	17,12

Tabelle 6: Emissionen aus der Metallproduktion [kt CO₂-Äquivalente] 1995-2022

	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
Primäraluminiumproduktion								
FKW: CF ₄ , C ₂ F ₆	1.618,8	371,5	352,3	141,0	85,4	69,0	59,0	35,0
Magnesiumproduktion								
HFKW- 134a	-	-	0,8	10,8	21,8	7,5	8,6	10,5
Magnesium- und Aluminiumgießereien								
SF ₆	182,4	324,4	714,8	151,9	66,9	53,0	51,5	97,0
Insgesamt	1.801,2	695,9	1.067,9	303,7	174,1	129,5	119,1	142,4

1.2.1 Aluminiumproduktion (2.C.3)

FKW

Im Jahr 1997 verpflichteten sich Primäraluminiumproduzenten freiwillig, ihre Emissionen unter die ursprünglichen Emissionen von 1995 zu senken. Durch die Modernisierung der Ofendosierung (Zufuhr von Aluminiumoxid zur Schmelze) konnten fünf deutsche Hütten die

spezifischen FKW-Emissionen pro Tonne Aluminium reduzieren und das Ziel wurde schnell erreicht. Die Produktionskapazität blieb bis 2005 konstant, in diesem Zeitraum sanken die FKW-Emissionen jedoch von 230 Tonnen (1995) auf 50 Tonnen im Jahr 2005.

Seit 2007 sind vier Hütten in Betrieb, die im Jahr 2007 rund 550.000 Tonnen Primäraluminium produzierten. Zu diesem Zeitpunkt erreichten die FKW-Emissionen mit 29 Tonnen einen historischen Tiefstand. Seitdem sind die CF₄- und C₂F₆-Emissionen weiter zurückgegangen. Im Jahr 2022 gingen die Emissionen weiter zurück und erreichten 4,9 Tonnen.

SF₆

Große Mengen SF₆ wurden in der Aluminiumindustrie verbraucht, jedoch nicht für die Produktion von Primäraluminium, sondern insbesondere für die Herstellung einer Aluminiumlegierung für die Automobilindustrie. Hierbei wird SF₆ nicht als Schutzgas verwendet, sondern wird als Entgasungsmittel für die Entfernung von Verunreinigungen, insbesondere Wasserstoff, unverdünnt durch die heiße Schmelze geleitet. Für die Produktion von Aluminiumlegierungen wurden seit 1998 wachsende SF₆-Mengen verwendet, obwohl dieses Gas bereits weitestgehend durch Intergase wie Argon ersetzt worden und somit aus der Anwendung in Deutschland verschwunden war. Seit 2008 sank die Einsatzmenge und wurde insbesondere seit 2017 stark reduziert.

Bis vor einigen Jahren wurden Einsatzmengen und Emissionen von SF₆ gleichgesetzt, da die IPCC-Richtlinien keinen Emissionsfaktor für diese Anwendung vorgeben. Jedoch zeigten Abgasmessungen, dass SF₆ in der ca. 700 °C heißen Schmelze zu 97 bis 99 % chemisch zersetzt wird, was zu einer Rekalkulation des Emissionsfaktors von 100 % auf 3 % (bis 2008) und, nachdem das Verfahren verbessert wurde, auf 1,5 % ab 2009 führte.

1.2.2 Magnesiumproduktion (2.C.4)

HFKW

Die Verwendungsmengen des HFKW-134a lagen seit 2012 zwischen 23 und 45 Tonnen. Der Verbrauch ist allerdings seit 2019 deutlich zurück gegangen, es gab aber zwischen 2021 und 2022 einen leichten Anstieg (von 13 t auf 16 t).

Der Einsatz von HFKW-134a in dieser Branche ist politisch gewollt, weil er das extrem klimaschädigende Schutzgas SF₆ (GWP 23.500) ersetzt, das in Druckguss-Betrieben mit jährlichem Schutzgasverbrauch > 850 kg seit 1.1.2008 bereits durch die alte EU F-Gas-Verordnung (EG) Nr. 842/2006 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2006a) verboten worden war. Die aktuelle EU F-Gas-Verordnung (EU) Nr. 517/2014 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 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 Kapitel 2.1 des Inventarberichts von F-Gasen 2017/2018 (Warncke et al. 2021a).

SF₆

Wie beschrieben wurde die Anwendung von SF₆ in Magnesium-Druckgießereien durch die alte EU F-Gas-Verordnung von 2006 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2006a) ab dem 1.1.2008 eingeschränkt. Die Anwendung von SF₆ als Schutzgas wurde in Magnesium-Druckgießereien mit einem jährlichen Verbrauch über 850 kg verboten. Dies betraf

fünf deutsche Betriebe, die auf den hinsichtlich SF₆ als klimaschonendere Alternative geltenden HFKW-134a umstellten. SF₆ wurde ab März 2008 nur noch von kleineren Druckgießereien mit einem SF₆-Jahresverbrauch unter 850 kg sowie von einer Sandgießerei und einer Recyclinganlage, die nicht von dem Verbot betroffen waren, eingesetzt. Der SF₆-Gesamtverbrauch wurde verringert. Gemäß der aktuellen EU F-Gas-Verordnung (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014) ist die allgemeine Anwendung von SF₆ für Druckgießereien verboten, weshalb es nur noch in Sandgießereien verwendet wird. Im Bericht zur Inventarerhebung von F-Gasen für das Jahr 2016 befinden sich genauere Informationen zum Umstieg in Kapitel 2.2 (Warncke et al. 2017).

1.3 Elektronik-Industrie (2.E)

Innerhalb der nationalen Berichterstattung umfasst die Elektronik-Industrie die Bereiche Halbleiter- und Platinenproduktion (2.E.1), TFT (2.E.2), Photovoltaik (2.E.3) und Wärmeüberträger (2.E.4). Flachbildschirme (TFT) werden in Deutschland – sowie in ganz Europa – nicht hergestellt und auch der auf Silizium-Dünnschichttechnologie beruhende Bereich Photovoltaik (PV) ist in Deutschland bedeutungslos seit dieser Industriezweig 2010 in eine Krise geriet. Im Jahr 2014 wurde daraufhin die gesamte Produktion in Deutschland eingestellt.

Wie in Tabelle 7 und Tabelle 8 dargestellt, werden sowohl HFKW und FKW als auch SF₆ und NF₃ in der Elektronik-Industrie eingesetzt.

Tabelle 7: Emissionen in der Elektronik-Industrie [t] 1995-2022

	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
Halbleiter- und Platinenproduktion								
HFKW-23	0,8	1,1	1,1	0,8	0,96	0,95	0,99	1,07
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	14,4	15,9	14,1
SF ₆	0,8	1,1	1,1	0,8	0,9	1,2	1,4	3,5
NF ₃	0,1	0,2	0,9	0,5	0,7	0,6	0,9	1,0
Photovoltaik								
SF ₆	-	-	0,9	2,3	-	-	-	0,0008
NF ₃	-	-	-	3,1	-	-	-	-
Insgesamt	23,48	41,13	33,61	23,6	18,13	17,12	19,18	19,57

Tabelle 8: Emissionen in der Elektronik-Industrie [kt CO₂-Äquivalente] 1995-2022

	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
Halbleiter- und Platinenproduktion								
HFKW-23	10,4	14,1	13,2	9,9	11,9	11,8	12,3	13,3
FKW: CF ₄ , C ₂ F ₆ , C ₃ F ₈ , c-C ₄ F ₈	174,7	318,6	232,2	137,9	130,8	117,1	130,1	112,1
SF ₆	50,1	58,1	76,9	17,6	20,2	28,0	33,3	81,5
NF ₃	2,3	3,9	15,0	7,3	11,1	10,1	13,7	16,0
Photovoltaik								
SF ₆	-	-	19,5	52,3	-	-	-	0,018
NF ₃	-	-	-	53,7	-	-	-	-
Insgesamt	237,5	394,7	359,1	275,4	174,0	167,0	189,4	222,85

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

In der Herstellung von Halbleitern ist es nach der plasmaunterstützten Beschichtung von Silizium auf ein Substrat (Wafer) erforderlich, die CVD-Kammern („chemical vapour deposition“) sowie die Trägermaterialien von überschüssigem Silizium zu reinigen. Dies wird durch den Einsatz von hochreaktivem Fluor ermöglicht, das sich von fluorierten Gasen wie NF₃, SF₆, CF₄ oder C₂F₆ löst und mit Silizium verbindet. Neben NF₃ werden hierzu mindestens sechs weitere fluorierte Gase verwendet. Darüber hinaus dienen diese fluorierten Stoffe auch dazu, das sogenannte Strukturätzen durchzuführen, wobei dieser Schritt eine untergeordnete Rolle spielt.

Gemäß der Selbstverpflichtung der Halbleiterhersteller mit Produktionsstätten in Deutschland von 2001 und der nachfolgenden Vereinbarung mit dem Umweltbundesamt erfolgt eine jährliche Erfassung der Emissionen aller berichtspflichtigen F-Gase durch den Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e.V. (ZVEI). Die Daten werden bei seinen Mitgliedsfirmen erfasst, wobei der Repräsentationsgrad gemäß Angaben des Fachverbands Electronic Components and Systems im ZVEI bei 95 % liegt. Die erfassten Emissionen werden in absolute Werte umgewandelt, deren Zeitreihe bis 1995 zurückreicht. Die Daten für die Jahre 1990 bis 1994 sind in einer Öko-Recherche-Studie aus dem Jahr 1996 (Schwarz und Leisewitz 1996) für das Umweltbundesamt enthalten.

In der Platinenfertigung existieren Anlagen für die Reinigung von Bohrlöchern, die CF₄ verwenden. Eine erneute Umfrage im Jahr 2019 zeigte, dass dieser Anwendungsbereich nur geringfügigen Veränderungen unterliegt.

HFKW

Der HFKW-23 wird in der Halbleiter-Herstellung genutzt.

FKW

Aufgrund der Selbstverpflichtung der Halbleiterhersteller konnten die Emissionen bis 2010 trotz einer erheblichen Steigerung der Produktion um 8 % unter das Niveau des Referenzjahres 1995 gesenkt werden. Bis zum Jahr 2000 stiegen die Emissionen von FKW zwar weiter an und

zeigten zeitweise eine fallende Tendenz. Aufgrund des Produktionsrückgangs im Krisenjahr 2009 wurden die Emissionen weiterhin, wenn auch unfreiwillig, auf lediglich 13 t reduziert. Daraufhin stiegen die Emissionen wieder an. In den Jahren 2021 und 2022 wurde im Vergleich zu 2020 eine deutliche Zunahme der Emissionen verzeichnet (2020: 14,4 t; 2021: 15,9 t; 2022: 14,1 t).

Tabelle 7 und Tabelle 8 umfassen neben der Halbleiterproduktion auch die Reinigung von Leiterplatten mit CF_4 . CF_4 wird hierbei zur Reinigung von Bohrlöchern verwendet. Die Emissionen in diesem Bereich bleiben seit Jahren auf einem konstanten Niveau von 2 t.

Bei den berichteten FKW handelt es sich ausschließlich um die Stoffe CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8 und $\text{c-C}_4\text{F}_8$. Hinzu kommt C_6F_{14} (Handelsname FC-72), der nicht als Ätzgas, sondern als Wärmeüberträgerflüssigkeit in der Produktion verwendet wird (siehe Kapitel 2).

SF₆

Die Halbleiterindustrie meldete bis 2021 relativ konstante Emissionen in diesem Bereich von um die 1 Tonne. 2022 hat sich dieser Wert mehr als verdoppelt und die Emissionen lagen bei 3,5 t. Grund hierfür ist die gestiegene Produktion in Deutschland.

NF₃

NF_3 -Emissionen bilden über alle Sektoren hinweg betrachtet gegenwärtig nur 0,003 % der Emissionen fluorierter Treibhausgase. Ihren Höchststand von 3,6 t bzw. 58 kt CO_2 -Äquivalenten erreichten sie im Jahr 2010. Seit 2011 sanken sie wieder und bewegten sich bis 2020 auf einem recht stabilen Niveau von etwa 10 kt CO_2 -Äquivalenten. In den Jahren 2021 und 2022 ist jedoch ein deutlicher Anstieg der Emissionen auf 14 bzw. 16 kt CO_2 -Äquivalenten zu verzeichnen. Grund ist auch hierfür die gestiegene Produktionskapazität. Da seit 2015 keine NF_3 -Emissionen mehr im Bereich Photovoltaik entstehen, sind die gleichbleibenden Werte, aber auch der Anstieg der letzten beiden Jahre, allein auf den Sektor der Halbleiter-Industrie zurückzuführen.

1.3.2 Photovoltaik-Industrie (2.E.3)

Fluorhaltige Substanzen werden auch in der Photovoltaik-Industrie zum Strukturätzen und zur Reinigung von Reaktionskammern im Fertigungsprozess verwendet.

FKW

CF_4 wurde bis Ende 2012 in speziellen Prozessen zur Herstellung von kristallinen Solarzellen eingesetzt, um die Ränder zu isolieren. Ende 2012 wurde dieses Verfahren eingestellt. Die bis dahin verursachten Emissionen werden aus Vertraulichkeitsgründen aggregiert unter 2.H.3 berichtet (siehe Kapitel 1.6).

SF₆

In der Fertigung von photovoltaischen Zellen wurde bei der sogenannten Silizium-Dünnschichttechnologie entweder SF_6 oder NF_3 zur Reinigung der Reaktionskammern von überschüssigem Silizium verwendet. Über viele Jahre wurde dieses kostengünstige Verfahren zunächst für kleine Serien angewendet, aber ab 2007 weitreichend implementiert. Dies führte zu einem signifikanten Anstieg des SF_6 -Verbrauchs, der von etwa 2 t bis zum Jahr 2006 auf 25 t im Jahr 2007 und 58 t im Jahr 2008 anstieg. Im Krisenjahr 2009 halbierte sich der Verbrauch auf etwa 24 t. Nach einem vorübergehenden Anstieg im Jahr 2010 sank der Verbrauch 2011 auf 16 t und halbierte sich erneut 2012. Im Jahr 2013 sank der Verbrauch auf 1,8 t, als die letzte Anlage stillgelegt wurde. Gemäß den Erhebungen des Umweltstatistikgesetzes (UStatG) wurde seit 2014 kein Verbrauch mehr verzeichnet.

Angesichts der Abhängigkeiten von Deutschland gegenüber China, die während der Corona-Pandemie deutlich sichtbar wurden, besteht ein verstärktes Interesse daran, die industrielle Unabhängigkeit Deutschlands wieder zu steigern. Zudem soll der Ausbau erneuerbarer Energien vorangetrieben werden. Vor diesem Hintergrund wird derzeit wieder Photovoltaik in Deutschland produziert und es wird erwartet, dass dies in den kommenden Jahren weiter zunehmen wird. Im Jahr 2022 beliefen sich die SF₆-Emissionen auf 0,0008 t, was 18,8 t CO₂-Äquivalenten entspricht.

NF₃

Das Gas Stickstofftrifluorid wurde sowohl in der Produktion von Halbleitern als auch von photovoltaischen Zellen zur Kammerreinigung verwendet. Die Halbleiter- und PV-Industrie unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich der Kammern. Mit Durchmessern von bis zu 2,5 Metern sind die Wafer in der PV-Industrie deutlich größer als die Wafer in der Halbleiterindustrie, die Durchmesser von lediglich ca. 30 cm aufweisen.

NF₃ wird in der deutschen Photovoltaik-Industrie erst seit 2006 eingesetzt. Im Jahr 2009 erstellte Öko-Recherche im Auftrag des UBA eine Studie zur Solarindustrie mit Abschätzungen zu Verbrauchsmengen und der Emissionen von NF₃ (und SF₆). Das rapide Wachstum der Si-Dünnschicht-Technologie ab 2006 ließ den Verbrauch von NF₃ deutlich ansteigen, insbesondere da NF₃ seit 2008 SF₆ in sämtlichen neu errichteten Produktionslinien ersetzte. Der jährliche Verbrauch von NF₃ erhöhte sich von 2,7 t im Jahr 2006 auf 30 t im Jahr 2008. Nach dem Krisenjahr 2009 setzte sich dieser Anstieg fort und erreichte 2010 einen Höchststand von 78 t.

Danach geriet die deutsche PV-Industrie in eine tiefe Krise, die dazu führte, dass die Produktion von Si-Dünnschicht-Solarzellen in Deutschland schrittweise eingestellt wurde. Zwei der sechs im Jahre 2009 in Deutschland aktiven Hersteller mussten 2010 schließen. Im Jahr 2013 mussten zwei weitere Hersteller aufgeben. 2012 betrug der NF₃-Jahresverbrauch nur noch 37 t. Die verbliebenen zwei Hersteller schlossen im Jahr 2015. Obwohl ein Unternehmen die Produktion wieder begonnen hat, wurden dem Statistischen Bundesamt bisher keine NF₃-Verbrauchsmengen gemeldet.

Der Verbrauch ist nicht mit den Emissionen gleichzusetzen; für diesen Sektor wurde ein Emissionsfaktor von 4 % angenommen.

1.3.3 Wärmeüberträger (2.E.4)

In der Industrie, insbesondere in der Halbleiterfertigung, sind fluorierte Flüssigkeiten als Wärmeüberträger für die Kühlung von Prozessen und Geräten von entscheidender Bedeutung. Die durchschnittliche Lebensdauer solcher Anlagen mit Wärmeüberträgern in der Halbleiterindustrie beträgt 12 Jahre.

FKW

In der Halbleiterfertigung müssen die einzelnen Prozessschritte unter klar definierten und kontrollierten Temperaturen durchgeführt werden.

Innerhalb der Halbleiterindustrie existieren verschiedene Arten von fluorierten Wärmeübertragern, wobei lediglich vollfluorierte Kohlenwasserstoffe im engeren Sinne berichtspflichtig an das Klimasekretariat sind. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um C₆F₁₄ (Fluorinert TM FC-72). Die Verwendung von C₆F₁₄ als Wärmeüberträger in der Halbleiterindustrie war in den 1990er Jahren weit verbreitet, wurde jedoch bis zum Jahr 2016 vollständig eingestellt. Derzeit sind teilfluorierte Ether (HFE) die vorherrschenden fluorierten Wärmeüberträger in der Halbleiterindustrie, und sie haben seit 2001 die perfluorierten Substanzen abgelöst (die Verwendung der fluorierten Ether wird in Bezug auf freiwillig zu

meldende Treibhausgase im Kapitel 2.3.3 behandelt). Es ist zu beachten, dass es sich bei diesen Anwendungen von fluorierten Stoffen um geschlossene Systeme handelt, deren Leckageraten nach unserer Einschätzung bei ca. 5 % liegen.

Die Deutsche Bahn setzte bis vor einigen Jahren C_6F_{14} (Perfluorhexan) auch in Hochgeschwindigkeitszügen, insbesondere zur Kühlung der Traktionsstromrichter in den Triebköpfen des ICE-1 und ICE-2 ein. Im Gegensatz zum französischen TGV wurde dieser Stoff bis zum Jahr 2009 vollständig durch $C_5F_{11}NO$ (Fluorinert FC-3284, Perfluor-N-Methylmorpholin; GWP: 9.500) ersetzt. Diese stickstoffhaltige vollfluorierte Substanz unterliegt weder der nationalen Berichtspflicht gemäß UNFCCC noch der Unternehmensberichterstattung gemäß Artikel 19 der EU F-Gas-Verordnung (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014). Ebenfalls nicht berichtspflichtig ist der in der Halbleiterindustrie verwendete Stoff $C_9F_{21}N$ (Fluorinert FC-3283, Perfluor-Tri-N-Butylamin; GWP: 8.690). Beide dieser als Wärmeüberträger verwendeten Substanzen sind Teil der "weiteren" fluorierten Treibhausgase, die vom Umweltbundesamt freiwillig in das F-Gas-Inventar aufgenommen wurden (siehe Kapitel 2.6).

1.4 Anwendungen als ODS-Ersatzstoffe (2.F)

Die Verwendung ozonschichtschädigender Substanzen (Ozone Depleting Substances, ODS) ist in Deutschland weitestgehend - mit wenigen geregelten Ausnahmen – verboten. Seit den 1990er Jahren wurden F-Gase als Alternativen zu ODS eingeführt und bilden deren hauptsächliches Anwendungsgebiet. Auch andere nicht-fluorierte Stoffe wurden in einigen Anwendungen seitdem verwendet. Die Verwendung von F-Gasen unterliegt, wie bereits beschrieben, gesetzlichen Vorschriften, die ihre Anwendung einschränken oder verbieten, insbesondere der EU F-Gas-Verordnung (EU) Nr. 517/2014 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014). Der im Oktober 2023 erzielte Kompromiss zwischen Europäischem Rat und Europäischem Parlament hinsichtlich der revidierten F-Gas-Verordnung sieht nun endgültig auch einen kompletten Phase-out der Produktion sowie des Verbrauchs von HFKW in Europa bis 2036 bzw. 2050 vor.

HFKW

HFKW, welche von der chemischen Industrie vor Jahrzehnten als Alternative zu ozonschichtschädigenden Substanzen eingeführt und vermarktet wurden, verursachen zwar keine Schäden an der Ozonschicht, tragen jedoch zur Klimaerwärmung bei. Diese Substanzen finden hauptsächlich Verwendung als Kältemittel in Kälte- und Klimaanlageanlagen, als Treibmittel in der Schaumherstellung, als Feuerlöschmittel und als Treibgas in Asthmasprays.

Tabelle 9 zeigt die HFKW-Emissionen aus verschiedenen Anwendungen in Deutschland im Zeitraum von 1995 bis 2022. Im Jahr 2022 ist ein Rückgang gegenüber dem Vorjahr in nahezu allen Bereichen zu verzeichnen. Die Reduzierungen seit 2015 aus mobilen Anwendungen, insbesondere in Pkw-Klimaanlagen, beliefen sich auf knapp über 1 Mio. t CO_2 -Äquivalente, während diejenigen in stationären Kälte- und Klimaanlageanlagen sogar 1,5 Mio. t CO_2 -Äquivalente betragen.

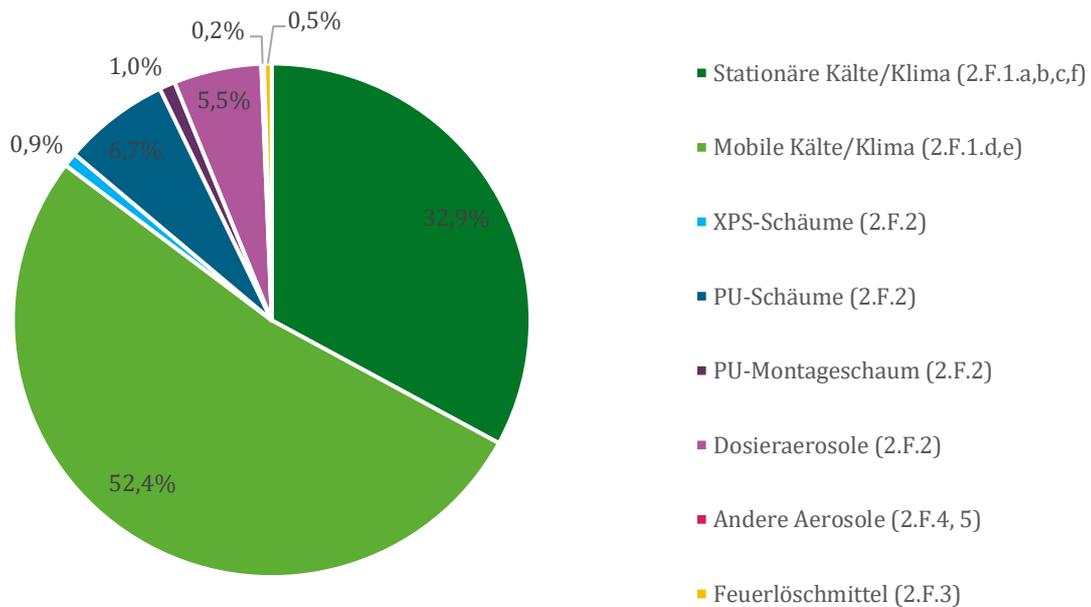
Tabelle 9: HFKW-Emissionen [Mio. t CO₂-Äquivalente] 1995-2022

	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
Gesamt Stationäre Kälte/Klima	0,234	2,264	3,523	4,356	4,711	3,536	3,374	3,248
<i>Gewerbe, Industrie, Haushaltskälte</i>	0,221	2,155	3,229	3,718	3,616	2,237	2,075	1,921
<i>Zentral-AC, Raumklima, Wärmepumpen</i>	0,013	0,109	0,294	0,638	1,095	1,299	1,299	1,327
Gesamt Mobile Kälte/Klima	0,319	1,772	3,170	3,945	4,442	3,625	3,503	3,377
<i>Mobilklima Pkw</i>	0,223	1,368	2,429	2,901	3,231	2,426	2,278	2,163
XPS-Schäume	-	-	0,553	0,486	0,405	0,047	0,034	0,034
PU-Schäume	-	0,123	0,199	0,241	0,376	0,284	0,281	0,273
PU-Montageschaum	1,533	1,082	0,503	0,124	0,057	0,022	0,018	0,012
Dosieraerosole	-	0,184	0,319	0,317	0,333	0,368	0,371	0,366
Andere Aerosole	0,205	0,335	0,311	0,231	0,254	0,003	0,011	0,009
Feuerlöschmittel	0,000	0,002	0,007	0,044	0,077	0,094	0,091	0,091
Insgesamt	2,291	5,762	8,585	9,744	10,655	7,979	7,683	7,410

Abgesehen von den nahezu konstant gebliebenen Emissionen von Dosieraerosolen sind in den meisten kleineren HFKW-Sektoren, wie beispielsweise in den Sektoren Aerosole und Lösemittel, die Zahlen rückläufig. Auch im Bereich der XPS-Schäume sinken die Emissionen mittlerweile.

In Abbildung 5 sind die Anteile der verschiedenen Sektoren an den HFKW-Emissionen in Tonnen zu sehen. Sie zeigt nicht nur grafisch den bedeutenden Beitrag der Klima- und Kälteanwendungen zu den gesamten HFKW-Emissionen, sondern hebt auch im Vergleich zu den Emissionsdaten in Mio. t CO₂-Äquivalente in Tabelle 9 hervor, dass die Emissionen aus der stationären Kälte in Mio. t CO₂-Äquivalenten einen deutlich höheren Anteil an den Gesamtemissionen ausmachen als in Tonnen. Dies ist durch den hohen Anteil von R-404A im Bestand mit seinem GWP von 3.943 (AR5) in der Gewerbekälte zu erklären.

Abbildung 5: Anteile der verschiedenen Sektoren an den HFKW-Emissionen bezogen auf Tonnen in Deutschland 2022 (%)



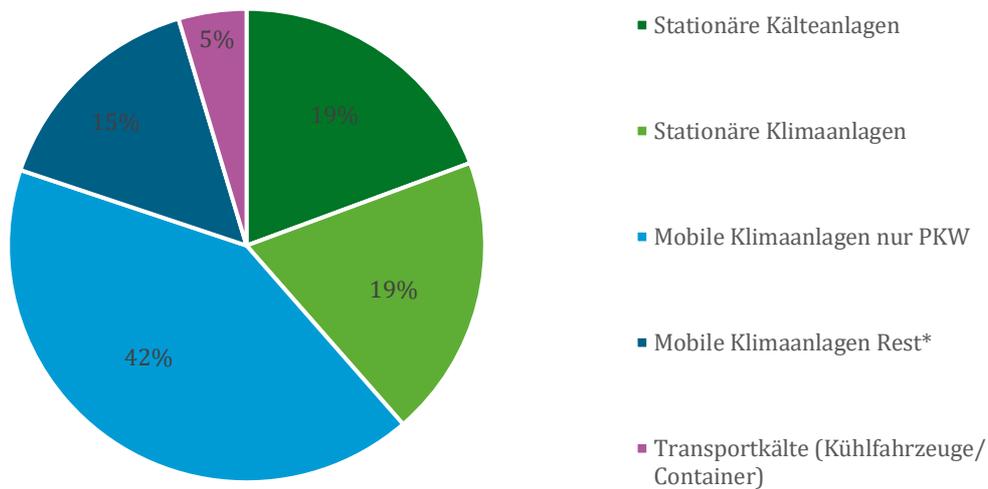
Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Wie bereits erwähnt, zeigt die EU F-Gas-Verordnung aus dem Jahr 2014 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014) mittlerweile beträchtliche Wirkung, insbesondere hinsichtlich sinkender HFKW-Emissionen durch den Betrieb von stationären Kälte- und Klimaanlageanlagen. Dies ist auf den sogenannten "Phase-down" zurückzuführen, eine schrittweise Reduzierung des Angebots von HFKW mit hohem GWP zugunsten einer umfassenden Einführung von HFKW-freien Substanzen und Verfahren bzw. HFKW mit niedrigerem GWP. Die verringerten Emissionen für das Jahr 2022 sind auch auf Verwendungsverbote in der EU F-Gas-Verordnung (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014) und der Richtlinie 2006/40/EG (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2006b) zurückzuführen. Dieser Trend wird sich voraussichtlich fortsetzen, insbesondere angesichts der sich abzeichnenden politischen Entscheidungen zur novellierten F-Gas-Verordnung.

1.4.1 Kälte- und Klimaanlageanlagen (2.F.1)

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

Abbildung 6: Anteile der Emissionen der verschiedenen Subsektoren im Sektor Kälte- und Klimaanlage bezogen auf Tonnen in Deutschland 2022 (%)



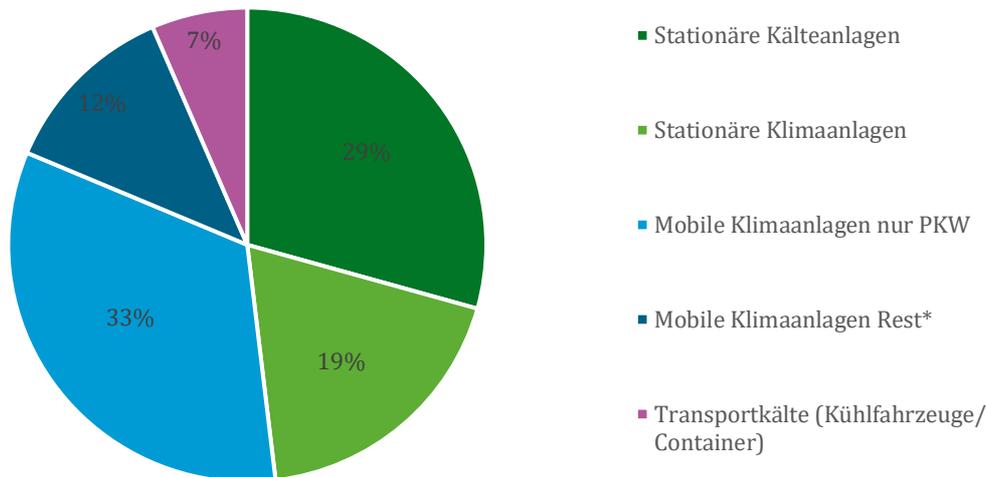
* Nutzfahrzeuge, Busse, Landmaschinen, Züge, Schiffe und Flugzeuge

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Abbildung 6 verdeutlicht, dass Pkw-Klimaanlagen mehr als 40 % aller Emissionen in metrischen Tonnen im Bereich Kälte- und Klimaanlage ausmachen. Jedoch zeigt sich, wie bereits in Bezug auf Abbildung 5 erläutert, ein deutlicher Unterschied, wenn man die Emissionen in Mio. t CO₂-Äquivalenten betrachtet. Dies wird in Abbildung 7 deutlich, wo die klimawirksamen Emissionen aus dem Pkw-Sektor geringer sind, während diejenigen aus stationären Kälteanlagen höher ausfallen. Insbesondere im Bereich der Pkw-Klimaanlagen wird erwartet, dass der Anteil der klimawirksamen Emissionen in den kommenden Jahren erheblich sinkt. Diese Annahme lässt sich darauf zurückführen, dass in seit 2018 neu zugelassenen Fahrzeugen nur Kältemittel verwendet werden, deren GWP-Wert unter 150 liegt. Dabei kommt hauptsächlich der ungesättigte HFKW uHFKW-1234yf (als Hydrofluorolefin (HFO) vermarktet) zum Einsatz, der lediglich einen GWP von 4 (AR4) bzw. 1 (AR5) aufweist. Es liegt somit deutlich unter dem GWP-Wert von R-134a (GWP 1.430 (AR4); 1.300 (AR5)). Schon seit vielen Jahren gibt es immer wieder Ambitionen, auch Klimaanlagen auf den Markt zu bringen, die CO₂ (R-744) als Kältemittel nutzen. Der Hersteller Mercedes hat vor etwa 5 Jahren angefangen, diese Option in seinen Premium-Modellen optional anzubieten. Auch Audi bietet diese Möglichkeit in wenigen Modellen an. Durch ein mögliches Verbot, unter welches auch uHFKW fallen würden, im Rahmen eines geplanten Verbots per- und polyfluorierter Alkylverbindungen (PFAS) unter der EU Chemikalienverordnung REACH (Umweltbundesamt 2023b), sehen sich die Hersteller aber unter Druck, auch R-744 vermehrt einzusetzen und so planen sowohl Mercedes als auch Audi in den kommenden Jahren auch kleinere Modelle mit diesen Klimaanlagen auf den Markt zu bringen.

Aber auch in allen anderen Sektoren werden, wie erwähnt, bedingt durch die Maßnahmen der EU F-Gas-Verordnung (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014), Kältemittel mit niedrigerem oder keinem GWP eingesetzt, weshalb auch hier eine Verringerung der klimawirksamen Emissionen stattfindet.

Abbildung 7: Anteile der Emissionen der verschiedenen Subsektoren im Sektor Kälte- und Klimaanlage bezogen auf CO₂-Äquivalente in Deutschland 2022 (%)



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

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

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

HFKW

Zwei wesentliche Sektoren machen den Bereich der stationären Kältetechnik aus (in Klammern der jeweilige Anteil an klimawirksamen Emissionen), nämlich Gewerbekälte (ca. 52 %) sowie Industriekälte (ca. 46 %). Der verbleibende Anteil von 2 % entfällt auf den Haushaltssektor, der Haushaltskühlschränke und Speiseeismaschinen umfasst. Bis vor wenigen Jahren belief sich der Anteil der Gewerbekälte noch auf etwa 70 %. Aufgrund der nahezu vollständigen Umstellung auf Arbeitsmittel mit niedrigem GWP hat dieser Anteil jedoch erheblich abgenommen.

Der umfassende Bereich der Gewerbekälte gliedert sich in Zentralanlagen in Supermärkten und Discountern sowie in sonstige Gewerbekälte (z.B. Gastronomie, Fleischereien und Tankstellen), die vorwiegend mit Verflüssigungssätzen kühlt. Außerdem werden steckerfertige Geräte in gewerblichen Bereichen hinzugezählt.

Im Zuge der Berichterstattung 2019/2020 wurde das Kältemittelmodell zur Berechnung der Emissionen von Verflüssigungssätzen angepasst und die Kältemittel CO₂ (R-744), R-449A, R-452A und R-513A, die ab 2016 in neuen Anlagen zum Einsatz kamen, wurden integriert. Für den Berichtszyklus 2021 und 2022 wurde die Anzahl der Unternehmen, welche mit Blumen, Pflanzen etc. handeln, aktualisiert; dies betrifft den Blumengroßhandel, Blumenläden, Gärtnereien und Zierpflanzenanbau. Die Anzahl der Unternehmen des Blumengroßhandels wurde auf Basis von Angaben des Verbands für Blumengroßhandel für das Jahr 2022 (138 Stück) angepasst und bis 2010 (250 Stück) rückwirkend interpoliert. Weiterhin wurde die Anzahl der Blumenläden der Jahre 2010-2021 (Fortschreibung für 2022) auf Basis von Statista-Daten angepasst und dabei jeweils die Hälfte der Läden in das Modell übertragen, da nicht alle Läden über eine Kühlung verfügen (2010: 7.556; 2021: 5.517). Auch die Anzahl der Gärtnereien wurde auf Basis von Angaben des Bundesverbandes Einzelhandelsgärtner (BVE) für das Jahr 2022 (4.800 Stück) angepasst und rückwirkend bis 2010 (4.500 Stück) aktualisiert. Für den

Zierpflanzenbau gibt es für die Jahre 2008 (8.543), 2012 (4.425), 2017 (3.668) und 2021 (3.123) Daten des Statistischen Bundesamtes. Die Zwischenjahre wurden interpoliert und, wie für alle anderen genannten Bereiche, die Daten der Jahre 1990-2010 belassen.

Weiterhin wurden in den Sektoren Verflüssigungssätze und steckerfertige Geräte die Anzahl der Pflegeheime und Krankenhäuser aktualisiert. Die Anzahl der Krankenhäuser wird durch das Statistische Bundesamt erhoben und wurde von 2010-2021 aktualisiert. Die Anzahl der Pflegeheime wird seit 2009 alle zwei Jahre offiziell erhoben; die Zahlen werden für die ungeraden Jahre in das Modell übernommen und für das Folgejahr jeweils fortgeschrieben.

Den kleinsten Posten im Bereich der stationären Kälteanlagen stellt die Haushaltskälte dar, welche Haushaltskühlschränke und Speiseeismaschinen beinhaltet. In Haushaltskühlschränken werden jedoch seit 1994 Kohlenwasserstoffe verwendet, weshalb die Emissionen auf die Nutzung von alten Geräten oder die Entsorgung zurückzuführen sind.

Im Rahmen einer Aktualisierung des Inventars im Jahr 2017 (Warncke et al. 2017) wurde der Anwendungsbereich der Speiseeismaschinen in das Inventar aufgenommen. Seit Ende der 1990er Jahre bieten zahlreiche Unternehmen diese Maschinen für den Heimgebrauch an. Kompressorbetriebene Speiseeismaschinen funktionieren ähnlich wie herkömmliche Kälteanlagen mit Kältemitteln. Ab 1997 kamen HFKW-134a und das Kältemittelgemisch R-404A zum Einsatz, während seit 2015 auch Geräte mit R-600a (Isobutan) verwendet werden. Der Anteil von R-600a steigt stetig, und im Jahr 2022 lag er bereits bei über 75 %.

Industriekälte beinhaltet einerseits die Kühlung in der Lebensmittelproduktion, zu der unter anderem Kühlhäuser, Molkereien sowie die Herstellung von Bier und Wein gehören. Andererseits umfasst dieser Sektor vor allem Kühlprozesse in industriellen Bereichen wie der Chemieindustrie.

FKW

Die Emissionen von FKW-Kältemitteln setzen ihren rückläufigen Trend fort und betragen im Jahr 2022 0,4 t. Diese Emissionen stammen hauptsächlich aus Altanlagen der Gewerbekälte, die in den 1990er Jahren im Rahmen des Ersatzes von FCKW-12 in bestehenden Anlagen mit sogenannten Service-Kältemitteln befüllt wurden. Diese enthielten häufig FKW-218 (C_3F_8) als chlorfreie Komponente. Aktuelle Emissionen entstehen vor allem bei der Außerbetriebnahme dieser alten Anlagen. FKW-218 ist zudem Bestandteil von zwei Service-Kältemitteln (R-413A und Isceon MO 89), die derzeit noch als Ersatz für den HFCKW R-22 benutzt werden. Diese werden auch in Zukunft Bestandsemissionen erzeugen, ebenso wie FKW-116 (C_2F_6), welcher zusammen mit HFKW-23 Bestandteil der in geringen Mengen verwendeten Tieftemperatur-Kältemittelgemische R-508A und R-508B ist.

Inventarverbesserung Gewerbekälte

Anfang 2016 wurde das Modell der Gewerbekälte umfangreich aktualisiert, weil in den Vorjahren starke Veränderungen auf dem Markt stattgefunden hatten und sich neue Trends abzeichneten (Warncke et al. 2016a für die genaue Beschreibung der Modellparameter). Bedingt waren diese durch die EU-weiten Beschränkungen von F-Gasen, die mit der ersten EU F-Gas-Verordnung (EG) Nr. 842/2006 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2006a) ihren Anfang nahmen und durch die deutliche Verschärfung der Verordnung (EU) Nr. 517/2014 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014) weiter verstärkt wurden. Vor allem der schon erwähnte HFKW-Phase-down ließ die Preise für alle gängigen Kältemittel sehr stark ansteigen, aber auch entsprechende Verbote führten zu einer kompletten Umstellung der Kältemittel im Bereich Gewerbekälte.

Die diesjährige Aktualisierung hat im Prinzip ergeben, dass sich alle damals identifizierten Trends in der Gewerbekälte weiter durchgesetzt haben. Die als Drop-in von R-404A eingesetzten Kältemittel R-448A und R-449A hatten zunächst ab 2016 in großen Supermärkten (> 1500 m² Verkaufsfläche) Eingang gefunden und etwa ein Jahr später auch in kleineren Supermärkten (500-1500 m² Verkaufsfläche), in letzteren aber in geringerem Umfang. Mit GWP-Werten von 1.273 (R-448A) und 1.282 (R-449A) (beide AR5) war eine längerfristige Nutzung in größerem Umfang in Anbetracht der Verbote von vornherein nicht sinnvoll, und so ist der Einsatz, der seinen Höhepunkt bereits sehr schnell nach der Einführung 2017 bzw. 2018 hatte, in den letzten beiden Jahren fast gänzlich zurückgegangen.

Tabelle 10: Kältemittelanteile in Neuanlagen in Prozent in großen Supermärkten > 1500 m² (2015-2022)

Kältemittel/ Anlagentyp	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
R-404A/R-404A DX	30%	10%	1%	0%	0%	0%	0%	0%
R-134a/R-404A DX	13%	25%	5%	1%	0%	0%	0%	0%
Kaskade R-134/CO ₂	17%	10%	24%	20%	10%	7%	5%	0%
Transkritisches CO ₂	40%	55%	70%	79%	90%	93%	95%	100%
Summe	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Umrüstung auf HFKW-uHFKW-Blend R-449A	11%	30%	50%	45%	20%	10%	2%	0%
Umrüstung auf HFKW-uHFKW-Blend R-448A	1%	9%	18%	15%	5%	2%	1%	0%

Das sowohl in Supermärkten als auch Discountern, im Vergleich zu anderen Sektoren, sehr früh (in etwas größerem Maßstab ab 2010) eingesetzte R-744 (CO₂) in transkritischen Anlagen hat mittlerweile im Bereich Supermärkte in Neuanlagen fast einen Anteil von 100 % erreicht. Im Segment Discounter hat eine der großen Discounter-Ketten sehr früh auf Propan-Anlagen gesetzt. Dabei handelt es sich meist um sogenannte Semi-Plug-In-Anlagen, welche die Abwärme über einen Wasser-Glykol-Kreislauf abführen und je Einheit sehr kleine Kältemittel-Füllmengen aufweisen. Der Anteil an den Neuanlagen mit Propan lag daher im Jahr 2022 bei etwa 30 %, den Rest machen auch hier CO₂-Anlagen aus. Vereinzelt wurden auch im Bereich Supermärkte Propan-Anlagen eingebaut, sie machen aber im Gesamtanlagenbestand keinen großen Anteil aus und sind daher bisher nicht im Modell abgebildet.

Tabelle 11: Kältemittelanteile in Neuanlagen in Prozent in Discountern (2015-2022)

Kältemittel/ Anlagentyp	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
R-404A	24%	10%	3%	0%	0%	0%	0%	0%
R-134a	56%	43%	33%	25%	21%	20%	16%	12%
R-410A/Conveni Pack	3%	4%	5%	6%	5%	2%	2%	1%
transkr. CO ₂	9%	23%	39%	49%	53%	53%	55%	57%
R-290	8%	20%	20%	20%	21%	25%	28%	30%
Total Neuanlagen	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Sowohl R-404A als auch R-134a sind in Neuanlagen mittlerweile fast gar nicht mehr zu finden. Eine Ausnahme bildet der Bereich Discounter, wo teilweise noch R-134a eingesetzt wird. Das Ende dieser Nutzung ist allerdings angekündigt und wird bei Umsetzung in das Modell integriert.

Die Studie von 2016 (Warncke et al. 2016a) hatte ergeben, dass auch das sogenannte Conveni-Pack der Firma Daikin sowohl in kleinen Supermärkten als auch Discountern eingesetzt wurde. Als einzige Technologie im Bereich Gewerbekälte hat hier R-410A Anwendung gefunden. Durch den hohen GWP von R-410A von 1.924 (AR5) ist der Anteil an Neuanlagen aber bis 2022 auf Null zurück gegangen. Seinen Höhepunkt hatte das Conveni-Pack in den Jahren 2015 bis 2018. Die Firma Daikin hat inzwischen reagiert, und seit etwa Anfang 2022 wird das Conveni-Pack mit CO₂ auf dem deutschen Markt vertrieben. Sollte dieses Angebot stärker angenommen werden, wird dies zukünftig im Modell abgebildet werden.

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

Mobile Klimaanlage

Knapp zwei Drittel (64 %) der HFKW-Emissionen aus mobilen Klimaanlage werden durch Pkw-Klimaanlagen verursacht. Die Pkw-Neuzulassungen nahmen seit 2011 kontinuierlich zu, fielen jedoch 2020 aufgrund der Corona-Pandemie auf 2,9 Mio. Fahrzeuge zurück, den niedrigsten Wert seit 2010. In den Jahren 2021 und 2022 ließen die Neuzulassungen weiter nach und lagen bei jeweils nur noch ca. 2,6 Mio. Fahrzeugen. Nichtsdestotrotz nimmt der Fahrzeugbestand weiter stetig zu.

Die Klimaquote der Neuzulassungen steigt seit Jahren an und lag im Jahr 2022 bei 99,04 % (für R-134a und R-1234yf zusammen). Die durchschnittliche Kältemittelfüllmenge aller klimatisierten Neufahrzeuge war lange rückläufig und lag 2015 bei 547 Gramm. In den letzten Jahren konnte allerdings ein leichter Anstieg dieser Menge festgestellt werden (2022: 571 Gramm), da die derzeit beliebten so genannten SUV (Sports Utility Vehicle) mit größeren Klimaanlage mit höheren Kältemittel-Füllmengen ausgestattet sind.

Die HFKW-134a-Emissionen aus dem Pkw-Kältemittelbestand waren 2022 mit 1.622 t im Vergleich zu früheren Jahren deutlich reduziert (2018: 2.097 t; 2021: 1.716 t). Die Entsorgungsmissionen nahmen von 33 t (2020) auf 38 t R-134a zu, bezogen auf die Anzahl der inländisch demontierten Altfahrzeuge.

Der Emissionsverlauf wird weiterhin von der EU-Richtlinie 2006/40/EG (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen 2006b, MAC-Richtlinie) über den Ausstieg von HFKW-134a

aus Autoklimaanlagen bestimmt. Seit 2017 werden neue Pkw für die EU nicht mehr mit R-134a klimatisiert. Die Autoindustrie setzt dabei fast vollständig auf den Einsatz des ungesättigten uHFKW-1234yf. Das Treibhauspotenzial (GWP) von uHFKW-1234yf wird im AR5 nur noch mit 1, statt wie im AR4 mit 4, angegeben und liegt damit deutlich unter den erlaubten 150 der MAC-Richtlinie (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2006b).

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 R-1234yf klimatisiert. Auch diese Daten werden nun aggregiert im Kapitel 2.1 berichtet. Eine genaue Beschreibung dieser Inventarverbesserung findet sich im Bericht zur Inventarerhebung der F-Gase für 2017/2018 (Warncke et al. 2021a).

Trotz der kompletten Umstellung halten sich Vorbehalte gegenüber R-1234yf. Es hat sich gezeigt, 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. Regenwassermessungen im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA), durchgeführt von einem Konsortium unter Mitarbeit von Öko-Recherche, zeigen, dass die TFA-Konzentrationen gegenüber den 1990er Jahren bis heute stark zugenommen haben (Behringer et al. 2021). Bisher ergeben sich keine regulatorischen Folgen aus diesen Messungen, jedoch würde TFA auch einer Regulierung von PFAS unter der EU Chemikalienverordnung REACH unterliegen, die derzeit diskutiert wird.

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 geregelt. Die EU F-Gas-Verordnung (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014) wirkt sich durch die Verknappung der HFKW nur indirekt auf diese Anwendungen aus.

Nutzfahrzeuge werden gewerblich betrieben und sind deshalb stark konjunkturabhängig. Die Neuzulassungen von Nutzfahrzeugen aller Gewichtsklassen (N1, N2 und N3) sanken im Jahr 2020 aufgrund der Corona-Pandemie deutlich, haben sich aber in den beiden Folgejahren erholt. Die Klimaquote aller drei Nutzfahrzeugkategorien blieb in den letzten drei Jahren relativ stabil bei 91 % (2019: 84 %).

Der Kältemittelbestand in der Nutzfahrzeugflotte nahm in den letzten Jahren weiter zu. Damit stiegen auch die Betriebsemissionen deutlich von 307 t (2020) auf mittlerweile 347 t (2022). Inländische Entsorgungsemissionen spielen eine untergeordnete Rolle, weil nahezu alle Nutzfahrzeuge vor ihrer Demontage als Gebrauchtfahrzeuge exportiert werden.

Bei Bussen und Schienenfahrzeugen gab es leichte Zunahmen der Bestandsemissionen; bei den Landmaschinen eine deutliche Zunahme im Jahr 2021 mit anschließendem Rückgang auf das vorherige Niveau im Jahr 2022. Im Bus-Modell wurde die Klimatisierungsquote der Überlandbusse für die Jahre 2019-2022 angepasst. Hier war zuvor auf Basis der Jahre 2016 (99 %) und 2017 (79 %) eine Fortschreibung von 89 % gemacht worden. Da es sich bei dem Wert aus dem Jahr 2017 allerdings um einen besonders niedrigen Wert handelte, der auf Basis einer Sonderbestellung ohne Klimatisierung bei einem Hersteller zustande kam, in den Vorjahren aber bereits immer Quoten im hohen 90 %-Bereich vorherrschten und die Klimatisierungsquote generell eher steigt, wurde der Wert für die Jahre 2019-2022 auf 99 % angehoben.

Der Bestand von R-134a 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

R-134a eingesetzt. Der Bestand stieg von 1 t 1993 auf 1,5 t im Jahr 2014 an und ist seitdem relativ stabil.

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. Noch ist keine Erholung auf Vor-Corona-Niveau zu beobachten, und so lagen die Neuzulassungen im Jahr 2022 bei 9.383 Fahrzeugen. Die Bestandsemissionen von HFKW (R-404A, R-134a und R-410A) sanken von 68 t im Jahr 2020 auf 56 t im Jahr 2022. Seit 2015 wird in neuen Kälteaggregaten auch die HFKW-uHFKW-Mischung R-452A als Ersatz für R-404A verwendet. Daher sind diese Emissionen stark angestiegen, von 2 t im Jahr 2016 auf 34 t im Jahr 2022.

Im Zuge der letzten Modellüberarbeitung des Segments der Kühlcontainer (Warncke und Gschrey 2021b) hatten sich die folgenden Änderungen ergeben: ab 2018 wurden die beiden Kältemittel R-513A und R-452A mit in das Modell aufgenommen. Und obwohl Container mit CO₂ durchaus durch Frachtunternehmen in größerem Umfang getestet werden, ist Expertenschätzungen zufolge erst ab 2023 mit nennenswerten Marktanteilen zu rechnen. Weiterhin wurden die Kältemittelanteile angepasst sowie die durchschnittliche Füllmenge für HFKW-134a von 6 kg auf 5 kg und für R-404A von 4 kg auf 5 kg ab dem Jahr 2012 geändert. Ein kontinuierliches Absinken des bisher als konstant angenommenen Emissionsfaktors der Anwendung von 10 % im Jahr 2011 auf 5 % im Jahr 2020 fand ebenfalls statt.

Die der Bundesrepublik Deutschland zugerechneten Bestandsemissionen aus Kühlcontainern betragen 2022 etwa 57 t – hauptsächlich R-134a (85 %).

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

Besonders bei Gebäude-Klimaanlagen (Flüssigkeitskühlsätzen) und Wärmepumpen ist das Wachstum des HFKW-Kältemittel-Bestands noch nicht ausgeschöpft und auch im Jahr 2022 weiter gestiegen.

Raumklimageräte

Der Markt für Raumklimageräte aller Kategorien ist seit Jahren im Wachstum begriffen. Der Kältemittelbestand der insgesamt in Deutschland in Betrieb befindlichen mobilen Kleingeräte und einfachen Split-Geräte war 2022 dreimal so hoch wie 2004 (2.975 t/962 t). Der Einsatzbereich von Raumklimageräten hat sich stetig nach oben erweitert - auf bis zu 60 kW Kälteleistung und mehr. 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.

Die aktuelle EU F-Gas-Verordnung (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014) sieht für den Sektor der Raumklimageräte ein Verbot vor: Monosplit-Geräte 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 Verordnung ab 1. Januar 2025 nicht mehr in Verkehr gebracht werden.

Das Unternehmen Daikin war das erste, welches, statt der bis dato verwendeten Kältemittel R-410A (GWP 2.088 (AR4); 1.924 (AR5)) und R-407C (GWP 1.774 (AR4); 1.624 (AR5)) die umfassende Einführung des Kältemittels R-32 (GWP 675 (AR4); 677 (AR5)) in seinen neuen Geräten umsetzte. Andere Hersteller folgten. Die Einführung von R-32 fand 2015 zunächst in

einfachen Split-Geräten statt und hat sich seitdem auf 100 Prozent aller Neuanlagen erhöht (Berichtsjahr 2022). Seit 2020 folgte auch der Einsatz in VRF-Geräten, und seit 2021 in Multisplit-Geräten. Die Füllmenge von R-32 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.

In diesem Berichtszyklus wurden weiterhin die Anteile für die mobilen Raumklimageräte angepasst. Zuvor war hier noch von einem hohen Anteil R-410A ausgegangen worden, was dem Marktgeschehen nicht mehr entsprach, zumal mobile Geräte laut EU F-Gas-Verordnung (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014) ab dem 01.01.2020 nur noch mit Kältemittel mit einem GWP unter 150 zugelassen sind.

Tabelle 12: Kältemittelanteile in Neuanlagen in Prozent im Bereich Klimaanlage (2016-2022)

Kältemittel	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Mobile Raumklimageräte							
R-407C	30%	30%	30%	15%	10%	0%	0%
R-410A	65%	65%	65%	60%	40%	20%	0%
Kohlenwasserstoffe	5%	5%	5%	25%	50%	80%	100%
Split-Anlagen							
R-407C	30%	30%	0%	0%	0%	0%	0%
R-410A	68%	65%	80%	40%	10%	0%	0%
R-32	2%	5%	20%	60%	90%	100%	100%
VRF-Anlagen							
R-410A	100%	100%	100%	100%	99%	96%	91%
R-32	-	-	-	-	1%	4%	9%
Multisplit-Anlagen							
R-407C	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
R-410A	95%	100%	100%	100%	100%	98%	95%
R-32	-	-	-	-	-	2%	5%

Kaltwassersätze

Große Klimaanlage im Leistungsbereich von oberhalb ca. 20 kW Kälteleistung werden in der Regel als Flüssigkeitskühlsatz (Kaltwassersatz, Chiller) ausgelegt. Dieser Markt (Stückzahlen) ist recht stabil, es wird aber für die kommenden Jahre von einem Wachstum ausgegangen, da, wie im Bereich Raumklimatisierung, von einem höheren Klimatisierungsbedarf auszugehen ist.

Ab 2005 nahm die Bedeutung des Kältemittels R-410A stetig und ungebrochen zu, sowohl im Leistungsbereich < 100 kW, als auch im Leistungsbereich > 100 kW. Es war in Neuanlagen wichtiger als R-407C und R-134a. Letzteres war fast ausschließliches Kältemittel in Turboverdichter-Anlagen. Auch in diesem Sektor wurde in früheren Berichten die Bedeutung

von R-410A überschätzt, weswegen sein Anteil auch hier zugunsten von R-407C nach unten korrigiert wurde.

Inventarverbesserung Kaltwassersätze

Wie auch in allen anderen Kältesektoren haben die Chiller-Hersteller versucht, die vormalig üblichen Kältemittel mit solchen zu ersetzen, die möglichst niedrige GWP-Werte aufweisen und dabei dennoch die entsprechende Leistung erbringen. In den letzten Jahren wurden deshalb bereits die Arbeitsmittel R-1234ze, R-1233zd und R-513A berichtet, waren allerdings nicht komplett in das Gesamtmodell implementiert. Daher wurde nun eine Aktualisierung des Modells vorgenommen, welches bis dato bis auf wenige Änderungen desjenigen aus dem Jahr 2013 entsprach (Schwarz 2013). Der Aufbau des Modells hat sich nicht grundsätzlich verändert, sondern es wurden vor allem neue Kältemittel sowie -anteile eingefügt.

Das Modell unterscheidet Chiller weiterhin nach 4 unterschiedlichen Leistungsklassen, da sich diese am ehesten hinsichtlich durchschnittlicher Füllmenge und genutztem Kältemittel gruppieren lassen. Unterschieden werden die Leistungsklassen < 100 kW, > 100 kW, > 900 kW ohne Turboverdichter und > 900 kW Turboverdichter-Anlagen. Dies war so auch bereits im alten Modell implementiert, allerdings wurden die durchschnittlichen Füllmengen von 10 kg für < 100 kW, 95 kg für > 100 kW und 630 kg für Chiller mit Turboverdichter um die Füllmenge von 300 kg für Chiller > 900 kW ohne Turboverdichter erweitert. Hier war zuvor auf Basis der Kältemittelanteile und Stückzahlen auf die durchschnittliche Füllmenge der Chiller > 100 kW zurückgegriffen worden.

Weiterhin wurden, wie erwähnt, die Anteile der Kältemittel pro Leistungsklasse angepasst. Hier wurde ebenso wie bei den Füllmengen die Klasse der Chiller > 900 kW ohne Turboverdichter ergänzt. Zuvor wurden für diese dieselben Anteile wie bei den Chillern > 100 kW verwendet.

Im Folgenden finden sich die Kältemittelanteile in Neuinstallationen pro Leistungsklasse für die Jahre 2015-2025 im neuen Modell. Turboverdichter-Anlagen sind hier ausgenommen, da ihre Parameter im Modell anders berechnet werden.

Tabelle 13: Kältemittelanteile des neuen Chiller-Modells für die unterschiedlichen Leistungsklassen (2015-2025)

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Chiller < 100 kW											
R-134a	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	5%
R-407C	40%	40%	35%	30%	25%	20%	15%	10%	5%	0%	0%
R-410A	50%	50%	55%	60%	65%	70%	68%	51%	37%	25%	20%
R-454B	-	-	-	-	-	-	2%	4%	8%	15%	17%
R-32	-	-	-	-	-	-	5%	25%	40%	50%	53%
R-290	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5%
Chiller > 100 kW											
R-134a	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	5%	5%	5%	0%
R-407C	40%	35%	25%	20%	10%	5%	0%	0%	0%	0%	0%
R-410A	50%	55%	50%	40%	30%	20%	15%	10%	10%	5%	5%
R-1234ze	-	-	10%	20%	30%	40%	45%	50%	50%	50%	45%
R-454B	-	-	-	-	-	-	-	-	5%	10%	15%
R-513A	-	-	5%	10%	20%	25%	30%	35%	30%	25%	20%
R-515B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5%	15%
Chiller > 900 kW (ohne Turboverdichter)											
R-134a	98%	95%	90%	75%	60%	45%	35%	20%	10%	5%	5%
R-1234ze	2%	5%	10%	20%	30%	40%	45%	50%	55%	60%	60%
R-513A	-	-	-	5%	10%	15%	20%	25%	25%	20%	15%
R-515B	-	-	-	-	-	-	-	5%	10%	15%	20%

In Turboverdichter-Anlagen hat sich der Anteil an R-134a bereits deutlich verringert. Stattdessen wird hauptsächlich auf R-1234ze, aber auch auf R-1233zd, R-513A, sowie, unseren Schätzungen zufolge ab 2022, auf R-515B gesetzt.

Dass wir auch jetzt und für die Folgejahre noch von einem Anteil der „alten“ HFKW-Kältemittel, vor allem R-410A, ausgehen, liegt daran, dass diese unter anderem in öffentlichen Aufträgen nicht nur genannt, sondern auch explizit gefordert sind. Dieser Umstand wird sich zwar voraussichtlich mit der Einführung der neuen EU F-Gas-Verordnung ändern, der Prozess verläuft jedoch eher schleppend. Dies zeigt sich dadurch, dass auch heute noch solche Anforderungen in Ausschreibungen vorliegen.

Der Einsatz von R-513A wird von Experten als Übergangslösung angenommen, daher nehmen auch wir wieder fallende Neuinstallationen ab 2023 bzw. 2024 mit diesem Kältemittel an.

R-515B ist ein eher unkonventioneller Blend, da er zu 91 % aus R-1234ze und zu 9 % aus R-227ea besteht. Letzteres findet sich vor allem als Treibmittel im Bereich PU-Hartschaum und Aerosole sowie als Feuerlöschmittel und wird und wurde nur in sehr geringem Maße als Kältemittel in der Industriekälte verwendet. Zudem ist sein GWP mit 3.350 (AR5) sehr hoch. Grund für den Einsatz im Blend R-515B ist allerdings, was sich schon aus der gelisteten Eigenschaft als Feuerlöschmittel erkennen lässt, seine Nicht-Brennbarkeit. Der uHFKW-1234ze ist zwar als A2L-Stoff gelistet, d.h. schwer entflammbar, allerdings führt dieser Umstand bei einigen Auftraggebern zu Sicherheitsbedenken und auch der TÜV hat bei einigen Aufstellungen aufwendige bauliche Maßnahmen für die Freigabe gefordert. Die Mischung mit R-227ea macht den Blend nun zu einem A1-Kältemittel (nicht brennbar und nicht toxisch). In der Mischung hat er einen GWP von 299 (AR5).

Wärmepumpenanlagen

Wärmepumpen (WP) wurden in Deutschland bisher mit den Kältemitteln R-134a, R-407C, R-404A und R-410A betrieben. Bereits im Zuge der Berichterstattung 2017/2018 haben wir uns aber auch mit dem Einsatz von CO₂ (R-744) 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 R-744 seit der Einführung im Jahr 2018 (siehe Warncke et al. 2021a). Weitere Arten von Wärmepumpen sind: Luft – Wasser WP, Erdreich (Wasser) – Wasser WP, sowie Erdreich (Sole) – Wasser WP.

R-32 wird für Heizungswärmepumpen vom Typ Erdreich (Sole) – Wasser eingesetzt und ist seit 2019 im Inventar enthalten. Daneben wurden R-454C und R-290 in größerem Maßstab in Neuanlagen eingeführt; R-290 war im Bereich Heiz-WP (Luft-Wasser) bereits im Modell implementiert.

Inventarverbesserung Wärmepumpenanlagen

Im Bereich Wärmepumpen wurde in den vergangenen Jahren, wie beschrieben, für einige Technologien bereits auf andere Kältemittel wie CO₂ (R-744) umgestellt. Da die Entwicklung des Einsatzes von Alternativen mittlerweile deutlich fortgeschritten ist, wurde das WP-Modell für diesen Berichtszyklus angepasst. Dies war auch deshalb essenziell, da die Verkaufszahlen von Wärmepumpen im Zuge der Diskussionen um Beschränkungen der Nutzung von Gas- und Ölheizungen im Rahmen einer klimafreundlichen Energiepolitik in den vergangenen Jahren sehr stark gestiegen sind. In Deutschland hat sich der Absatz aller WP-Technologien seit 2019 fast verdreifacht, und zwar von 102.500 verkauften Geräten auf 281.500 im Jahr 2022.

Das Modell unterscheidet zwischen Warmwasserwärmepumpen, Luft – Wasser WP, Erdreich (Wasser) – Wasser WP, sowie Erdreich (Sole) – Wasser WP. Nach dieser Trennung werden auch jährlich die Absatzzahlen des Bundesverbandes Wärmepumpe veröffentlicht, welche als Quelle für das Modell genutzt werden. Die veröffentlichten Daten unterscheiden seit einigen Jahren bei den Luft-Wasser-Wärmepumpen zwischen Monoblock- und Split-Anlagen. In der Monoblock-Ausführung befinden sich die meisten Elemente der Anlage in einem Gerät, während bei einer Split-Anlage der Verflüssiger in einer Inneneinheit untergebracht ist (in einigen Anlagen auch Verdichter). Diese Unterscheidung wurde für das neue Modell übernommen, um mögliche Unterschiede in Bezug auf Kältemittel, Füllmengen oder Emissionsfaktoren besser abbilden zu können.

Während die OEMs (Original Equipment Manufacturer, Erstausrüster) vor einigen Jahren hinsichtlich der Verwendung neuer Blends in bestimmten Sektoren noch zögerlich vorgingen, da bereits mögliche Beschränkungen von PFAS im Raum standen, und R-454C (Kältemittelblend

aus R-32 und R-1234yf) daher nicht zum Einsatz kam, hat seitdem ein Wandel stattgefunden. Zwar steht eine mögliche Entscheidung zu einer Regulierung von PFAS noch aus, jedoch sind Auswirkungen der Regelungen gemäß der neuen EU F-Gas-Verordnung bereits erkennbar: Der Trend bei Luft-Wasser-Wärmepumpen geht deutlich hin zur weitgehenden Verwendung von Propan (R-290) als Kältemittel. Daneben zeigt sich aber auch in Anwendungsfällen, in denen der Einsatz von Propan aus verschiedenen Gründen nicht erwogen wird, zunehmend der Einsatz von R-454C. Wir nehmen hier einen Zuwachs auf 10 % im Jahr 2028 an.

Für die künftige Entwicklung ist von besonderer Bedeutung, dass am 5. Oktober 2023 eine vorläufige Einigung bezüglich der Revision der EU F-Gas-Verordnung erzielt wurde (Rat der Europäischen Union 2023). Die Maßnahmen für Wärmepumpen sehen ab 2027 ein Verbot von F-Gasen mit GWP > 150 für kleine (< 12 kW) Monoblock-Wärmepumpen und Raumklimageräte sowie ein vollständiges Verbot aller F-Gase ab 2035 vor. Neue Split-Klimageräte und Wärmepumpen, die F-Gas-Kältemittel enthalten, sind ab 2035 nicht mehr erlaubt, wobei für einige Kältemittel mit hohem GWP frühere Verbote vereinbart wurden. Ausnahmen sind möglich, wenn bestimmte Sicherheitsanforderungen erfüllt werden müssen. Daneben wurde die Möglichkeit geschaffen, für Wärmepumpenanwendungen zusätzliche HFKW-Quoten bereit zu stellen, sofern ansonsten die Zielsetzungen des REPowerEU-Maßnahmenpakets gefährdet würden (Europäische Kommission 2022).

Alle Änderungen werden ab dem nächsten Berichtsjahr, also für das Jahr 2023, im deutschen Modell implementiert. Im nächsten Bericht werden dann die genaueren Parameter zu den Kältemittelfüllmengen, den Kältemittelanteilen in Neuanlagen und Emissionsfaktoren angegeben.

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 R-290 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 58 %.

Es ist technisch möglich, in dieser Anwendung auch die Kältemittel R-450A 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 R-290 setzt und R-450A 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 (Warncke und Gschrey 2021b).

Gewerbliche Spülmaschinen mit Wärmepumpenfunktion

Diese Anwendung wurde 2018 in unseren Bestand aufgenommen. Um die Abwärme von Gewerbegeschirrspülern in Großküchen zu nutzen, sind auf dem deutschen Markt seit 2005 einzelne Modelle erhältlich, die mit einer Wärmepumpenfunktion ausgestattet sind. Die Zahl der deutschen Hersteller ist nicht nur sehr gering, sondern deckt nahezu den gesamten Markt ab. Darüber hinaus ist auch das Produktionsvolumen sehr stabil. Die Emissionen dieses Anwendungsbereiches sind sehr gering: 0,015 Tonnen im Jahr 2022, entsprechend 0,017 kt CO₂-Äquivalenten.

Inventarverbesserung gewerbliche Spülmaschinen mit Wärmepumpenfunktion

Aufgrund von Informationen bezüglich der Nutzung weiterer Kältemittel ist dieser Sektor aktualisiert worden. Wurde bis vor vier Jahren noch hauptsächlich R-134a als Kältemittel verwendet, sind nun die drei Stoffe R-513A, R-450A sowie R-744 (CO₂) hinzugekommen.

Letzterer wird allerdings schon seit etwa 10 Jahren von einem Anbieter genutzt und wurde nun ins Modell mitaufgenommen. Mit R-513A und R-450A werden zwei Kältemittel verwendet, die einen GWP-Wert im 500er Bereich haben, R-513A mit 573 (AR5) und R-450A mit 547 (AR5). Die zwei größten Hersteller gewerblicher Spülmaschinen haben allerdings schon angekündigt, auf Arbeitsmittel mit weit niedrigerem GWP umzustellen. Dies wird dann in den folgenden Jahren implementiert und kann an dieser Stelle noch nicht veröffentlicht werden, da die Informationen vertraulich sind. Aufgrund des angekündigten Phase-outs von F-Gasen durch die novellierte EU F-Gas-Verordnung handelt es sich voraussichtlich um Substanzen mit sehr geringen GWP-Werten, also entweder natürliche Kältemittel oder uHFKW.

Tabelle 14: Kältemittelanteile in Neuanlagen in Prozent in gewerblichen Geschirrspülmaschinen (2016-2022)

Kältemittel	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
R-134a	100%	99%	99%	98%	49,0%	19%	4%
R-513A	-	-	-	-	45,0%	60%	60%
R-450A	-	-	-	-	-	15%	30%
CO ₂		1%	2%	2%	6%	6%	6%

1.4.2 Schaumherstellung (2.F.2)

Im Schaumsektor werden fluorierte Substanzen als ODS-Ersatzstoffe eingesetzt und dienen als Treibmittel.

1.4.2.1 PU-Hartschaum

Bereits seit 2002 werden bzw. wurden für PU-Hartschaum die flüssigen HFKW-365mfc und HFKW-245fa als physikalische Treibmittel eingesetzt und berichtet. Die vom Hersteller Solvay berichteten Mengen werden mit denen sich aus dem UStatG entnommenen Anteilen zwischen PU-Hartschaum und PU-Integralschaum verrechnet. HFKW-134a kommt bereits seit 1998 zum Einsatz. Im Vergleich zu den 1990er Jahren ist der Verbrauch an fluorierten Treibmitteln zurückgegangen. Denn nach den sukzessiven Verboten von FCKW und H-FCKW blieben potenzielle Anwender nur in einigen Bereichen noch bei Halogentreibmitteln und stiegen stattdessen auf Kohlenwasserstoffe um. HFKW werden vor allem dann eingesetzt, wenn eine geringe Entflammbarkeit des Treibmittels erforderlich ist. 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.

1.4.2.2 XPS-Schaum

Seit Ablösung der HFCKW-Treibmittel durch HFKW seit dem Jahr 2001 war die Herstellung von Dämmplatten aus extrudiertem Polystyrol (XPS) bis zum Jahr 2018 der Schaumsektor mit den höchsten Emissionen. Die Produktion mit HFKW-134a wurde 2019 eingestellt, da dessen Verwendung für Schäume ab 1.1.2020 gemäß der EU F-Gas-Verordnung (EU) Nr. 517/2014 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014) nicht mehr erlaubt ist. Der Einsatz von HFKW-152a, der bei der Schaumherstellung vollständig emittiert wird, war seit 2001 rückläufig und hat seit 2015 wieder zugenommen. Seit 2018 ist jedoch auch hier ein deutlicher Abwärtstrend zu verzeichnen.

Ein deutscher Hersteller verwendet seit 2012 für einen Großteil seiner Produktpalette statt des HFKW-152a das ungesättigte uHFKW-1234ze als Treibmittel. Die eingesetzten Mengen sind bereits erheblich und über die Erhebung nach dem Umweltstatistikgesetz verfügbar.

1.4.2.3 PU-Integralschaum

HFKW-Treibmittel werden für Integralschaum für Schuhsohlen, Lenkradummantelungen, Schreibtischstuhllehnen u. dgl. kaum noch eingesetzt, da die Produktion entweder verlegt oder die Herstellung mit anderen Stoffen umgesetzt wird (etwa Lenkräder). Die halogenierten Treibmittel sind die gleichen wie für Hartschaum, nämlich HFKW-134a, HFKW-245fa und HFKW-365mfc (letzterer mit Zusatz von HFKW-227ea). Außerdem wird ab 2019 der Stoff uHFKW-1336mzz (Z) unter UStatG berichtet, den wir daher in das Modell mit aufgenommen haben.

1.4.2.4 PU-Montageschaum

Die Emissionen aus der Anwendung von PU-Montageschaum, der bis zum Jahr 2000 größten einzelnen Emissionsquelle von HFKW in Deutschland überhaupt, sind seit einigen Jahren auf konstantem aber deutlich niedrigerem Niveau.

Die EU F-Gas-Verordnung von 2014 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014) enthält ein Verbot für Treibmittelgemische (Zubereitungen) mit einem GWP über 150. Dies ermöglicht die Verwendung von HFKW-134a als Gemisch-Komponente, unter der Voraussetzung, dass der GWP-Grenzwert von 150 nicht überschritten wird. Hierdurch sind bis zu 10 % HFKW-134a im Gasgemisch möglich, welches außerdem aus Kohlenwasserstoffen

besteht. Im Jahr 2022 betragen die Konzentrationen im Treibmittelgemisch aller im Inland angewendeten Dosen bei HFKW-134a 0,2 % und bei HFKW-152a 1,7 %.

1.4.3 Feuerlöschmittel (2.F.3)

Im Bereich der Feuerlöschmittel, der in der Vergangenheit größten Emissionsquelle der ozonschichtschädigenden Halone, spielen HFKW wie HFKW-227ea, HFKW-236fa und das seit 2005 eingesetzte HFKW-23 eine untergeordnete Rolle. Fluorierte Gase werden zwar in kleineren Räumen für EDV, Telekommunikation etc. eingesetzt, bei Raumvolumina über 400 m³ werden jedoch in der Regel andere Löschmittel, vor allem Inertgase, verwendet.

Im Jahr 2010 wurden rund 70 t HFKW-227ea neu eingesetzt, in den Folgejahren waren die Mengen etwas geringer. Erst im Jahr 2016 wurde mit 92 t ein höherer Wert erreicht. Seitdem ist der Verbrauch stark zurückgegangen und liegt ab 2021 bei Null. HFKW-227ea wird durch das Fluorketon FK-5-1-12 (Handelsname Novec 1230) ersetzt.

In mobilen Anlagen der Bundeswehr wird das Löschmittel HFKW-236fa eingesetzt.

Nach einer Schätzung des Umweltbundesamtes wurde das wegen seines hohen GWP als Löschmittel umstrittene HFKW-23 nur in geringem Umfang für Neuanlagen eingesetzt. Der Bestand wird auf ca. 5 t geschätzt. Bereits im Vorfeld des Verbots der EU F-Gas-Verordnung von 2014 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014, Anhang III, Nr. 3) ab dem 1. Januar 2016 wurden keine Neubefüllungen mehr vorgenommen, so dass der Bestand in den nächsten Jahren abnehmen wird.

Der Emissionsfaktor für die Entsorgung beträgt zukünftig für alle HFKW 9 %. Dieser Wert weicht von den Vorgaben der 2006 IPCC Guidelines ab, da in der Praxis Gasflaschen aus der Anlage ausgeschleust und einer Wiederverwendung zugeführt werden (Warncke et al. 2016a). Dieser Emissionsfaktor konnte im Basisjahr 2022 noch nicht berücksichtigt werden, da die Ergebnisse erst nach Redaktionsschluss vorlagen. Entsorgungsmengen von HFKW-227ea fallen ab 2018 an. HFKW-263fa wird ebenfalls seit 2021 entsorgt. Für HFKW-23 ist ab 2024 mit Entsorgungsemissionen zu rechnen.

1.4.4 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.

1.4.4.1 Dosieraerosole

Trotz des Anstiegs des Arzneimittelverbrauchs liegen die HFKW-Emissionen (HFKW-134a und HFKW-227ea) aus der Anwendung medizinischer Sprays für die Behandlung von Asthma und anderen Atemwegs- und Lungenerkrankungen seit etwa 10 Jahren relativ konstant bei etwa 250 t/a. Treibgasfreie Sprays scheinen also an Marktanteil zu gewinnen. Während der HFKW-227ea zeitweise an Bedeutung verloren hatte, bewegen sich die Emissionen wieder auf einem konstanten Niveau. Der wichtigste inländische Abfüller von medizinischen Dosieraerosolen nutzt HFKW-134a als Treibmittel.

Für diesen Berichtszyklus wurden die Aktivitätsdaten rekalkuliert. Die Abfüllungsmenge basiert nun für alle Jahre ab 2008 auf Werten des Statistischen Bundesamtes. Die Betriebsemissionen wurden für die Jahre 2012, 2015, 2018 und 2021 aus den Daten der Arzneiverordnungs-Reporte der jeweiligen Jahre berechnet und die Zwischenjahre interpoliert. Aus der letzteren Anpassung haben sich vor allem deutliche Änderungen bezüglich der Emissionen des HFKW-227ea ergeben, dessen Verbrauch in der Vergangenheit zu niedrig eingeschätzt wurde.

1.4.4.2 Sonstige Aerosole

Die Emissionen nichtmedizinischer Aerosole waren bereits 1995 im Vergleich zu den historischen Werten Ende der 1970er Jahre niedrig. Derzeit sind nur wenige technische Sprays (Kaltluft, Druckluft, Reinigungssprays) mit HFKW-haltigen Aerosolen gefüllt. Sie werden hauptsächlich zur Reparatur stromführender elektrischer und elektronischer Komponenten verwendet, bei denen eine Nichtentflammbarkeit erforderlich ist. Es gibt auch sogenannte „Novelties“. Dazu gehören dekorative Sprays und reine Spaßprodukte wie Signalhörner und Luftschlangen sowie Sprays für Kunstschnee. Der Verkauf HFKW-haltiger Novelties ist seit dem 4. Juli 2009 durch die EU-F-Gas-Verordnung verboten (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014, Anhang III, Nr. 9). Gemäß der aktuellen F-Gas-Verordnung waren HFKW-haltige technische Aerosole bis Ende 2017 zulässig (Anhang III, Nr. 17). Für neuartige und technische Aerosole gelten jedoch die gleichen Regeln wie bei Montageschaum: HFKW können dem Treibgasgemisch zugesetzt werden, solange das GWP unter 150 bleibt.

Seit 2013 sind auch Industrie-Aerosole mit ungesättigtem uHFKW-1234ze als Treibmittel auf dem deutschen Markt erhältlich. Alle uns bekannten Unternehmen haben bis Ende 2018 fast vollständig auf diesen Stoff umgestellt. Einige Unternehmen bleiben jedoch bei HFKW-134a und mischen es mit uHFKW-1234ze (10 % HFKW-134a, 90 % uHFKW-1234ze). Informationen zur Verwendung von uHFKW-1234ze finden sich in Kapitel 2.6.

1.4.5 Lösemittel (2.F.5)

HFKW-Lösemittel spielen in industriellen Oberflächenreinigungssystemen keine große Rolle, da die Gesetzgebung gegenüber halogenierten Vorläufermaterialien bereits vor der Markteinführung von HFKW zu einer Vielzahl von Alternativen geführt hatte. Daher ist HFKW-43-10mee das wichtigste Lösemittel der Welt, in Deutschland nicht weit verbreitet und wird nicht einmal zum Reinigen von Oberflächen, sondern eher zum Lösen von Gummiteilen verwendet. In jüngster Zeit gewinnen jedoch teilfluorierte Ether (HFE) zunehmend an Bedeutung in der Oberflächenreinigung. Diese werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt, da sie nicht den UNFCCC-Berichtspflichten unterliegen, werden aber in Kapitel 2.2 behandelt. Wir haben erstmals im Jahr 2016 (rückwirkend bis 2008) darüber berichtet, dass die beiden flüssigen HFKW-365mfc und HFKW-245fa als Lösemittel verwendet werden. Allerdings handelt es sich dabei nur um geringe Mengen.

Ein weiteres fluoriertes Treibhausgas, das ebenfalls als Lösemittel zum Einsatz kommt, ist Perfluorhexan (C₆F₁₄), das in geringen Mengen in der Kunststoffindustrie verwendet wird. Diese Mengen werden auch unter Lösemittel ausgewiesen und unter dem Umweltstatistikgesetz (UStatG) erhoben.

1.5 Sonstige Produktherstellung und -verwendung (2.G)

Da sich dieser Abschnitt hauptsächlich mit SF₆ befasst, geben wir zunächst einen allgemeinen Überblick über dessen Emissionen. Dieser Abschnitt enthält auch die in 2.H.3 aufgeführten vertraulichen Daten (siehe kurze Erläuterung im Kapitel 1.6).

Die SF₆-Emissionen sind zwischen 1995 und 2022 von 311 Tonnen auf 91 Tonnen gesunken. Dies entspricht einer Reduzierung von 7 auf 2 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten (siehe Tabelle 15 und Tabelle 16). Dieser Rückgang um etwa 220 t war vor allem auf das Verbot der Befüllung von Pkw-Reifen mit SF₆ zurückzuführen. Aber auch andere Sektoren trugen zur Emissionsreduzierung bei. Seit 2008 schwankten die Emissionen zwischen 91 und 178 Tonnen. Im Jahr 2019 gab es die höchsten Emissionen. Allerdings kam es in den letzten drei Jahren zu einem deutlichen Rückgang, der auf sinkende Emissionen aus dem Bereich der Isolierglasfenster zurückzuführen ist.

Tabelle 15: SF₆-Emissionen und vertrauliche Emissionen (2.H.3) [t] 1995-2022

	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
Aluminium- und Magnesiumguss	7,8	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 und T&D Bauteile	43,6	43,4	27,1	18,7	17,5	9,6	10,1	9,6
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	111,1	91,5	60,2
SF ₆ -Produktion	7,0	9,0	10,0	3,8	0,06	0,04	0,04	0,05
Solartechnik	-	-	0,86	2,29	-	-	-	0,0008
Spurengas	0,5	0,5	0,5	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Teilchenbeschleuniger	4,9	5,0	4,9	4,1	4,1	4,2	4,2	4,2
Insgesamt	283,7	178,7	142,66	133,69	144,26	133,34	113,06	82,35

Vertrauliche Emissionen 2.H.3:

Radar, Schweißen, Optische Glasfasern, Sohlen, Medizin- und Kosmetikprodukte, Wärmeüberträger, Lösemittel, Kantenisolierung (Solarzellenproduktion)

HFKW, FKW, SF ₆	27,73	34,47	21,63	16,86	12,41	7,37	8,27	8,31
Insgesamt SF₆ inkl. 2.H.3	311,43	213,17	163,98	150,52	156,67	140,71	121,33	90,66

Für die Abschätzung der Emissionen wird seit dem Berichtsjahr 2006 das Umweltstatistikgesetz (UStatG) genutzt. Das Statistische Bundesamt führt seit 2007 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 erfasst.

Für die kommenden Jahrzehnte gehen wir von einem Rückgang der SF₆-Emissionen aus, der sich bereits in den Daten erkennen lässt. Auch die SF₆-Emissionen aus Schallschutzscheiben nehmen seit 2020 ab und werden voraussichtlich ca. 2034 komplett wegfallen. Es ist zu beachten, 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 16: SF₆-Emissionen und vertrauliche Emissionen (2.H.3) [Mio. t CO₂-Äquivalente] 1995-2022

	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
Aluminium- und Magnesiumguss	0,182	0,324	0,714	0,151	0,067	0,053	0,051	0,097
Autoreifen	2,585	1,175	0,064	0,013	0,001	-	-	-
Elektr. Schaltanlagen und T&D Bauteile	1,025	1,020	0,636	0,439	0,410	0,226	0,237	0,226
Halbleiter	0,050	0,058	0,077	0,018	0,020	0,028	0,033	0,081
Schallschutzscheiben	2,534	1,283	1,470	2,169	2,689	2,611	2,151	1,414
SF ₆ -Produktion	0,165	0,212	0,235	0,089	0,001	0,001	0,001	0,001
Solartechnik	-	-	0,019	0,052	-	-	-	0,018
Spurengas	0,0114	0,0114	0,0114	0,0912	0,0912	0,0912	0,0912	0,0912
Teilchenbeschleuniger	0,106	0,117	0,116	0,097	0,097	0,098	0,098	0,098
Insgesamt	6,658	4,200	3,342	3,119	3,376	3,108	2,662	2,026

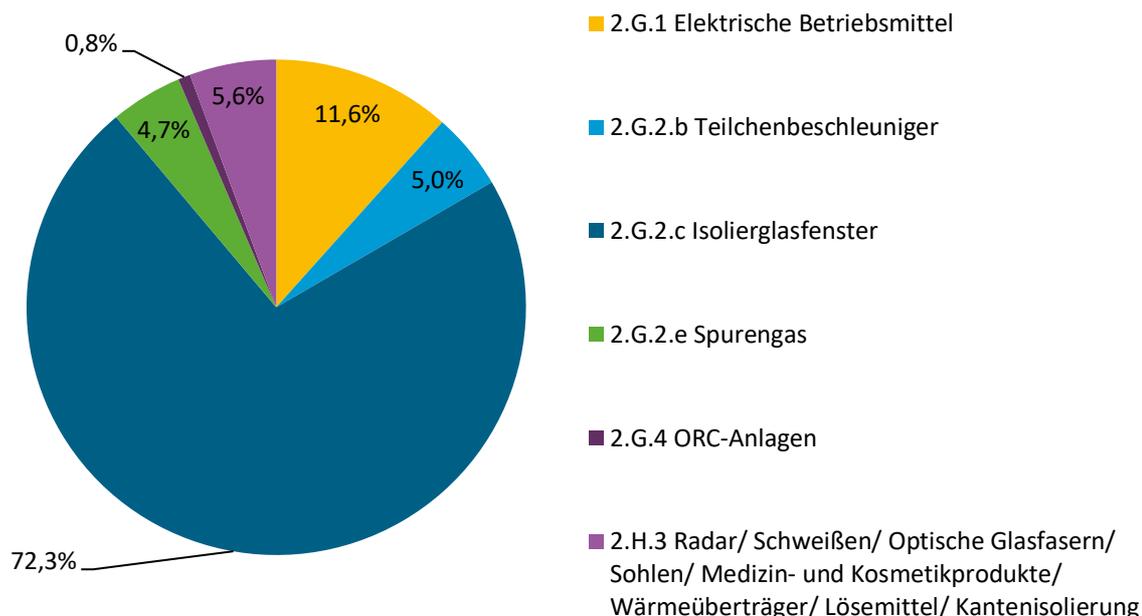
Vertrauliche Emissionen 2.H.3:

Radar, Schweißen, Optische Glasfasern, Sohlen, Medizin- und Kosmetikprodukte, Wärmeüberträger, Lösemittel, Kantenisolierung (Solarzellenproduktion)

HFKW, FKW, SF ₆	0,592	0,710	0,404	0,293	0,185	0,095	0,120	0,110
Insgesamt SF₆ inkl. 2.H.3	7,105	4,766	3,619	3,295	3,493	3,244	2,820	2,122

Abbildung 8 stellt die Anteile der verschiedenen Subsektoren der klimawirksamen Emissionen des Sektors 2.G. sowie alle vertraulich zu berichtenden Daten unter 2.H.3 dar.

Abbildung 8: Anteile der klimawirksamen Emissionen bezogen auf CO₂-Äquivalente des Sektors 2.G und 2.H.3 in Deutschland 2022 (%)



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.

1.5.1 Elektrische Betriebsmittel (2.G.1)

1.5.1.1 Elektrische Anlagen der Energieübertragung und -verteilung

Die SF₆-Anwendung in elektrischen Betriebsmitteln ist weltweit mit Abstand die Größte, und auch in Deutschland findet in diesem Sektor der höchste SF₆-Verbrauch statt. Im Jahr 2016 wurde mit über 1000 t der höchste Verbrauch seit Beginn der Datenmeldung im Jahr 1995 gemeldet. Seitdem findet ein langsamer und stetiger Abwärtstrend statt, und so sank der Verbrauch im Jahr 2022 auf etwa 496 t. Die große Mehrheit der produzierten Anlagen wird exportiert. Emissionen im Inland entstehen vor allem bei der Herstellung (Forschung und Tests) und im Betrieb. Nur zu einem geringen Teil stammen sie aus der Außerbetriebnahme. Die Gesamtemissionen gingen seit 1995 zurück und sanken bis 2014 auf 9,5 t, 2022 sind Emissionen von 9,6 t zu verzeichnen.

Seit 2008 haben die Netzbetreiber, bei denen die Bestandsemissionen entstehen, ein anderes System der Datenerfassung für den Bereich der Hochspannung eingeführt. Die Emissionen werden anhand ausgewählter Referenzanlagen in der Hochspannung, an denen sie gemessen werden können, hochgerechnet (Schwarz 2007). Es findet also keine Vollerhebung statt. Genauere Informationen hierzu sind im Bericht zur Inventarerhebung der F-Gase für 2017/2018, Kapitel 2.7 (Warncke et al. 2021a) zu finden.

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 Auffassung.

1.5.1.2 Produktion elektrischer Bauteile für die Energieübertragung (T&D-Bauteile)

Zu den elektrischen Bauteilen gehören Zubehör für Schaltanlagen wie Messtransformatoren und Durchführungen sowie Kondensatoren für Umrichter. Diese Komponenten werden seit 2005 getrennt von den Schaltanlagen („elektrische Betriebsmittel“) ausgewiesen, um den Status freiwilliger Initiativen zu veranschaulichen, die sich nur auf die im vorigen Abschnitt genannten Schaltanlagen im engeren Sinne beziehen. Im Jahr 2001 beliefen sich die Emissionen aus der Herstellung elektrischer Komponenten auf 27 Tonnen und übertrafen damit die Emissionen aus Schaltanlagen selbst. Allerdings hat die Industrie den Verbrauch pro Produkt durch Gaswiederverwendung und -recycling erheblich reduziert, so dass die Emissionen im Jahr 2009 nur 8 Tonnen betragen. Im Jahr 2022 waren es 1,9 Tonnen. Eine ausführliche Erörterung der T&D-Komponenten findet sich im Bericht der Kommission über die Bewertung der Verfügbarkeit von Alternativen zu fluorierten Treibhausgasen in Schaltanlagen und zugehörigen Geräten, einschließlich sekundärer Hochspannungsschaltanlagen ab Seite 10 (Europäische Kommission 2020).

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

1.5.2.1 Militär - AWACS (2.G.2.a)

Die SF₆-Emissionen aus Radarsystemen sind seit 2010 zwar rückläufig, aber seit einigen Jahren relativ stabil. Ihr Umfang ist vertraulich.

1.5.2.2 Teilchenbeschleuniger (2.G.2.b)

Aus den Nachfüllungen ergeben sich im Jahr 2022 geschätzte SF₆-Emissionen aller Teilchenbeschleuniger von etwa 4 t (Gesamtbestand: 73,7 t).

Im Hochspannungsbereich wird der Anlagen- und SF₆-Bestand als stabil angenommen. Diese Einschätzung ist auch für den Forschungs- und Entwicklungsbereich, sowie den industriellen Sektor anzunehmen. Eine jährliche Zunahme erwarten wir bei Strahlentherapiegeräten in medizinischen Einrichtungen mit entsprechenden Geräten.

Da Teilchenbeschleuniger auch in der Herstellung von Halbleitern benötigt werden und in Deutschland zurzeit neue Standorte zur Halbleiterfertigung errichtet werden, ist mit einem möglichen Anstieg der Emissionen zu rechnen.

1.5.2.3 Isolierglasfenster (2.G.2.c)

Das Inverkehrbringen von SF₆-haltigen Schallschutzscheiben für Wohnhäuser ist seit Juli 2007 verboten, ein Jahr später auch für "sonstige Fenster" (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014).

Aktuelle und zukünftige Emissionen aus dieser Anwendung entstehen vor allem durch die offene Entsorgung alter Fenster 25 Jahre nach der Befüllung. Hierdurch sind die Emissionen seit dem Jahr 2000 um etwa 5-6 Tonnen pro Jahr gestiegen. Die Emissionen aus der Entsorgung stiegen bis 2019 auf rund 140 Tonnen pro Jahr. Nach dem aktuellen Stand der Technik ist dieser Anstieg kaum zu verhindern, da entsprechende Entsorgungstechniken nicht zur Verfügung stehen. Im Jahr 2022 sind die Emissionen bereits auf 60 Tonnen gesunken. Dieser Trend wird sich fortsetzen bis die Emissionen im Jahr 2035 null erreichen.

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

FKW

Diverse Sportschuhe enthielten eine Zeitlang SF₆ in den Sohlen. Dieses wurde zwischen 2004 und 2006 durch den FKW-218 ersetzt. Entsorgungsemissionen solcher Schuhe traten 2007 auf, da eine Nutzungsdauer von durchschnittlich drei Jahren angenommen wurde. 2009 war somit das letzte Jahr mit Emissionen.

SF₆

Sowohl SF₆ als auch FKW-218 sind in neuen Schuhen seit Juli 2006 verboten (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2006a).

Seit Mitte der 1990er Jahre war die Anwendung von SF₆ zur Befüllung von Autoreifen rückläufig. Durch umfassende Aufklärung war der Verbrauch von über 100 t Ende der 1990er Jahre auf 1 t im Jahr 2008 zurückgegangen. Die Anwendung wurde ab dem 4. Juli 2007 durch die EU F-Gas-Verordnung (EG) Nr. 842/2006 verboten (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2006a).

1.5.2.5 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 (Warncke et al. 2016b). Die Hauptemissionsquelle sind Funktionstests von Laborabzügen.

Schweißen (SF₆)

Die Anwender aus diesem Bereich sind Zulieferer der Autoindustrie. Seit dem Jahr 2018 wird in diesem Bereich kein SF₆ mehr eingesetzt.

Optische Glasfasern (SF₆)

SF₆ wird bei der Produktion optischer Glasfasern zur Fluordotierung eingesetzt, wobei es fast vollständig zerstört wird. Folglich nehmen wir für das F-Gas-Inventar einen sehr kleinen Emissionsfaktor an, der aber der Vertraulichkeit unterliegt. Die Einsatzmengen steigen seit dem Beginn der Erhebung durch das UStatG deutlich an und lagen 2022 bei 42 t.

Einzelheiten zu der Anwendung von SF₆ für die Herstellung von optischen Glasfasern finden sich im Bericht „Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland 2015“ (Warncke et al. 2016b).

Medizinische und kosmetische Anwendungen (FKW)

„Der seit 2013 neu zu berichtende Stoff Perfluordecalin (PFD; C₁₀F₁₈) wird in kosmetischen und medizinischen Anwendungen eingesetzt, was durch das ursprüngliche Einsatzgebiet als FKW-basiertes Blutersatzmittel erklärt werden kann. Perfluordecalin 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.“ (Warncke und Gschrey 2021b)

1.5.3 ORC-Anlagen (2.G.4)

HFKW

Der Organic Rankine Cycle (ORC) ist ein Prozess zur Erzeugung elektrischer Energie, bei dem anstelle von Wasser verschiedene Substanzen als Arbeitsmittel zum Einsatz kommen, die bei niedrigeren Temperaturen verdampfen. Für Geothermieanlagen werden oft Kohlenwasserstoffe wie Isobutan verwendet. Seit 2011 werden in geothermischen ORC-Anlagen auch HFKW eingesetzt (HFKW-365mfc oder HFKW-245fa; in der Vergangenheit auch der HFKW-134a und der FKW C₅F₁₂).

Die Emissionen des Jahres 2022 aus Befüllung und Betrieb von ORC-Anlagen schätzen wir auf knapp 15 t (nur HFKW).

FKW

Der Stoff C₅F₁₂ unterliegt ebenfalls der UNFCCC-Berichterstattung. Im Bericht „Emissionen fluoriertes Treibhausgas in Deutschland 2014“ (Warncke et al. 2016a) 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 Andere Bereiche (2.H.3)

In diesem Abschnitt werden alle Anwendungen berichtet, welche der Vertraulichkeit unterliegen. Dazu gehören die Kantenisolierung (2.E.3), 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 sind, 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 aktuellen EU F-Gas-Verordnung (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014) fordert ab 2015 eine Berichterstattung zusätzlicher fluoriierter Verbindungen, soweit sie im Anhang II der Verordnung aufgelistet sind, nämlich:

- ▶ ungesättigte teil(chlor)fluorierte Kohlenwasserstoffe,
- ▶ fluorierte Ether inklusive teilfluorierter 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 die Daten für die Jahre 2021 und 2022.

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

2.1 Ungesättigte teilfluorierte Kohlenwasserstoffe

Mengenrelevante Reinstoffe in Deutschland sind vor allem der uHFKW-1234yf (GWP 1 (AR5); GWP 4 (AR4)) und der uHFKW-1234ze(E) (GWP 1 (AR5); GWP 7 (AR4)). In kommerziellem Maßstab wird der uHFKW-1234yf bisher ausschließlich als Kältemittel eingesetzt, der uHFKW-1234ze(E) als Treibmittel für XPS-Dämmstoffe und technische Aerosole sowie als Kältemittel in Chillern.

Seit 2021 wird der uHFKW-1234yf in Pkw-Klimaanlagen als Alternative zu R-134a eingesetzt. Im Jahr 2022 waren in Deutschland alle neu zugelassenen klimatisierten Fahrzeuge mit R-1234yf ausgestattet; einige Modelle auch mit CO₂. Der inländische Bestand von R-1234yf in Fahrzeugklimaanlagen lag im Jahr 2022 bei 10.597 t (zum Vergleich R-134a: 16.218 t).

Da die MAC-Richtlinie auch für die Gruppe 1 der kleinsten Gewichtsklasse der Nutzfahrzeuge N1 gilt, werden seit 2016 auch Nutzfahrzeuge N1 zunehmend ebenfalls mit R-1234yf klimatisiert.

Seit 2013 kommt der uHFKW-1234ze als Reinstoff-Kältemittel auch in stationärer Anwendung vor und zwar in Kaltwassersätzen. Zudem wurde in Turbochillern der chlorhaltige Stoff uHFKW-1233zd (E) (GWP 1 (AR5)) eingeführt.

Nicht als Reinstoff, sondern als Mischungskomponente wird R-1234yf bisher in mehreren kommerziell verfügbaren Kältemitteln eingesetzt, nämlich in R-448A (Anteil von R-1234yf: 20 %), R-449A (Anteil 25 %), R-452A (Anteil 30 %), R-454B (Anteil 31%), R-454C (Anteil 78,5 %), R-455A (Anteil 75,5 %) und R-513A (Anteil 50 %). R-1234ze ist in den Gemischen R-448A (Anteil 7 %), R-450A (Anteil 58 %) und R-515B (Anteil 91,1 %) enthalten. Mengenmäßig ist R-449A (GWP 1.282 (AR5)) am wichtigsten: Insgesamt etwa 550 t dieser Mischung befanden sich 2022 im Bestand, und zwar als Ersatz für R-404A. Auch R-448A (GWP 1.273 (AR5)) hatte in dieser Anwendung deutlich an Bedeutung gewonnen und kam auf einen Bestand von etwa 180 t im Jahr 2022 der seitdem wieder abnimmt (genauere Erläuterung siehe Kapitel 1.4.1.1).

Im Jahr 2015 wurde erstmalig R-452A (GWP 1.945 (AR5)) in großen Kühlfahrzeugen eingesetzt. Mittlerweile haben alle Hersteller fast ihre gesamten Neuanlagen auf R-452A umgestellt. R-452A kommt außerdem seit 2018 in Kühlcontainern zum Einsatz.

R-455A und R-454C kommen in Verflüssigungssätzen, steckerfertigen Geräten und Wärmepumpen zur Anwendung.

R-513A wird nicht nur in Chillern verwendet, sondern auch in Kühlcontainern, gewerblichen Spülmaschinen und ebenso Verflüssigungssätzen. In Kaltwassersätzen werden weiterhin R-454B und R-515B verwendet. Letzterer ist neben R-450A, welcher in gewerblichen Spülmaschinen verwendet wird, der einzige neue Blend, der R-1234ze enthält.

uHFKW-1234ze wird auch als Treibmittel für die Herstellung von XPS-Dämmstoffen und in bestimmten technischen Aerosolen eingesetzt. Dabei handelt es sich um uHFKW-1234ze als Reinstoff. Ebenso als Reinstoff wird der uHFKW-1366mzz(Z) in Integralschäumen eingesetzt.

Tabelle 17: Emissionen ungesättigter HFKW in Tonnen und kt CO₂-Äquivalenten 2012, 2015, 2017, 2020-2022

Substanz	Sektor	2012	2015	2017	2020	2021	2022
uHFKW-1234yf	Pkw	0,3	33,9	320,5	831,5	959,4	1066,8
uHFKW-1234yf	Nutzfahrzeuge N1	-	-	0,21	6,1	11,8	18,3
uHFKW-1234yf	R-448A, R-449A Supermärkte	-	1,08	7,9	12,15	11,97	11,40
uHFKW-1234yf	R-449A Verflüssigungssätze	-	-	0,18	0,77	0,95	1,11
uHFKW-1234yf	R-452A Kühlfahrzeuge	-	0,15	1,50	7,02	8,45	10,05
uHFKW-1234yf	R-452A Kühlcontainer	-	-	-	0,02	0,05	0,07
uHFKW-1234yf	R-454B Chiller	-	-	-	-	0,0086	0,0267
uHFKW-1234yf	R-454C Verflüssigungssätze	-	-	-	0,09	0,16	0,24

Substanz	Sektor	2012	2015	2017	2020	2021	2022
	+ steckerfertige Geräte						
uHFKW-1234yf	R-455A Verflüssigungssätze + steckerfertige Geräte	-	-	-	0,27	0,47	0,68
uHFKW-1234yf	R-513A Kühlcontainer	-	-	-	0,04	0,10	0,16
uHFKW-1234yf	R-513A Spülmaschinen	-	-	-	0,00021	0,00044	0,00066
uHFKW-1234yf	R-513A Chiller	-	-	0,23	2,96	5,08	7,68
uHFKW-1234ze	Verflüssigungssätze	-	-	-	0,48	0,76	1,03
uHFKW-1234ze	XPS und techn. Aerosole	-	41,84	83,46	142,11	164,83	132,45
uHFKW-1234ze	R-448A Supermärkte	-	0,02	0,53	0,80	0,81	0,80
uHFKW-1234ze	R-450A Spülmaschinen	-	-	-	-	0,00014	0,00038
uHFKW-1234ze	R-515B und R-1234ze Chiller	-	0,15	1,97	12,64	19,78	28,27
uHFCKW-1233zd	Turbochiller	-	-	0,06	0,39	0,60	0,77
uHFKW-1336mzz	PU Integralschaum			0,011	0,028	0,045	0,045
uHFKW-1234yf	Summe Emissionen in kt CO₂-Äq.	0,001	0,035	0,331	0,861	0,997	1,113
uHFKW-1234ze	Summe Emissionen in kt CO₂-Äq.	-	0,042	0,095	0,156	0,186	0,163
uHFCKW-1233zd	Summe Emissionen in kt CO₂-Äq.	-	-	0,00006	0,00039	0,00060	0,00077
uHFKW-1336mzz	Summe Emissionen in kt CO₂-Äq.			0,02	0,06	0,09	0,09

GWP nach AR5 uHFKW-1234yf: 1; GWP uHFKW1234ze(E): 1; GWP uHFCKW-1233zd (E): 1

2.2 Teilfluorierte Ether (HFE)

Die Haupteinsatzgebiete von HFE sind zum einen offene und geschlossene Anwendungen in der Industrie und zum anderen die medizinische Anästhesie.

2.2.1 HFE in der Industrie

Bei den HFE für industrielle Anwendungen handelt es sich im Wesentlichen um vier Produkte der "7000er"-Reihe, nämlich um HFE-7100, HFE-7200, HFE-7300 und HFE-7500. Die GWP-Werte reichen von 57 (AR5) für HFE-7200 bis 425 (AR5) für HFE-7300. Der HFE-7100 hat nach AR5 nun einen GWP von 410 (AR4: 297). In den meisten Anwendungen kommen mehrere HFE-Typen gleichzeitig vor. 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.

Weiter kam in der Vergangenheit der sogenannte H-Galden zur Anwendung. Dabei handelt es sich um eine Gruppe mehrerer Einzelsubstanzen, die sich durch ihre Siedepunkte voneinander unterscheiden. H-Galden hat ein relativ hohes GWP von 2.820 (AR5) und war als Ersatz für perfluorierte Polyether (PFPE) aus der Reihe "Galden" entwickelt worden, welche ein sehr hohes GWP von 9.710 (AR5) aufweisen. Es konnte sich allerdings nicht am Markt durchsetzen, daher wurde die Produktion 2011 eingestellt. H-Galden wird nur in geschlossenen Systemen der Halbleiterindustrie als Wärmeüberträger-Flüssigkeit eingesetzt, nicht in offenen Anwendungen.

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, welche in der deutschen Industrie recht weit verbreitet sind.

Lösemittel für Polymere zur Oberflächenbeschichtung in der Elektronik

Bestückte Leiterplatten, elektronische Bauelemente oder diverse Festplattenkomponenten werden in der Fertigung oft mit einem Schutzfilm beschichtet, um Feuchtigkeit oder bestimmte Lösemittel abzuweisen. Der Schutzlack besteht aus 2 bis 15 % Feststoff (fluorhaltiges Acrylatpolymer), welcher in 85 bis 98 % HFE-7100 oder HFE-7200 gelöst ist. Dabei verdunstet das Lösemittel bei der Anwendung, weshalb Verbrauch und Emissionen gleichzusetzen sind. Wir schätzen Verbrauch/Emission von HFE in dieser Anwendung auf Basis eigener Berechnungen für 2022 auf 5,5 kt CO₂-Äquivalente.

Trägerflüssigkeit für Schmierstoffe

Den größten Posten des Absatzes bildete 2022 die Verwendung als Trägermittel bzw. Lösemittel für Schmierstoffe mit 8,3 kt CO₂-Äquivalenten (überwiegend HFE-7100, HFE-7200 und HFE-7300).

Lösemittel in der Oberflächenreinigung

In Deutschland spielen fluorierte Medien, im Gegensatz zu den USA, Japan oder Frankreich, in der Präzisionsreinigung nur eine marginale Rolle. Seit 2005 werden in Deutschland Reinigungsanlagen mit HFE, meistens mit HFE-7100, auf den Markt gebracht. Die jährlichen Einsatzmengen in Deutschland sind 2022 deutlich angestiegen und liegen bei etwa 5 kt CO₂-Äquivalenten.

Tabelle 18: Emissionen von HFE (-7100, -7200, -7300, -7500) aus offenen industriellen Anwendungen [kt CO₂-Äquivalente] 2000-2022

Offene HFE-Anwendungen	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
Summe [kt CO ₂ -Äq.]	1,47	8,99	12,01	15,99	16,53	17,25	18,87

Geschlossene Anwendungen in der Halbleiter- und sonstigen Industrie

Wie bereits in Abschnitt 1.3.3 erläutert, wird eine Reihe von fluorierten Wärmeüberträgern zur Kühlung von Prozessschritten als Wärmeüberträger (Heat-Transfer-Fluid; HTF) in der Halbleiterherstellung, als Alternative zu vollfluorierten Substanzen, eingesetzt.

Der Hauptanwendungsbereich der HFE ist die Halbleiterindustrie. Dort werden fluorierte Wärmeüberträger in zahlreichen Abschnitten der Wafer-Produktion eingesetzt. In geringerem Umfang kommen HFE auch in diversen sonstigen Industrieanwendungen vor, in denen mit konstanten Temperaturen gearbeitet wird.

Die Emissionsabschätzung ist in der folgenden Tabelle 19 wiedergegeben. Aufgrund der Vertraulichkeit sind die Werte der HFE-7000er-Reihe (Durchschnitts-GWP: 301) und von H-Galden (GWP: 2.820 (AR5)) zusammengefasst.

Tabelle 19: Wärmeübertragung: HFE-Emissionen in der Halbleiter- und sonstigen Industrie [kt CO₂-Äquivalente] 2000-2022

Geschlossene HFE-Anwendungen	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
Summe [kt CO ₂ -Äq.]	0,54	1,76	2,47	2,31	1,85	1,88	1,91

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

2.2.2 HFE als Narkosegase in der Medizin

In der Humanmedizin werden in Deutschland drei fluorierte Narkosemittel für inhalative Vollnarkosen genutzt (geschätzte Anteile nach Anwendungsfällen in Klammern) und zwar Sevofluran (> 65 % der Fälle), Desfluran (> 32 %) und Isofluran (< 3 %). Die Schätzungen dieser Werte aus der Studie „Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland 2015“ (Warncke et al. 2016b) wurden in den vergangenen Jahren immer wieder mit Vertretern aus Kliniken abgeglichen und haben sich seitdem nicht verändert. Auf dem Schweizer Jungfrauoch wurden bei Messungen im Jahr 2015 bereits relevante Konzentrationen in der Atmosphäre gemessen (Reimann et al. 2018).

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

Tabelle 20: Chemische und ökologische Kenndaten der fünf halogenierten Narkosegase

Name	Chemische Formel	Industrielle Bezeichnung	ODP	GWP-Werte*	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	491	3,2 ^c
Desfluran	CHF ₂ OCHFClCF ₃	HFE-236ea2	-	1.790	14 ^d
Sevofluran	CH ₂ FOCH(CF ₃) ₂	HFE-347mcc3	-	216	1,1 ^d

* GWP-Wert von Halothan nach US EPA (Environmental Protection Agency 2014).

GWP-Werte von Enfluran, Isofluran, Desfluran und Sevofluran nach 5. IPCC-Sachstandsbericht (Stocker et al. 2013).

a Carpenter et al. 2014.

b Langbein et al. 1999.

c Sulbaek Andersen et al. 2010.

d Sulbaek Andersen et al. 2012.

Genaue Erläuterungen zur Ermittlung der Emissionen inklusive Quellen und Eingabewerten finden sich in „Emissionen fluoriertes Treibhausgase in Deutschland 2013“ (Zeiger et al. 2015). Die Werte der letzten beiden Berichtsjahre sind identisch, da für die Anzahl der Operationen auf Daten des Statistischen Bundesamtes zurückgegriffen wird (Statistisches Bundesamt 2023), 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 21 dargestellt sind.

Tabelle 21: Emissionen der halogenierten Narkosegase in Deutschland 1990-2022 unter Einbeziehung ihrer Metabolisierungsraten [t]

Substanz	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
Desfluran	-	-	31,6	65,0	103,0	102,7	98,9	99,0	99,0
Sevofluran	-	-	15,2	31,8	50,8	69,4	66,8	66,9	66,9
Isofluran	8,7	21,4	19,9	15,6	9,1	2,4	2,3	2,3	2,3
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	171,8	172,0	172,0

In Tabelle 22 sind die klimawirksamen Emissionen der vier Narkosegase auf Ether-Basis, d.h. ohne Halothan, enthalten. Die Emissionen von HCFE und HFE als Narkosegase betragen im Jahr 2022 ca. 193 kt CO₂-Äquivalente.

Tabelle 22: Emissionen der halogenierten Narkosegase in Deutschland 1990-2022 [kt CO₂-Äquivalente] – ohne Halothan

Substanz	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
Desfluran	-	-	56,5	116,3	183,8	101,5	177,1	177,2	177,2
Sevofluran	-	-	3,3	6,9	15,0	15,0	14,4	14,4	14,4
Isofluran	4,3	10,5	9,8	7,7	1,2	0,8	1,1	1,1	1,1
Enfluran	11,9	11,1	8,1	2,8	-	-	-	-	-
Summe [kt CO₂-Äq.]	16,1	21,8	77,6	133,6	199,8	199,9	192,6	192,8	192,8

2.3 Perfluorierte Polyether (PFPE)

Im Unterschied zu vollfluorierten Kohlenwasserstoffen enthalten perfluorierte Polyether (PFPE) außer Kohlenstoff (C) und Fluor (F) auch Sauerstoff (O), aber anders als HFKW oder HFE (Hydrofluorether) keinen Wasserstoff (H), ihr GWP ist sehr hoch. Die EU F-Gas-Verordnung (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014) 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). Nach dem AR5 beträgt der GWP nun 9.710.

PFPE finden Anwendung in folgenden Bereichen: Dampfphasenlötten von Leiterplatten, Wärmeüberträger in der Halbleiterindustrie, Arbeitsmittelkomponente in ORC-Anlagen sowie als Träger- bzw. Lösemittel für Schmierstoffe für extreme Temperaturbelastungen.

Die Produktgruppe wird unter dem Handelsnamen Galden vermarktet.

2.3.1 GWP von PFPE

Das Unternehmen Solvay erklärte sich in der Vergangenheit nicht bereit, für uns die Lieferungen der PFPE der Galden-Reihe nach Deutschland zusammenzustellen. Das Unternehmen bestätigte aber die von uns im Jahr 2015 vorgelegten Eigenschätzungen in allgemeiner Form. Die Emissionsdaten sind ergo deutlich unsicherer als die sonstigen Schätzungen und Berechnungen in diesem Bericht. Bei der Berechnung der Klimawirksamkeit wird der AR5 herangezogen, für PFPE wird generell ein GWP von 9.710 angewendet.

2.3.2 Verwendung in ORC-Anlagen

Das Kapitel 1.5.3 im vorliegenden Bericht geht bereits auf die Anwendung in ORC (Organic Rankine Cycle)-Anlagen ein. Der PFPE Galden, genauer Galden® HT-55, wird zusammen mit 65 % HFKW-365mfc, als 35 %-Komponente im ORC-Arbeitsmittel „Solkatherm SES 36“ verwendet.

2.3.3 Wärmeüberträger in der Halbleiterindustrie

Wärmeüberträger in der Halbleiterindustrie wurden, soweit sie berichtspflichtig sind, im Abschnitt 1.3.3 behandelt. Außer PFPEs 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-Reflow-Löten von Leiterplatten mit PPFMIE (Perfluorpolymethylisopropylether)

Um Leiterplatten zu löten, damit eine dauerhafte Verbindung zwischen elektronischen Bauteilen und den Schaltkreisen auf der Leiterplatte hergestellt wird, wird das Lötmedium geschmolzen, indem die gesamte Baugruppe auf 200 °C und mehr erhitzt wird (dieser Teil des Prozesses ist der „Reflow“). So werden die elektronischen Kontakte dauerhaft hergestellt. Reflow-Öfen werden über erwärmte Luft (Konvektion), Infrarot oder Laser beheizt, teilweise aber auch in der Dampfphase von kochendem GALDEN-PFPE.

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

Aus Gründen der Vertraulichkeit können die genauen Angaben zu den entsprechenden Parametern der Emissionsabschätzungen an dieser Stelle nicht wiedergegeben werden. Eine detaillierte Beschreibung sowie die Emissionen liegen dem UBA vor.

2.3.5 Lösemittel in Schmierstoffen

Die niedrig siedenden PFPE der Galden®-Serie werden in beträchtlichem Umfang als Lösemittel verwendet (Handelsname Fomblin®). Anwendungsbereiche sind u.a. die Halbleiterherstellung für Vakuumpumpen, aber auch Luftfahrt, Feinwerktechnik, Textilmaschinen, Kfz-Industrie, Druckbehälter 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 23 wird die Summe der PFPE-Emissionen dargestellt. Es entstanden im Jahr 2022 Emissionen in Höhe von 227,7 kt CO₂-Äquivalenten. Seit 2020 sind die Emissionen allerdings gleichbleibend, da sie entweder bei Null liegen oder als stabil angenommen werden.

Tabelle 23: PFPE-Emissionen aus Wärmeübertragung, Dampfphasen-Reflow-Löten, Schmierstoffen und ORC-Anlagen 1990-2022 in Tonnen und kt CO₂-Äquivalenten

Substanz	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
PFPE [t]	10,92	12,22	16,55	20,01	22,49	22,33	22,10	22,10	22,10
PFPE [kt CO ₂ -Äq.]	112,2	125,4	170,0	205,6	231,4	229,9	227,7	227,7	227,7

2.4 Trifluormethylschwefelpentafluorid (SF₅CF₃)

SF₅CF₃ kann als Ersatz von SF₆ in der chemischen Ozeanographie als Tracergas für Langzeitmessungen der Durchmischung des Meeres eingesetzt werden. Diese Tracer-Release-Experimente werden vom Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel (GEOMAR) auf hoher See und nicht in deutschen Gewässern durchgeführt.

SF₅CF₃ hat einen sehr hohen GWP von 17.400 (AR5). Die chemische Struktur weist Ähnlichkeiten zu SF₆ auf.

SF₅CF₃ muss gemäß Artikel 19 der EU F-Gas-Verordnung (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014) von herstellenden oder importierenden Unternehmen seit 2015 berichtet werden. Bis einschließlich des Berichtsjahres 2022 gab es allerdings in Deutschland keine SF₅CF₃-Emissionen.

2.5 Sulfuryldifluorid (SO₂F₂)

Seit dem Berichtszyklus 2019/2020 wurde der Stoff Sulfuryldifluorid (SO₂F₂) neu aufgenommen in die Inventarerhebung. Sulfuryldifluorid dient als Alternative für das unter dem Montrealer Protokoll geregelte Methylbromid. Der Stoff wird nicht nur als Insektizid für Lebensmittel, sondern vor allem auch zur Bekämpfung von Holzschädlingen genutzt. Sulfuryldifluorid kommt in Deutschland hauptsächlich zur Begasung von Containern zum Einsatz, in denen Holz exportiert wird. Es hat ein sehr hohes Treibhauspotenzial (GWP) von 4.090 (AR5).

In der Neufassung der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft von 2021 ist festgeschrieben, dass ab dem 01. Dezember 2021 bei neuen Begasungsanlagen ein Abschneiden von Sulfuryldifluorid aus der Containerluft stattfinden muss. Altanlagen müssen bis zum 01. Dezember 2026 nachgerüstet werden (Umweltbundesamt 2023a).

Laut dem Verzeichnis des Bundesamtes für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit über zugelassene Pflanzenschutzmittel endet die Zulassung für SO₂F₂ in Deutschland am 31. Oktober 2024 (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit 2023a).

Als Datengrundlage verwenden wir die öffentlichen Absatzzahlen des Wirkstoffabsatzes als Pflanzenschutzmittel des Bundesamtes für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit 2023b). 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 2022 bei 435 kt CO₂-Äquivalenten. Die Absatzmengen und damit auch die Emissionen für das Jahr 2022 standen zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts noch nicht zur Verfügung. Daher erfolgte eine Datenfortschreibung des Wertes aus dem Jahr 2021.

2.6 Weitere fluorierte Treibhausgase

Das deutsche F-Gas-Inventar berichtet weiter freiwillig die Stoffe C₉F₂₁N (Fluorinert FC-3283, Perfluor-Tri-N-Propylamin; GWP 8.690 (AR4)) und C₅F₁₁NO (Fluorinert FC-3284, Perfluor-N-Methylmorpholin; GWP 8.800 (REACH-Registrierungsdossier)).

Weiterhin wird die stickstoffhaltige vollfluorierte Substanz Perfluortributylamin (PFTBA, C₁₂F₂₇N) mit dem 3M-Handelsnamen Fluorinert FC-43 berichtet. Ihr GWP ist laut 6. IPCC Sachstandsbericht (AR6, Forster et al. 2021) 8.490. Mögliche Anwendungsgebiete von PFTBA sind u.a. Elektroindustrie, Kalibrierung in der Massenspektroskopie, Partikelzähler für Kraftstoff in Flugzeugen und Augenmedizin. Das Unternehmen 3M bestätigte diese Anwendungsgebiete. Die verkauften Mengen werden uns vertraulich mitgeteilt. Die Emissionsrate beträgt 100 %.

In der folgenden Tabelle 24 ist die Emissionsentwicklung der drei Substanzen aggregiert dargestellt.

Tabelle 24: Emissionen der drei stickstoffhaltigen fluorierten Treibhausgase C₉F₂₁N, C₅F₁₁NO und C₁₂F₂₇N in Tonnen und kt CO₂-Äquivalenten 1990-2022

Substanz	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
C ₉ F ₂₁ N, C ₅ F ₁₁ NO, C ₁₂ F ₂₇ N [t]	-	-	0,33	1,46	3,33	5,38	6,43	6,47	6,52
C ₉ F ₂₁ N, C ₅ F ₁₁ NO, C ₁₂ F ₂₇ N [kt CO ₂ -Äq.]	-	-	2,87	13,00	30,15	48,25	57,49	57,80	58,23

2.7 Die zusätzlichen F-Gase für die freiwillige Berichterstattung

Abschließend zeigt sich der sehr hohe Emissionsbeitrag von SO_2F_2 , auf welchen fast die Hälfte der insgesamt 929,49 kt CO_2 -Äquivalente entfallen. Dies hängt mit den drei folgenden Faktoren zusammen: dem hohen GWP von Sulfuryldifluorid von 4.090 (AR5), der großen Verbrauchsmenge sowie dem Emissionsfaktor von 100 %.

Den zweitgrößten Beitrag liefern PFPE mit 227 kt CO_2 -Äquivalenten. Dies hängt mit dem hohen GWP von 9.710 (AR5) für diese Substanzgruppe zusammen.

Die Emissionen der stickstoffhaltigen F-Gase $\text{C}_9\text{F}_{21}\text{N}$ (GWP 8.690 (AR4)), $\text{C}_5\text{F}_{11}\text{NO}$ (GWP 8.800 (REACH-Registrierungsdossier)) und $\text{C}_{12}\text{F}_{27}\text{N}$ (GWP 8.490 (AR6)) betragen insgesamt 55 kt CO_2 -Äquivalente (s. Tabelle 25).

Tabelle 25: Emissionen der vom Umweltbundesamt freiwillig berichteten zusätzlichen F-Gase nach Stoffen im Jahr 2022 in kt CO_2 -Äquivalenten

Anwendung	2022
uHFKW (1234yf, 1234ze, 1233zd)	1,38
Industrielle HFE (offen und geschlossen)	15,11
HFE für Anästhesie	193
PFPE	227
SF_5CF_3	-
SO_2F_2	435
Weitere (N-haltige) FKW	58
Summe [kt CO_2-Äq.]	929,49

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

3 Quellenverzeichnis

Behringer, D., Heydel, F., Gschrey, B., Osterheld, S., Schwarz, W., Warncke, K., Freeling, F., Nödler, K., Henne, S., Reimann, S., Blepp, M., Jörß, W., Liu, R., Ludig, S., Rüdener, I., Gartiser, S. (2021): Persistente Abbauprodukte halogenerter Kälte- und Treibmittel in der Umwelt: Art, Umweltkonzentrationen und Verbleib unter besonderer Berücksichtigung neuer halogenerter Ersatzstoffe mit kleinem Treibhauspotenzial. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, FKZ 3717 41 305 0.

Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (2023a): Online-Datenbank Pflanzenschutzmittel.

https://www.bvl.bund.de/DE/Arbeitsbereiche/04_Pflanzenschutzmittel/01_Aufgaben/02_ZulassungPSM/01_ZugelPSM/01_OnlineDatenbank/psm_onlineDB_node.html?cms_thema=Online+Datenbank (28.11.23).

Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (2023b): Inlandsabsatz und Ausfuhr von Pflanzenschutzmitteln und deren Wirkstoffen.

https://www.bvl.bund.de/DE/Arbeitsbereiche/04_Pflanzenschutzmittel/01_Aufgaben/02_ZulassungPSM/01_ZugelPSM/psm_ZugelPSM_node.html (28.11.23).

Carpenter, L.J., Reimann, S., Burkholder, J.B., Clerbaux, C., Hall, B.D., Hossaini, R., Laube, J.C., Yvon-Lewis, S.A. (2014): Ozone-Depleting Substances (ODSs) and other gases of interest to the Montreal Protocol, Chapter 1 in Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014, Global Ozone Research and Monitoring Project — Report No. 55, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2014.

Environmental Protection Agency (2014): Federal Register, Vol. 79, No. 238, Rules and Regulations.

<https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2014-12-11/pdf/2014-28444.pdf> (31.01.24).

Europäische Kommission, Generaldirektion Klimapolitik (2020): Bericht der Kommission zur Bewertung der Verfügbarkeit von Alternativen zu fluorierten Treibhausgasen in Schaltanlagen und damit zusammenhängenden Geräten, einschließlich sekundärer Mittelspannungsschaltanlagen.

<https://vde.com/resource/blob/2032970/8002fd7f0443f114a27c73e34edeec/bericht-eu-kom-data.pdf> (28.11.23).

Europäische Kommission, Generaldirektion Klimapolitik (2022): REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition.

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_3131 (28.11.23).

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2006a): Verordnung (EG) Nr. 842/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über bestimmte fluorierete Treibhausgase.

<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2006R0842:20081211:de:PDF> (28.11.23).

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2006b): Richtlinie 2006/40/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Emissionen aus Klimaanlageanlagen in Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG des Rates.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A32006L0040> (28.11.23).

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2014): Verordnung (EU) Nr. 517/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014 über fluorierete Treibhausgase und zur Aufhebung

der Verordnung (EG) Nr. 842/2006. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517> (28.11.23).

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2016): Beschluss (EU) 2016/1841 des Rates vom 5. Oktober 2016 über den Abschluss des im Rahmen des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen geschlossenen Übereinkommens von Paris im Namen der Europäischen Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32016D1841> (28.11.23).

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2018): Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32018R1999> (28.11.23).

Forster, P., Storelmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J.-L., Frame, D., Lunt, D.J., Mauritsen, T., Palmer, M.D., Watanabe, M., Wild, M., Zhang, H. (2021): The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 923–1054, DOI: 10.1017/9781009157896.009.

Gschrey, B., Schwarz, W., Kimmel, T., Zeiger, B. (2015): Maßnahmen zur Verbesserung der Marktdurchdringung klimafreundlicher Technologien ohne halogenierte Stoffe vor dem Hintergrund der Revision der Verordnung (EG) Nr. 842/2006. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Forschungskennzahl 3711 43 324.

Langbein, T., Sonntag, H., Trapp, D., Hoffmann, A., Malm, W., Röth, E.-P., Mörs, V., Zellner, R. (1999): Volatile anaesthetics and the atmosphere: Atmospheric lifetimes and atmospheric effects of halothane, enflurane, isoflurane, desflurane and sevoflurane. British Journal of Anaesthesia. Volume 82. Issue 1. P. 66-73. DOI: 10.1093/bja/82.1.66.

Rat der Europäischen Union (2023): Fluorierte Gase und ozonabbauende Stoffe: Rat und Parlament erzielen Einigung. <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/10/05/fluorinated-gases-and-ozone-depleting-substances-council-and-parliament-reach-agreement/pdf> (28.11.23).

REACH-Registrierungsdossier

<https://echa.europa.eu/registration-dossier/-/registered-dossier/10075/5/1> (31.01.24).

Reimann, S., Vollmer, M.K., Brunner, D., Steinbacher, M., Hill, M., Henne, S., Emmenegger, L. (2018): Kontinuierliche Messung von Nicht-CO₂-Treibhausgasen auf dem Jungfrauoch (HALCLIM-2015-18). Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Abteilung Luftfremdstoffe / Umwelttechnik, Dübendorf. <https://www.empa.ch/documents/56101/190047/HALCLIM-6-Schlussbericht/59eb1853-04c6-47f1-9d90-198e201baf40> (31.01.24).

Schwarz, W., Leisewitz, A. (1996): Aktuelle und künftige Emissionen treibhauswirksamer fluoriertes Verbindungen in Deutschland. Umweltbundesamt, Berlin.

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

Schwarz, W. (2013): Modelle für die Inventarerhebung. Modelle zur Ermittlung der Inventardaten für die Emissionsberichterstattung fluoriertes Treibhausgase (HFKW, FKW und SF₆) in ausgewählten Quellgruppen. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M., LeRoy Miller Jr., H., Chen, Z. (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Statistisches Bundesamt (2023): Gesundheit, Fallpauschalenbezogene Krankenhausstatistik (DRG-Statistik). Operationen und Prozeduren der vollstationären Patientinnen und Patienten in Krankenhäusern. Erscheint jährlich. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Gesundheit/Krankenhaeuser/Publikationen/Downloads-Krankenhaeuser/operationen-prozeduren-5231401217014.html> (28.11.23).

Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M.B., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Sulbaek Andersen, M.P., Sander, S.P., Nielsen, O.J., Wagner, D.S., Sanford Jr, T.J., Wallington, T.J. (2010): Inhalation anaesthetics and climate change. *Br. J. Anaesth.* 2010, 105(6), 760–766. DOI: 10.1093/bja/aeq259.

Sulbaek Andersen, M.P., Nielsen, O.J., Wallington, T.J., Karpichev, B., Sander, S.P. (2012): Assessing the impact on global climate from general anesthetic gases. *Anesthesia & Analgesia*, 114 (5), 1081–1085. May 2012. DOI: 10.1213/ANE.0b013e31824d6150.

Umweltbundesamt (2022): Treibhauspotentiale (Global Warming Potential, GWP) ausgewählter Verbindungen und deren Gemische gemäß Viertem (AR4) und Fünftem (AR5) Sachstandsbericht des IPCC bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren. <https://www.umweltbundesamt.de/dokument/treibhauspotentiale-global-warming-potential-gwp> (28.11.23). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (2023a): Containerbegasung mit Sulfuryldifluorid. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw/containerbegasung-sulfuryldifluorid> (28.11.23).

Umweltbundesamt (2023b): PFAS sollen EU-weit beschränkt werden. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/pfas-sollen-eu-weit-beschaenkt-werden> (28.11.23).

Umweltbundesamt (2023c): UBA-Prognose: Treibhausgasemissionen sanken 2022 um 1,9 Prozent. Mehr Kohle und Kraftstoff verbraucht – mehr Erneuerbare und insgesamt reduzierter Energieverbrauch dämpfen Effekte. <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/uba-prognose-treibhausgasemissionen-sanken-2022-um> (28.11.23).

Warncke, K., Schwarz, W., Gschrey, B., Zeiger, B. (2016a): Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland 2014. Daten von HF(C)KW, FKW, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE und PFPME für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für das Berichtsjahr 2014. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Warncke, K., Schwarz, W., Gschrey, B. (2016b): 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. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Projektnummer 66866 (unveröffentlicht).

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. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Projektnummer 83150.

Warncke, K., Osterheld, S., Gschrey, B. (2021a): Inventarermittlung der F-Gase 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. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Projektnummer 108094.

Warncke, K., Gschrey, B. (2021b): 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. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Projektnummer 141272.

Zeiger, B., Gschrey, B., Schwarz, W., Warncke, K., Volmer, R. (2015): Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland 2013, Daten von HF(C)KW, FKW, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE und PFPME für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für das Berichtsjahr 2013. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Projektnummer 40708.

4 Emissionstabellen für 2022 im Vergleich mit 1990, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 und 2021

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

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
Nebenproduktemissionen (2.B.9.a) und herstellungsbedingte Emissionen (2.B.9.b)								
Emissionen HFKW, FKW [t]	382,3	127,6	75,4	29,6	22,5	14,8	5,7	6,9
Emissionen HFKW, FKW [kt CO ₂ -Äq.]	4.669,7	1.277,1	531,7	176,9	58,7	44,9	16,7	23,1
Emissionen SF ₆ [t]	5,0	9,0	10,0	3,8	0,057	0,04	0,04	0,05
Emissionen SF ₆ [kt CO ₂ -Äq.]	117,5	211,5	235,0	88,9	1,3	0,9	1,0	1,1
Summe Emissionen Produktion F-Gase [t]	387,3	136,6	85,4	33,4	22,6	14,8	5,8	6,9
Summe Emissionen Produktion F-Gase [kt CO₂-Äq.]	4.787,2	1.488,6	766,7	265,9	60,0	45,8	17,6	24,3

4.2 Metallproduktion (2C)

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
--	------	------	------	------	------	------	------	------

Aluminiumproduktion (2.C.3)

CF ₄ [t]	335,5	48,0	45,3	17,7	10,7	8,7	7,4	4,4
C ₂ F ₆ [t]	33,6	4,8	4,7	2,1	1,3	1,0	0,9	0,5
Emissionen FKW [t]	369,1	52,8	50,0	19,8	12,0	9,7	8,3	4,9
Emissionen FKW [kt CO ₂ -Äq.]	2.596,8	371,5	352,3	141,0	85,4	69,0	59,0	35,0

Magnesiumproduktion (2.C.4)

HFKW-134a [t]	-	-	0,6	8,3	16,8	5,8	6,6	8,1
Emissionen HFKW [kt CO ₂ -Äq.]	-	-	0,8	10,8	21,8	7,5	8,6	10,5

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

Emissionen SF ₆ [t]	7,4	13,8	30,5	6,5	2,9	2,3	2,2	4,1
Emissionen SF ₆ [kt CO ₂ -Äq.]	174,2	324,4	714,8	151,9	66,9	53,0	51,5	97,0
Summe Emissionen Metallproduktion [t]	376,5	66,6	81,1	34,6	31,7	17,74	17,12	17,12
Summe Emissionen Metallproduktion [kt CO₂-Äq.]	2.771,0	695,9	1.067,9	303,7	174,1	129,5	119,1	142,4

4.3 Elektronikindustrie (2.E)

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
Halbleiter- und Platinenproduktion (2.E.1)								
HFKW-23 [t]	3,40	1,14	1,07	0,80	0,96	0,95	0,99	1,07
Emissionen HFKW [kt CO ₂ -Äq.]	42,16	14,14	13,22	9,88	11,90	11,76	12,33	13,27
C ₂ F ₆ [t]	8,40	13,97	8,85	5,17	4,46	3,52	3,95	3,35
CF ₄ [t]	9,35	20,03	13,54	8,35	8,76	8,90	9,77	9,74
C ₃ F ₈ [t]	0,00	3,22	4,64	2,40	1,83	1,38	1,59	0,42
c-C ₄ F ₈ [t]	0,00	0,05	0,15	0,23	0,56	0,56	0,61	0,54
CH ₂ F ₂					0,06	0,02	0,06	0,14
Emissionen FKW [t]	17,75	37,27	27,17	16,15	15,62	14,35	15,92	14,05
Emissionen FKW [kt CO ₂ -Äq.]	157,17	318,56	232,18	137,86	130,81	117,14	130,13	112,13
Emissionen SF ₆ [t]	3,70	2,47	3,27	0,75	0,86	1,19	1,42	3,47
Emissionen SF ₆ [kt CO ₂ -Äq.]	86,95	58,07	76,89	17,58	20,21	28,00	33,27	81,48
Emissionen NF ₃ [t]	0,40	0,24	0,93	0,45	0,69	0,63	0,85	0,99
Emissionen NF ₃ [kt CO ₂ -Äq.]	6,44	3,88	15,02	7,27	11,13	10,11	13,72	15,97
Emissionen [t]	25,25	41,13	32,44	18,15	18,13	17,12	19,18	19,57
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	292,72	394,66	337,30	172,60	174,05	167,01	189,45	222,85
Photovoltaik (2.E.3)								
Emissionen SF ₆ [t]	-	-	0,9	2,3	-	-	-	0,0008
Emissionen SF ₆ [kt CO ₂ -Äq.]	-	-	19,5	52,3	-	-	-	18,24

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
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]	25,25	41,13	33,61	23,60	18,13	17,12	19,18	20,37
Summe Emissionen Elektronikindustrie [kt CO₂-Äq.]	292,72	394,7	359,1	275,4	174,0	167,0	189,4	241,1

4.4 Anwendung als ODS-Ersatzstoff (2.F)

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
--	------	------	------	------	------	------	------	------

Kälte- und Klimaanlage (2.F.1)

Gewerbekälte (2.F.1.a)

Bestandsemissionen [t]

R-134a	-	176,8	173,1	180,8	167,6	141,3	132,9	124,8
R-404A	-	229,5	419,4	583,4	495,9	185,1	146,6	114,7
R-407C	-	33,8	27,9	27,8	14,2	9,9	8,7	7,7
R-23	-	1,6	2,4	2,0	1,8	1,9	2,0	1,9
R-116	-	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
R-422D	-	-	-	-	-	-	-	-
R-152a	-	10,3	8,5	-	-	-	-	-
R-125	-	70,9	42,4	0,6	0,7	0,3	0,3	0,2
R-449A	-	-	-	-	3,8	41,7	41,9	40,3
R-448A	-	-	-	-	0,2	11,4	11,5	11,4
R-455A	-	-	-	-	-	0,5	0,8	1,1
R-454C	-	-	-	-	-	0,2	0,3	0,4
R-452A - TK	-	-	-	-	-	2,1	2,2	2,3
R-513A	-	-	-	-	-	4,5	5,9	7,1

Entsorgungsemissionen [t]

R-134a	-	43,1	51,5	55,2	51,1	41,3	40,6	39,6
R-404A	-	46,3	34,9	30,4	93,9	75,2	71,7	71,0
R-407C	-	6,5	6,9	8,9	7,3	7,7	8,7	9,6
R-23	-	-	0,3	0,9	0,8	0,7	0,4	0,8
R-116	-	-	-	0,04	0,04	0,1	0,1	0,1
R-218	-	-	3,9	2,6	0,3	0,1	0,0	0,1
R-422D	-	-	-	-	-	-	-	-
R-152a	-	-	3,3	-	-	-	-	-

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
R-125	-	-	42,6	2,6	-	0,2	0,1	0,2
R-449A	-	-	-	-	-	-	-	-
R-448A	-	-	-	-	-	-	-	-
R-455A	-	-	-	-	-	-	-	-
R-454C	-	-	-	-	-	-	-	-
R-452A - TK	-	-	-	-	-	-	-	-
R-513A	-	-	-	-	-	-	-	-

Herstellungsemissionen [t]

R-134a	-	1,7	1,6	1,8	0,8	0,6	0,4	0,8
R-404A	-	3,1	3,9	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0
R-407C	-	0,2	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1
R-23	-	-	-	-	-	-	-	-
R-116	-	-	-	-	-	-	-	-
R-218	-	0,1	-	-	-	-	-	-
R-422D	-	-	-	1,2	-	-	-	-
R-152a	-	-	-	-	-	-	-	-
R-125	-	0,1	-	-	-	-	-	-
R-449A	-	-	-	-	0,5	0,2	0,2	0,5
R-448A	-	-	-	-	0,1	0,0	0,0	0,1
R-455A	-	-	-	-	0,1	0,1	0,1	0,1
R-454C	-	-	-	-	0,1	0,1	0,1	0,1
R-452A - TK	-	-	-	-	-	0,065	0,050	0,036
R-513A	-	-	-	-	0,4	0,3	0,3	0,4
Emissionen [t]	-	648,2	823,3	900,2	841,6	526,1	476,1	434,5
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	1.699,1	2.469,8	2.847,7	2.679,9	1.327,7	1.146,8	1.010,4

Haushaltskälte (2.F.1.b)

Haushaltskühl- und gefriergeräte und Speiseeismaschinen

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
<i>Haushaltskühl- und gefriergeräte</i>								
Bestandsemissionen R-134a [t]	-	1,28	1,34	0,18	0,17	0,11	0,10	0,08
Entsorgungsemissionen R-134a [t]	-	-	-	1,20	1,20	1,02	1,02	1,02
Emissionen [t]	-	1,28	1,34	1,20	1,19	1,13	1,12	1,10
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	1,66	1,74	1,56	1,54	1,47	1,45	1,44
<i>Speiseeismaschinen</i>								
Bestandsemissionen [t]								
R-134a	-	0,02	0,05	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07
R-404A	-	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
Entsorgungsemissionen [t]								
R-134a	-	-	-	-	0,75	0,62	0,62	0,62
R-404A	-	-	-	-	0,19	0,15	0,15	0,15
Emissionen [t]	-	0,03	0,06	0,10	1,04	0,86	0,86	0,85
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	0,05	0,11	0,18	1,90	1,57	1,56	1,55
Summe Haushaltskälte (2.F.1.b)								
Emissionen [t]	-	1,31	1,40	1,30	2,23	1,99	1,97	1,96
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	1,71	1,85	1,74	3,44	3,04	3,01	2,99
Industriekälte (2.F.1.c)								
Bestandsemissionen [t]								
R-134a	-	45,0	49,5	42,2	36,6	30,9	30,9	30,9
R-404A	-	77,5	127,6	160,5	176,1	170,8	171,7	174,5
R-407C	-	19,4	31,9	40,1	44,0	42,7	42,9	43,6
R-23	-	2,9	3,7	3,1	2,3	0,7	0,1	0,1
R-227ea	-	2,3	3,2	1,5	1,0	0,5	0,5	0,4
R-116	-	0,1	0,1	-	-	0,0	0,0	0,0

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
R-422D	-	-	-	34,8	67,6	42,6	36,2	30,1
Entsorgungsemissionen [t]								
R-134a	-	-	18,7	29,6	25,0	20,3	20,3	20,3
R-404A	-	-	6,1	6,5	5,9	14,1	14,0	13,5
R-407C	-	-	1,5	1,6	1,5	3,5	3,5	3,4
R-23	-	-	1,8	1,0	0,9	0,5	2,3	0,1
R-227ea	-	-	0,7	0,9	0,6	0,2	0,3	0,4
R-116	-	-	-	-	-	0,0	0,0	0,0
R-422D	-	-	-	-	-	17,3	17,2	17,6
Herstellungsemissionen [t]								
R-134a	-	1,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
R-404A	-	2,7	1,5	2,3	1,8	1,7	1,6	1,6
R-407C	-	0,7	0,4	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4
R-23	-	-	-	-	-	-	-	-
R-227ea	-	-	-	-	-	-	-	-
R-116	-	-	-	-	-	-	-	-
R-422D	-	-	-	2,8	0,9	0,1	-	-
Emissionen[t]	-	152,1	246,6	320,5	366,3	346,6	342,3	337,2
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	454,1	757,4	867,7	927,5	896,2	914,0	895,9

Transportkälte (2.F.1.d)

Kühlfahrzeuge und Kühlcontainer

Kühlfahrzeuge

Bestandsemissionen [t]								
R-134a	-	13,3	19,1	15,4	11,1	10,8	10,5	10,3
R-404A	-	32,5	45,8	54,9	59,9	37,2	31,0	26,2
R-410A	-	4,1	7,3	8,1	8,4	8,6	8,4	8,6
R-134a Retrofit	-	-	-	-	-	-	-	-

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
R-152a v. R-401B	-	-	-	-	-	-	-	-
R-218 v. R-413A	-	-	-	-	-	-	-	-
R-452A					0,5	24,2	29,1	34,6
Entsorgungsemissionen [t]								
R-134a	-	-	1,8	3,4	2,8	1,5	1,5	1,3
R-404A	-	-	5,5	7,3	9,6	10,9	10,9	8,2
R-410A	-	-	0,8	1,0	1,4	1,8	1,8	1,3
R-134a Retrofit	-	-	0,8	-	0,5	-	-	-
R-152a v. R-401B	-	-	0,1	-	-	-	-	-
R-218 v. R-413A	-	-	0,1	-	-	-	-	-
R-452A					-	-	-	-
Herstellungsemissionen [t]								
R-134a	-	0,019	0,019	0,008	0,009	0,007	0,007	0,007
R-404A	-	0,011	0,012	0,012	0,012	0,002	-	-
R-410A	-	0,003	0,003	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003
R-134a Retrofit	-	-	-	-	-	-	-	-
R-152a v. R-401B	-	-	-	-	-	-	-	-
R-218 v. R-413A	-	-	-	-	-	-	-	-
R-452A	-	-	-	-	0,001	0,011	0,010	0,011
Emissionen [t]	-	50,0	80,4	91,3	93,00	94,95	93,27	90,54
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	153,5	245,7	293,3	308,6	225,7	200,6	169,7

Kühlcontainer

Bestandsemissionen [t]								
R-134a	-	16,7	34,0	50,6	51,5	33,3	32,8	31,5
R-404A	-	1,1	3,9	7,7	9,8	6,1	5,9	5,5
R-513A	-	-	-	-	-	0,15	0,34	0,53
R-452A	-	-	-	-	-	0,08	0,16	0,25

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
Entsorgungsemissionen [t]								
R-134a	-	-	-	8,1	7,8	13,4	15,8	16,6
R-404A	-	-	-	-	1,1	2,2	2,6	2,8
R-513A	-	-	-	-	-	-	-	-
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]	-	17,8	38,0	66,3	70,3	55,3	57,6	57,1
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	26,0	59,7	106,4	120,5	93,7	97,1	95,6
Mobile Klimaanlage (2.F.1.e)								
Pkw, Nutzfahrzeuge, Busse, Landmaschinen, Schienenfahrzeuge, Schiffe, Flugzeuge								
<i>Pkw</i>								
Bestandsemissionen [t]								
R-134a	-	1037,1	1850,2	2196,8	2425,2	1829,9	1716,0	1621,8
Entsorgungsemissionen [t]								
R-134a	-	0,9	2,0	18,1	42,5	33,3	32,9	38,8
Herstellungsemissionen [t]								
R-134a	0,0	14,1	15,9	16,4	17,9	3,08	3,14	3,15
Emissionen [t]	-	1052,0	1868,1	2231,2	2485,6	1866,3	1752,1	1663,8
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	1367,7	2428,5	2900,5	3231,3	2426,2	2277,7	2163,0
<i>Nutzfahrzeuge</i>								
Bestandsemissionen [t]								
R-134a	-	41,2	85,4	133,3	203,2	307,1	330,3	347,1
Entsorgungsemissionen [t]								
R-134a	-	-	-	0,1	0,4	0,6	0,8	0,7

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
Herstellungsemissionen [t]								
R-134a	-	0,6	1,0	1,0	2,0	1,6	1,5	1,4
Emissionen [t]	-	41,8	86,4	134,4	205,5	309,3	332,5	349,2
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	54,4	112,3	174,7	267,2	402,1	432,3	454,0
<i>Busse</i>								
Bestands- und Herstellungsemissionen [t]								
R-134a	-	45,1	69,9	84,5	100,2	107,8	115,4	120,9
Entsorgungsemissionen [t]								
R-134a	-	-	-	-	-	0,02	0,02	0,02
Emissionen [t]	-	45,1	69,9	84,5	100,2	107,8	115,4	120,9
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	58,6	90,8	109,9	130,3	140,2	150,0	157,2
<i>Landmaschinen</i>								
Bestandsemissionen [t]								
R-134a	-	22,2	44,1	61,2	76,5	77,1	76,5	74,8
Entsorgungsemissionen [t]								
R-134a	-	-	4,0	7,2	12,1	12,9	16,3	16,4
Herstellungsemissionen [t]								
R-134a	-	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Emissionen [t]	-	22,4	48,4	68,7	88,9	90,35	93,10	91,58
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	29,1	62,9	89,3	115,5	117,4	121,0	119,1
<i>Schienefahrzeuge</i>								
Bestandsemissionen [t]								
R-134a	-	6,4	12,0	14,7	18,1	22,6	23,5	24,3
Entsorgungsemissionen [t]								
R-134a	-	-	-	-	-	1,6	2,1	2,9

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
Herstellungsemissionen [t]								
R-134a	-	0,1	0,08	0,04	0,07	0,06	0,08	0,07
Emissionen [t]	-	6,5	12,1	14,7	18,2	24,2	25,7	27,3
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	8,4	15,7	19,2	23,7	31,5	33,4	35,5
<i>Schiffe</i>								
Bestandsemissionen [t]								
R-134a	-	5,6	14,7	23,4	19,2	22,8	22,8	20,2
Entsorgungsemissionen [t]								
R-134a	-	-	-	-	-	-	-	-
Herstellungsemissionen [t]								
R-134a	-	0,1	0,2	0,2	0,1	0,08	0,07	0,06
Emissionen [t]	-	5,7	14,9	23,6	19,3	22,9	22,9	20,2
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	7,5	19,4	30,7	25,1	29,7	29,7	26,3
<i>Flugzeuge</i>								
Bestandsemissionen [t]								
R-134a	-	0,2	0,2	0,2	0,21	0,21	0,21	0,20
Emissionen [t]	-	0,2	0,2	0,2	0,21	0,21	0,21	0,20
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	0,3	0,3	0,3	0,27	0,27	0,27	0,27
Summe Mobile Klimaanlage (2.F.1.e)								
Emissionen [t]	-	1.173,8	2.099,9	2.557,4	2.918,0	2.421,0	2.341,9	2.273,3
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	1.525,9	2.729,9	3.324,6	3.793,4	3.147,3	3.044,5	2.955,3

Stationäre Klimaanlage (2.F.1.f)

Kaltwassersätze, Raumklimageräte, Wärmepumpen, WP-Wäschetrockner, Spülmaschinen

Kaltwassersätze

Bestandsemissionen [t]

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
R-134a	-	66,8	84,0	101,4	92,4	71,6	69,4	65,9
R-407C	-	9,0	43,8	74,2	79,7	52,3	47,4	41,7
R-410A	-	0,0	1,8	18,3	40,3	51,2	52,5	52,4
R-513A	-	-	-	-	-	5,9	10,2	15,4
R-515B	-	-	-	-	-	-	-	0,1
R-454B	-	-	-	-	-	-	-	0,1
R-32	-	-	-	-	-	-	0,1	0,4
Entsorgungsemissionen [t]								
R-134a	-	-	4,0	8,0	30,9	24,6	29,8	26,9
R-407C	-	-	-	-	9,1	28,1	33,3	32,9
R-410A	-	-	-	-	-	2,1	5,1	8,4
R-513A	-	-	-	-	-	-	-	-
R-515B	-	-	-	-	-	-	-	-
R-454B	-	-	-	-	-	-	-	-
R-32	-	-	-	-	-	-	-	-
Herstellungsemissionen [t]								
R-134a	-	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
R-407C	-	0,1	0,3	0,3	0,3	0,1	-	-
R-410A	-	0,0	0,0	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2
R-513A	-	-	-	-	-	0,1	0,1	0,2
R-515B	-	-	-	-	-	-	-	-
R-454B	-	-	-	-	-	-	-	-
R-32	-	-	-	-	-	-	-	-
Emissionen [t]	-	76,2	134,1	202,4	253,2	236,3	248,2	244,7
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	102,0	189,7	298,7	383,3	362,3	377,3	368,5

Raumklimageräte

Bestandsemissionen [t]

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
R-407C	-	1,9	46,4	112,4	112,2	38,0	41,8	32,6
R-410A	-	0,0	8,0	44,1	119,4	187,7	194,9	205,2
R-32	-	-	-	-	0,0	27,6	43,4	57,5
Entsorgungsemissionen [t]								
R-407C	-	0,0	0,0	7,4	86,4	69,5	67,6	55,9
R-410A	-	-	-	-	8,9	49,1	55,5	56,6
R-32	-	-	-	-	-	-	-	-
Herstellungsemissionen [t]								
R-407C	-	0,1	0,6	0,6	0,2	0,0	0,0	0,0
R-410A	-	0,0	0,2	0,6	1,2	1,4	1,1	1,4
R-32	-	-	-	-	-	1,1	1,1	1,0
Emissionen [t]	-	1,9	55,1	165,1	328,4	374,4	405,4	410,3
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	3,1	92,0	281,6	572,2	632,9	661,6	650,2

WP-Wäschetrockner

Bestands- und Herstellungsemissionen [t]								
R-134a	-	-	-	0,5	2,8	6,5	7,3	8,0
R-407C	-	-	-	0,1	0,8	1,1	1,1	1,1
Entsorgungsemissionen [t]								
R-134a	-	-	-	-	-	-	-	-
R-407C	-	-	-	-	-	-	-	-
Emissionen [t]	-	-	-	0,7	3,6	7,6	8,4	9,0
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	-	-	0,9	4,9	10,2	11,3	12,1

Wärmepumpen

Bestandsemissionen [t]								
R-134a	-	0,8	1,6	3,6	2,6	3,6	3,8	4,3
R-404A	-	0,2	0,8	3,2	2,1	2,3	2,3	2,2

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
R-407C	-	1,0	4,1	17,3	19,3	22,3	21,6	21,1
R-410A	-	-	0,3	4,1	8,5	20,3	25,6	32,0
R-32					0,6	3,6	5,1	7,8
R-454C					0,0	0,0	0,0	0,2

Entsorgungsemissionen [t]

R-134a	-	-	-	0,5	1,6	1,7	2,9	2,8
R-404A	-	-	-	0,3	0,6	1,5	2,9	3,0
R-407C	-	-	-	0,3	4,9	9,6	22,7	21,9
R-410A	-	-	-	-	0,0	1,7	4,8	5,7
R-32					0,0	0,0	0,0	0,0
R-454C					0,0	0,0	0,0	0,0

Herstellungsemissionen [t]

R-134a	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
R-404A	-	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
R-407C	-	0,1	0,4	1,1	0,6	0,5	0,5	0,3
R-410A	-	-	0,1	0,4	0,6	1,9	2,8	1,7
R-32					0,1	0,5	0,8	0,7
R-454C					0,0	0,0	0,0	0,1
Emissionen [t]	-	1,9	6,7	21,7	41,7	69,8	96,0	104,0
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	3,3	12,2	39,7	74,8	123,9	170,1	182,1

Spülmaschinen mit Wärmepumpenfunktion

Bestands- und Herstellungsemissionen [t]

R-134a	-	-	0,001	0,01	0,01	0,014	0,013	0,012
R-513A	-	-	-	-	-	0,0007	0,0015	0,0023
R-450A	-	-	-	-	-	-	0,0002	0,0007
Entsorgungsemissionen [t]								
R-134a	-	-	-	-	-	-	-	-

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
R-513A	-	-	-	-	-	-	-	-
R-450A	-	-	-	-	-	-	-	-
Emissionen [t]	-	-	0,002	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	-	0,002	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02

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

Emissionen [t]	-	80,0	195,9	389,9	626,9	688,1	758,0	768,0
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	108,4	293,9	621,0	1.035,2	1.129,3	1.220,3	1.213,0

Summe Kälte- und Klimaanlage (2.F.1)

Zwischensumme Emissionen [t]	-	2.123	3.485	4.327	4.918	4.134	4.071	3.963
Zwischensumme Emissionen [kt CO₂-Äq.]	-	3.969	6.558	8.062	8.869	6.823	6.626	6.343

Schaumherstellung (2.F.2)

PU Hart- und Integralschaum

Herstellungs- und Anwendungsemissionen [t]								
HFKW-134a	-	94,9	80,9	45,9	31,6	14,5	11,0	10,7
HFKW-365mfc/245fa	-	0,0	97,9	175,9	346,2	314,7	312,8	304,0
HFKW-227ea	-	0,0	3,8	8,9	14,7	3,0	2,9	2,8
HFKW-41	-	-	-	-	0,2	-	-	-
Emissionen [t]	-	94,9	182,7	230,7	392,7	332,2	326,7	317,5
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	123,4	213,8	262,1	431,8	338,0	331,0	321,5

XPS-Schaum

Herstellungs- und Anwendungsemissionen [t]								
HFKW-134a	-	-	353,0	339,3	287,7	24,5	24,5	24,5
HFKW-152a	-	-	683,5	323,1	222,1	112,0	17,0	17,0
Emissionen [t]	-	-	1036,5	662,4	509,9	136,5	41,5	41,5
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	-	553,2	485,7	404,7	47,2	34,1	34,1

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
--	------	------	------	------	------	------	------	------

PU Montageschaum

Herstellungs- und Anwendungsemissionen [t]

HFKW-134a	-	756,3	392,0	91,4	39,6	12,3	7,7	4,9
HFKW-152a	-	718,8	77,1	34,7	39,6	46,7	58,6	41,4
Emissionen [t]	-	1.475,0	469,1	126,1	79,2	59,0	66,3	46,3
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	1.082,3	520,2	123,6	57,0	22,5	18,1	12,1

Summe Schaumherstellung (2.F.2)

Zwischensumme Emissionen [t]	-	1569,9	1688,2	1019,2	981,8	527,7	434,5	405,3
Zwischensumme Emissionen [kt CO₂-Äq.]	-	1205,7	1287,2	871,3	893,5	407,7	383,2	367,7

Feuerlöschmittel (2.F.3)

Bestandsemissionen [t]

HFKW-227ea	-	0,5	1,8	9,4	15,2	16,6	15,0	14,1
HFKW-236fa	-	-	0,1	1,4	2,9	4,5	4,8	5,1
HFKW-23	-	-	-	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2

Befüllungsemissionen [t]

HFKW-227ea	-	0,08	0,01	0,07	0,07	-	-	-
HFKW-236fa	-	-	0,002	0,008	0,006	0,008	0,008	0,008
HFKW-23	-	-	-	-	-	-	-	-

Entsorgungsemissionen [t]

HFKW-227ea	-	-	-	-	-	7,22	6,03	2,95
HFKW-236fa	-	-	-	-	-	-	0,02	0,13
HFKW-23	-	-	-	-	-	-	-	-

Summe Feuerlöschmittel (2.F.3)

Zwischensumme Emissionen [t]	-	0,6	2,0	11,0	18,3	28,5	26,0	22,5
-------------------------------------	---	------------	------------	-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
Zwischensumme Emissionen [kt CO₂-Äq.]	-	2,0	7,4	44,2	76,7	94,3	91,3	91,0
Aerosole (2.F.4)								
<i>Asthmasprays (MDIs)</i>								
Anwendungsemissionen [t]								
HFKW-227ea	-	36,8	26,4	16,0	15,1	15,3	15,0	15,4
Herstellungs- und Anwendungsemissionen [t]								
HFKW-134a	-	46,9	177,4	202,5	217,0	243,3	247,0	241,6
Emissionen [t]	-	83,7	203,7	218,4	232,1	258,6	262,0	257,0
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	184,2	318,9	316,7	332,7	367,6	371,5	365,8
<i>Andere Aerosole</i>								
Anwendungsemissionen [t]								
HFKW-134a	-	160,0	235,7	174,0	191,7	2,6	8,4	6,7
HFKW-152a	-	10,0	13,3	25,9	7,1	0,00	0,00	1,00
Herstellungsemissionen [t]								
HFKW-134a	-	2,4	2,4	2,6	2,8	0,0	0,1	0,1
HFKW-152a	-	0,2	0,2	0,4	0,1	-	-	-
Emissionen [t]	-	172,6	251,6	202,8	201,8	2,6	8,5	7,8
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	212,5	311,4	233,1	253,9	3,4	11,0	9,0
Summe Aerosole (2.F.4)								
Zwischensumme Emissionen [t]	-	256,2	455,3	421,3	433,9	261,3	270,5	264,8
Zwischensumme Emissionen [kt CO₂-Äq.]	-	396,7	630,3	549,8	586,6	371,0	382,5	374,7
Summe Emissionen Anwendung als ODS-Ersatzstoff [t]	-	3.951	5.632	5.781	6.355	4.954	4.804	4.657

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
Summe Emissionen Anwendung als ODS- Ersatzstoff [kt CO₂-Äq.]	-	5.575	8.486	9.534	10.432	7.703	7.491	7.185

4.5 Sonstige Produktherstellung und -verwendung (2.G)

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
--	------	------	------	------	------	------	------	------

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

Summe Elektrische Betriebsmittel (2.G.1)

Zwischensumme Emissionen [t]	38,1	43,4	27,1	18,7	17,5	9,60	10,08	9,62
Zwischensumme Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	894,5	1020,4	636,1	439,4	410,3	225,6	236,8	226,1

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	4,16	4,16	4,17
Entsorgungsemissionen [t]	-	-	-	-	-	-	-	-
Emissionen SF ₆ [t]	5,21	4,99	4,92	4,13	4,14	4,16	4,16	4,17
Emissionen SF ₆ [kt CO ₂ -Äq.]	118,85	113,78	112,13	94,19	94,47	97,74	97,81	97,88

Isolierglasfenster (2.G.2.c)

SF ₆								
-----------------	--	--	--	--	--	--	--	--

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
Befüllungsemissionen [t]	59,9	28,6	5,7	1,4	-	-	-	-
Bestandsemissionen [t]	9,0	20,4	19,6	16,0	11,4	5,4	3,9	2,6
Entsorgungsemissionen [t]	-	5,6	37,2	75,0	103,0	105,7	87,6	57,5
Emissionen SF ₆ [t]	68,9	54,6	62,6	92,3	114,4	111,1	91,5	60,2
Emissionen SF ₆ [kt CO ₂ -Äq.]	1.618,9	1.282,7	1.469,9	2.169,2	2.688,6	2.611,1	2.151,2	1.413,6

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]	139,6	127,4	75,2	101,9	123,3	119,3	99,7	68,3
Zwischensumme Emissionen [kt CO₂-Äq.]	3.280,3	2.981,1	1.763,9	2.390,1	2.894,9	2.800,0	2.340,2	1.602,7

ORC-Anlagen (2.G.4)

Herstellungs- und Bestandsemissionen [t]

HFKW-245fa	-	-	-	-	8,59	11,97	14,31	16,11
------------	---	---	---	---	------	-------	-------	-------

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
HFKW-365mfc	-	-	-	-	0,85	0,89	0,89	0,89
Solkatherm Galden	-	-	-	-	0,45	0,48	0,48	0,48
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	13,89	16,52	18,05
Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	-	-	0,18	8,23	11,93	14,19	15,50
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	13,89	16,52	18,05
Zwischensumme Emissionen [kt CO ₂ -Äq.]	-	-	0,16	1,01	8,23	11,93	14,19	15,50
Summe Emissionen Sonstige Produktherstellung und -verwendung [t]	177,7	170,8	102,3	120,8	150,4	142,8	126,3	96,0
Summe Emissionen Sonstige Produktherstellung und -verwendung [kt CO₂-Äq.]	4.174,7	4.001,5	2.400,1	2.830,5	3.313,5	3.037,5	2.591,2	1.844,3

4.6 Vertrauliche Daten (2.H.3)

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
Kantenisolieren, Radar, Schweißen, Optische Glasfasern, Sohlen, Medizin- und Kosmetikprodukte, Wärmeüberträger, Lösemittel, Kantenisolierung								
Summe Emissionen Vertrauliche Daten [t]	13,5	34,5	21,6	16,9	12,4	7,4	8,3	8,3
Summe Emissionen Vertrauliche Daten [kt CO₂-Äq.]	292,9	709,6	403,7	293,6	185,2	94,6	119,7	109,8

4.7 Fluorierte Treibhausgase für die freiwillige Berichterstattung

	2000	2005	2010	2015	2017	2020	2021	2022
Gesamtemissionen [t] je Anwendung								
uHFKW (1234yf, 1234ze, 1233zd)	-	-	-	77,1	414,8	1004,6	1164,0	1248,1
Industrielle HFE (offen und geschlossen)	5,1	31,3	43,0	57,7	57,9	57,1	59,3	64,3
HFE für Anästhesie	80,5	117,1	162,9	174,4	179,2	171,8	172,0	172,0
PFPE	16,6	20,0	22,5	22,3	22,1	22,1	22,1	22,1
SF ₅ CF ₃	-	-	-	-	-	-	-	-
SO ₂ F ₂	-	-	47,5	48,2	31,2	205	106,4	106,4
Weitere (N-haltige) FKW	0,3	1,5	3,3	5,6	5,9	6,4	6,5	6,5
Summe Emissionen F-Gase für die freiwillige Berichterstattung [t]	102,5	169,8	279,2	385,3	711,0	1315,6	1578,7	1667,8

4.8 Gesamtemissionen

Gesamt-emissionen [t]	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
HFKW	386	4.080	5.709	5.820	6.404	4.988	4.834	4.691
FKW	388	106	96	42	32	27	27	23
SF ₆	206	209	159	145	151	135	118	91
NF ₃	0	0,24	0,93	3,57	0,69	0,63	0,85	0,99
Freiwillig berichtete Treibhausgase	103	170	279	385	711	1.316	1.579	1.668
Summe [t]	1.083	4.565	6.244	6.396	7.299	6.467	6.558	6.473

Gesamt-emissionen [Mt CO ₂ -Äq.]	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
HFKW	4,71	6,87	9,03	9,73	10,53	7,78	7,54	7,25
FKW	2,76	0,83	0,75	0,33	0,25	0,21	0,21	0,17
SF ₆	4,84	4,88	3,71	3,40	3,53	3,18	2,76	2,13
NF ₃	0,01	0,00	0,02	0,06	0,01	0,01	0,01	0,02
Freiwillig berichtete Treibhausgase	0,0000 1	0,22	0,31	0,58	0,60	1,04	1,04	0,92
Summe [Mt CO₂-Äq.]	12,3	12,8	13,8	14,1	14,9	12,2	11,6	10,5