

TEXTE

74/2026

# Inventarermittlung der F-Gase 2023/2024

Daten von HF(C)KW, FKW, H(C)FE und PFPME für die  
nationale Emissionsberichterstattung gemäß  
Klimarahmenkonvention für die Berichtsjahre 2023 und  
2024

von:

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

**Herausgeber:**

Umweltbundesamt



TEXTE 74/2026

Projektnummer 190465

Abschlussbericht

## **Inventarermittlung der F-Gase 2023/2024**

Daten von HF(C)KW, FKW, H(C)FE und PFPME für die  
nationale Emissionsberichterstattung gemäß  
Klimarahmenkonvention für die Berichtsjahre 2023 und  
2024

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](mailto:buergerservice@uba.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

### Durchführung der Studie:

Öko-Recherche  
Münchener Str. 23a  
60329 Frankfurt

### Abschlussdatum:

November 2025

### Redaktion:

Fachgebiet III 1.4 Stoffbezogene Produktfragen  
Kerstin Martens

### DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8227>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Mai 2026

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

### **Kurzbeschreibung: Inventarermittlung der F-Gase 2023/2024**

Der Bericht präsentiert die Emissionsdaten der fluorierten Treibhausgase HF(C)KW, FKW, H(C)FE und PFP(MI)E (F-Gase) in ausgewählten Quellgruppen für die Jahre 1995-2024 für Deutschland. Die Daten der übrigen F-Gase, nämlich Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>), Stickstofftrifluorid (NF<sub>3</sub>), Trifluormethylschwefelpentafluorid (SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub>) und Sulfuryldifluorid (SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>), sowie weiterer Quellgruppen werden jährlich im Nationalen Inventarbericht (National Inventory Document, NID) veröffentlicht. In einigen Kapiteln finden sich Hinweise auf diese Gase.

In den Jahren 1995 bis 1999 bewegten sich die Emissionen von HFKW und FKW in deren Hauptanwendungsgebieten auf einem hohen, relativ konstanten Niveau. Zwischen 2001 und 2016 war ein merklicher Aufwärtstrend zu verzeichnen. Ab 2017 kam es zu einem deutlichen fortlaufenden Absinken, so dass die Emissionen im Jahr 2024 bei 4.220 t lagen, was 7,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten entspricht. Dieses ist durch die in Kapitel 1 erläuterten F-Gas-Verordnungen zu erklären, welche die Nutzung von F-Gasen einschränken. Damit machen HFKW und FKW etwa 1% der Gesamtemissionen aller Treibhausgase in Deutschland aus, wobei hiervon 98% den HFKW zuzuordnen sind. Diese lagen 2024 bei etwa 649 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (Umweltbundesamt 2025).

Dieser Bericht orientiert sich an der Strukturierung des Nationalen Inventarberichts (NID). 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 SF<sub>6</sub>. Sektor 2.C behandelt die Metallproduktion, wobei die Emissionen aus der Aluminiumproduktion unter 2.C.3 und die Emissionen aus der Magnesiumproduktion unter 2.C.4 aufgeführt sind. 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 Sektor 2.H.3 werden vertrauliche Emissionen verschiedener Sektoren aggregiert berichtet. Darunter fallen die Emissionen aus der Produktion von Halogenkohlenwasserstoffen (2.B.9), der Produktion von Solarzellen mit FKW (2.E.3), aus der Verwendung von FKW als Wärmeüberträger (2.E.4), von HFKW und FKW als Lösemittel (2.F.5), von FKW und SF<sub>6</sub> aus Sportschuhen (2.G.2.d) und von Perfluordecalin in medizinischen und kosmetischen Anwendungen (2.G.2.e). Außerdem finden sich in Sektor 2.H.3 Informationen zu freiwillig berichteten fluorierten Treibhausgasen.

Diese Studie schätzt zusätzlich zu den unter UNFCCC verpflichtend zu berichtenden Stoffen die Verwendungsmengen und Emissionen weiterer F-Gase für die freiwillige Berichterstattung des Umweltbundesamts ab. Es handelt sich dabei um ungesättigte HFKW und HFCKW, Hydro(chlor)fluorether (HFE), perfluorierte Polyether (PFPMIE) und andere fluorierte Verbindungen (PPFE).

In der Unterkategorie Kälte- und Klimaanlage (2.F.1) wurden zahlreiche Aktualisierungen vorgenommen, die auf neuen statistischen Daten und Forschungsergebnissen beruhen und zu veränderten Emissionen fluorierter Treibhausgase (FKW, HFKW) führten. Alle Quellen liegen dem UBA in einem separaten Dokument vor.

Bei steckerfertigen Geräten und Verflüssigungssätzen der Gewerbekälte wurden die Zahlen zu Krankenhäusern, Pflegeheimen, Lebensmittel- und Blumengeschäften sowie Tankstellenshops auf Basis neuer Daten des Statistischen Bundesamtes und des Bundesverbands Freier Tankstellen überarbeitet. In Discountmärkten wurde die durchschnittliche Lebensdauer zentraler Kälteanlagen von 10 auf 12 Jahre verlängert.

Für Tieftemperatur- und HFCKW-22-Umrüstanlagen sowie Industriekälteanlagen erfolgten jährliche Rekalkulationen, da die entsprechenden UStatG-Daten erst im Folgejahr vorliegen. Dadurch änderten sich die Emissionen verschiedener Kältemittel (u. a. HFKW-125, -152a, -23, -227ea). Zudem wurde der Anteil von HFKW-134a in steckerfertigen Industriekühlgeräten ab 2014 angepasst. In Molkereien, Brauereien, Schlachthöfen, Tiefkühlkost- und Schokoladenproduktion sowie Kühlhäusern und Eisbahnen wurden Emissionen ab 2016 neu berechnet, da zunehmend halogenfreie Kältemittel verwendet werden.

In der Transportkälte wurden Kältemittelanteile und Neuzulassungen für 2022/2023 gemäß KBA-Daten aktualisiert. Bei Flugzeugen und Straßenfahrzeugen erfolgten Anpassungen an aktuelle LBA- und Abfallstatistiken.

Die Emissionen aus Pkw-Klimaanlagen wurden rekalkuliert, da ab 2020 bei der Produktion von Pkw in Deutschland nur noch das Kältemittel uHFKW-1234yf genutzt wurde. Für Nutzfahrzeuge wurden Klimaquoten ab 2016 korrigiert.

Im Bereich Schiffsklimaanlagen wurden Produktions- und Betriebszahlen auf Basis neuer Verbands- und Werftdaten überarbeitet; zudem entfielen Entsorgungsemissionen, da Schiffe im Ausland verschrottet werden.

Bei Raumklimageräten wurden neue Marktdaten berücksichtigt und die Lebensdauer von Multi-Split-Systemen von 13 auf 10 Jahre reduziert. Wärmepumpen-Wäschetrockner und Spülmaschinen mit Wärmepumpenfunktion erhielten korrigierte Kältemittelanteile und Füllmengen, unter anderem infolge kommender EU-Vorgaben.

Ergänzend zu diesen Rekalkulationen wurden Inventarverbesserungen in den folgenden Sektoren durchgeführt: Industriekälte (2.F.1.c), Kühlfahrzeuge (2.F.1.d), Isofluran in der Tiermedizin, neue berichtspflichtige Stoffe der aktuellen F-Gas-Verordnung 2024/573 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2024) und HFEs als Wärmeüberträger (alle drei Teil der freiwilligen Berichterstattung). Die Ausführungen finden sich in den entsprechenden Kapiteln dieses Berichts.

#### **Abstract: Inventory of F-Gases 2023/2024**

This report presents the 1995-2024 emission data of fluorinated greenhouse gases H(C)FCs, PFCs, H(C)FE, and PFP(MI)E (F-gases) in selected source categories for Germany. Data on the other F-gases, namely sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>), nitrogen trifluoride (NF<sub>3</sub>), trifluoromethylsulfur pentafluoride (SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub>), and sulfuryl difluoride (SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) and other source categories are published annually in the National Inventory Document (NID). Some chapters contain references to these gases.

Between 1995 and 1999, emissions of HFCs and PFCs in their main areas of application remained at a high, relatively constant level. A clear upward trend was observed between 2001 and 2016. From 2017 onwards, there was a significant and continuous decline, with emissions reaching 4,220 tons in 2024, which corresponds to 7.2 million tons of CO<sub>2</sub> equivalents. This can be explained by the F-gas regulations described in chapter 1 which restrict the use of F-gases. This accounts for about 1% of total greenhouse gas emissions in Germany of which 98% can be attributed to HFCs. In 2024, these emissions amounted to about 649 million tons of CO<sub>2</sub> equivalents (Federal Environment Agency 2025).

This report is structured in line with the National Inventory Document (NID). The NID 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. Sector 2.B illustrates under 2.B.9 the emissions of the production of halogenated

hydrocarbons and SF<sub>6</sub>. Sector 2.C covers the production of metals, where emissions from aluminium production are listed under 2.C.3 and from magnesium production under 2.C.4. Sector 2.E includes emissions from the electronic industry, the following sector 2.F those from applications used as ODS alternatives and sector 2.G covers “Other product manufacture and use”. Confidential emissions of different sectors are reported in aggregated form under sector 2.H.3. This includes emissions from the production of halogenated hydrocarbons, wafer production with PFC (2.E.3), from the use of PFCs as heat transfer fluid (2.E.4), the use of HFCs and PFCs as solvents (2.F.5), PFCs and SF<sub>6</sub> from sport shoes (2.G.2.d) and of perfluorodecalin in medical and cosmetic applications (2.G.2.e). In addition, sector 2.H.3 also contains information on voluntarily reported fluorinated greenhouse gases.

In addition to the substances that must be reported under the UNFCCC, this study estimates the quantities used and emissions of other F-gases for voluntary reporting by the US Environmental Protection Agency. These include unsaturated HFCs and HCFCs, hydro(chlor)fluoroethers (HFEs), perfluorinated polyethers (PFPMIE), and other fluorinated compounds (PPFEs).

Numerous updates were made in the subcategory refrigeration and air conditioning systems (2.F.1) based on new statistical data and research findings, which led to changes in emissions of fluorinated greenhouse gases (HFCs, PFCs). All sources are available to the UBA in a separate document.

For plug-in appliances and condensing units for commercial refrigeration, the figures for hospitals, nursing homes, food and flower shops, and gas station shops were revised based on new data from the Federal Statistical Office and the Federal Association of Independent Gas Stations. In discount stores, the average service life of central refrigeration systems was extended from 10 to 12 years.

Annual recalculations were made for low-temperature and HCFC-22 conversion systems as well as industrial refrigeration systems, as the corresponding statistical data will not be available until the following year. This resulted in changes to the emissions of various refrigerants (including HFC-125, -152a, -23, and -227ea). In addition, the proportion of HFC-134a in plug-in industrial refrigeration equipment was adjusted from 2014 onwards. Emissions from dairies, breweries, slaughterhouses, frozen food and chocolate production, cold stores, and ice rinks were recalculated from 2016 onwards, as halogen-free refrigerants are increasingly being used.

In transport refrigeration, refrigerant proportions and new registrations for 2022/2023 were updated in accordance with KBA data.

For aircraft and road vehicles, adjustments were made to current LBA and waste statistics; from 2020 onwards, only the refrigerant HFO-1234yf will be used in the production of passenger cars in Germany. Air conditioning quotas for commercial vehicles have been corrected from 2016 onwards.

In the field of marine air conditioning systems, production and operating figures have been revised on the basis of new association and shipyard data; in addition, disposal emissions have been eliminated, as ships are scrapped abroad.

For room air conditioners, new market data was taken into account and the service life of multi-split systems was reduced from 13 to 10 years. Heat pump clothes dryers and dishwashers with heat pump function received corrected refrigerant proportions and fill quantities, partly as a result of upcoming EU requirements.

In addition to these recalculations, inventory improvements were carried out in the following sectors: Industrial refrigeration (2.F.1.c), refrigerated vehicles (2.F.1.d), isoflurane in veterinary medicine, new substances subject to reporting under the current F-Gas Regulation 2024/573

(European Parliament and Council of the European Union 2024), and HFEs as heat transfer fluids (all three part of voluntary reporting). The details can be found in the relevant chapters of this report.



1.5	Sonstige Produktherstellung und -verwendung (2.G) .....	48
1.5.1	FKW aus sonstiger Produktverwendung (2.G.2) Adiabatische Anwendungen – Sportschuhe (2.G.2.d) .....	48
1.5.2	Sonstige: medizinische und kosmetische Anwendungen (2.G.2.e) .....	48
1.5.3	ORC-Anlagen (2.G.4) .....	48
1.6	Andere Bereiche (2.H.3) .....	49
2	Fluorierte Treibhausgase für die freiwillige Berichterstattung .....	50
2.1	Perfluor-2-methylpentan - FKW-4-1-14 (R-41-14) .....	50
2.2	Ungesättigte teil(chlor)fluorierte Kohlenwasserstoffe .....	51
2.2.1	Inventarverbesserung: Neue ungesättigte teil(chlor)fluorierte Kohlenwasserstoffe .....	54
2.2.1.1	cis-1-Chlor-2,3,3,3-Tetrafluorprop-1-en (uHFCKW-1224yd(Z)) .....	54
2.2.1.2	1,1-Difluorethen (uHFCKW-1132) .....	55
2.2.1.3	2-Chlor-3,3,3-Trifluorprop-1-en (uHFCKW-1233xf) .....	56
2.3	Teilfluorierte Ether (HFE) .....	56
2.3.1	HFE in der Industrie .....	56
2.3.1.1	Offene Anwendungen in der Industrie .....	56
2.3.1.2	Geschlossene Anwendungen in der Halbleiter- und sonstigen Industrie .....	57
2.3.1.3	Inventarverbesserung HFE-Wärmeüberträger .....	57
2.3.2	HFE als Narkosegase in der Medizin .....	58
2.3.2.1	Humanmedizin .....	58
2.3.2.2	Inventarverbesserung HFE-Narkosegase in der Tiermedizin .....	59
2.4	Perfluorierte Polyether (PFPE) .....	62
2.4.1	Mengen von PFPE .....	62
2.4.2	Verwendung in ORC-Anlagen .....	62
2.4.3	Wärmeüberträger in der Halbleiterindustrie .....	62
2.4.4	Dampfphasen-Reflow-Löten von Leiterplatten mit PPFMIE (Perfluorpolymethylisopropylether) .....	62
2.4.5	Lösemittel in Schmierstoffen .....	63
2.4.6	Zusammenfassung der PFPE-Emissionen in Deutschland .....	63
2.5	Weitere stickstoffhaltige fluorierte Treibhausgase .....	63
2.5.1	Inventarverbesserung: Neue Gase .....	63
2.6	Übersicht der Emissionen der zusätzlichen F-Gase für die freiwillige Berichterstattung .....	66
3	Quellenverzeichnis .....	67
A	Emissionstabellen von HFKW und FKW für 2024 im Vergleich mit 1990, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 und 2023 .....	71

A.1	Metallproduktion (2C).....	71
A.2	Elektronikindustrie (2.E).....	71
A.3	Anwendung als ODS-Ersatzstoff (2.F) .....	72
A.4	Sonstige Produktherstellung und -verwendung (2.G) .....	86
A.5	Vertrauliche Daten von HFKW, FKW und SF <sub>6</sub> (2.H.3) .....	87
A.6	Fluorierte Treibhausgase für die freiwillige Berichterstattung.....	87
A.7	Gesamtemissionen.....	87

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Emissionen von HFKW und FKW in Mio. t CO <sub>2</sub> -Äquivalenten (1990-2024) .....	16
Abbildung 2:	Emissions of HFCs and PFCs in million tons of CO <sub>2</sub> equivalents (1990-2024) .....	19
Abbildung 3:	Anteile der klimawirksamen Emissionen von HFKW und FKW bezogen auf CO <sub>2</sub> -Äquivalente nach Sektoren in Deutschland 2024 (%).....	25
Abbildung 4:	Anteile der Subsektoren von 2.F an den HFKW-Emissionen in metrischen Tonnen in Deutschland im Jahr 2024 (%).....	30
Abbildung 5:	Anteile der Emissionen der verschiedenen Subsektoren im Sektor Kälte- und Klimaanlage in metrischen Tonnen in Deutschland im Jahr 2024 (%).....	31
Abbildung 6:	Anteile der Emissionen der verschiedenen Subsektoren im Sektor Kälte- und Klimaanlage in CO <sub>2</sub> -Äquivalenten in Deutschland im Jahr 2024 (%).....	32

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Emissionen von HFKW und FKW [t] 1995-2024 .....	22
Tabelle 2:	Emissionen von HFKW und FKW [Mio. t CO <sub>2</sub> -Äquivalente] 1995-2024.....	22
Tabelle 3:	F-Gas-Quellgruppen und Gase .....	23
Tabelle 4:	Emissionen von HFKW und FKW aus der Metallproduktion [t] 1995-2024.....	26
Tabelle 5:	Emissionen von HFKW und FKW aus der Metallproduktion [kt CO <sub>2</sub> -Äquivalente] 1995-2024.....	26
Tabelle 6:	HFKW-Emissionen [Mio. t CO <sub>2</sub> -Äquivalente] 1995-2024.....	30
Tabelle 7:	Kältemittelanteile bei steckerfertigen Geräten in der Industriekälte [%] 2013-2024 .....	33
Tabelle 8:	Kältemittelanteile in Neuanlagen in der Großkälte der Industriekälte [%] 2016-2024 .....	34
Tabelle 9:	Kältemittelraten (kg/kW).....	36
Tabelle 10:	Emissionsfaktoren, Restfüllstand und Rückgewinnungsrate in Prozent im Jahr 2024.....	37
Tabelle 11:	Anzahl der in Deutschland produzierten Kreuzfahrtschiffe 1997-2024.....	39
Tabelle 12:	Kältemittelanteile von Kühlfahrzeugen [%] 2022-2024 .....	41
Tabelle 13:	Kältemittelanteile in neuen Wärmepumpen-Wäschetrocknern [%] 2014-2024 .....	45
Tabelle 14:	Anteile von R-1234yf und R-1234ze in Kältemittelmischungen [%].....	52

Tabelle 15:	Emissionen ungesättigter HFKW in Tonnen und kt CO <sub>2</sub> -Äquivalenten 2012, 2015, 2017, 2022-2024 .....	53
Tabelle 16:	Emissionen von HFE (-7100, -7200, -7300, -7500) aus offenen industriellen Anwendungen [kt CO <sub>2</sub> -Äquivalente] 2000-2024.	57
Tabelle 17:	Wärmeübertragung: HFE-Emissionen in der Halbleiter- und sonstigen Industrie [kt CO <sub>2</sub> -Äquivalente] 2000-2024.....	57
Tabelle 18:	Anteile Narkosemittel [%] 2018-2024 .....	58
Tabelle 19:	Chemische und ökologische Kenndaten der fünf halogenierten Narkosegase .....	58
Tabelle 20:	Emissionen der halogenierten Narkosegase in Deutschland [t] 1990-2024 unter Einbeziehung ihrer Metabolisierungsraten..	59
Tabelle 21:	Emissionen der halogenierten Narkosegase in Deutschland [kt CO <sub>2</sub> -Äquivalente] 1990-2024 – ohne Halothan.....	59
Tabelle 22:	PFPE-Emissionen aus Wärmeübertragung, Dampfphasen-Reflow-Löten, Schmierstoffen und ORC-Anlagen in Tonnen und kt CO <sub>2</sub> -Äquivalenten 1990-2024.....	63
Tabelle 23:	Emissionen der drei stickstoffhaltigen fluorierten Treibhausgase C <sub>9</sub> F <sub>21</sub> N, C <sub>5</sub> F <sub>11</sub> NO und C <sub>12</sub> F <sub>27</sub> N in Tonnen und kt CO <sub>2</sub> -Äquivalenten 1990-2024.....	63
Tabelle 24:	Mengen Erstbefüllung HFKW-227ea 2015-2024 in t.....	65
Tabelle 25:	Emissionen der vom Umweltbundesamt freiwillig berichteten zusätzlichen F-Gase nach Stoffen im Jahr 2024 [kt CO <sub>2</sub> -Äquivalente]* .....	66

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
<b>2019 Refinements</b>	2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Überarbeitung der IPCC-GL)
<b>a</b>	Jahr
<b>AC</b>	Air Conditioning (Klimatisierung)
<b>AR4</b>	Fourth IPCC Assessment Report (4. IPCC Sachstandsbericht)
<b>AR5</b>	Fifth IPCC Assessment Report (5. IPCC Sachstandsbericht)
<b>AR6</b>	Sixth IPCC Assessment Report (6. IPCC Sachstandsbericht)
<b>AWACS</b>	Airborne Early Warning and Control System (im Flugzeug befindliches Radarsystem)
<b>CF<sub>4</sub></b>	Tetrafluormethan
<b>C<sub>2</sub>F<sub>6</sub></b>	Hexafluorethan
<b>ChemKlimaschutzV</b>	Chemikalien-Klimaschutzverordnung
<b>EF</b>	Emissionsfaktor
<b>F-Gase</b>	Fluorierte Treibhausgase
<b>F-Gas-Verordnung</b>	Verordnung (EU) 573/2024 über fluorierte Treibhausgase
<b>FKW</b>	Vollhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
<b>FCKW</b>	Vollhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe
<b>GWP</b>	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
<b>HFCKW</b>	Teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe
<b>HFE</b>	Hydrofluorether
<b>HFKW</b>	Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
<b>HFO</b>	Hydrofluorolefine (ungesättigte HFKW)
<b>IPCC</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)
<b>IPCC-GL</b>	Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines (IPCC-Richtlinien)
<b>KBA</b>	Kraftfahrt-Bundesamt
<b>kt</b>	Kilotonne
<b>LBA</b>	Luftfahrt-Bundesamt
<b>MAC</b>	Mobile Air Conditioning (mobile Klimatisierung)
<b>MAC-Richtlinie</b>	Richtlinie 2006/40/EG über Emissionen aus Klimaanlage in Kraftfahrzeugen
<b>Mio.</b>	Millionen
<b>NF<sub>3</sub></b>	Stickstofftrifluorid
<b>NID</b>	National Inventory Document (Nationaler Inventarbericht)

Abkürzung	Erläuterung
ODP	Ozone Depleting Potential (Ozonzerstörungspotenzial)
ODS	Ozone Depleting Substances (ozonzerstörende Substanzen)
ORC	Organic Rankine Cycle (Organischer Rankine-Zyklus)
PFAS	Per- and Poly Fluorinated Alkyl Substances (per- und polyfluorierte Alkylverbindungen)
PFPE	Perfluorpolyether
PFPMIE	Perfluorpolymethylisopropylether
PFTBA	Perfluortributylamin
PU	Polyurethan
PV-Industrie	Photovoltaik-Industrie
REACH-Verordnung	Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe
SF <sub>5</sub> CF <sub>3</sub>	Trifluormethylschwefelpentafluorid
SF <sub>6</sub>	Schwefelhexafluorid
SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	Sulfuryldifluorid
SUV	Sports Utility Vehicle (Geländelimosinen)
t	Tonne
TEAP	Technology and Economic Assessment Panel (UN Gremium für Technologie- und Wirtschaftsbewertung)
UBA	Umweltbundesamt
uHF(C)KW	Ungesättigte teilhalogenierte (chlorierte) 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)
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

## Zusammenfassung

Gemäß der Verpflichtung der Bundesrepublik Deutschland als Vertragsstaat der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (United Nations Framework Convention on Climate and Climate Change (UNFCCC)) erfolgt eine jährliche Übermittlung von Emissionsdaten von Treibhausgasen sowie der zu ihrer Berechnung verwendeten Basisdaten und Methoden.

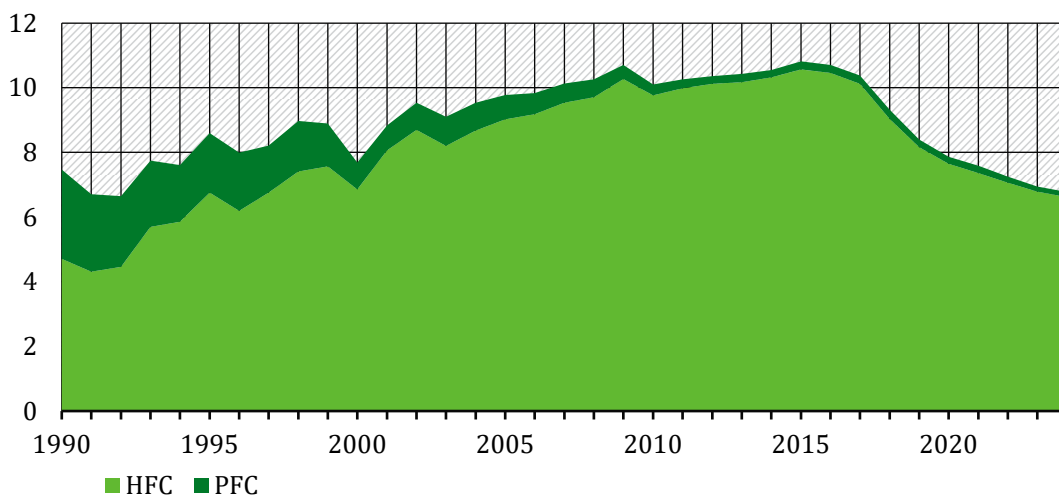
Die Berichterstattungspflichten für Annex-I-Länder, zu denen auch Deutschland gehört, sind in den UNFCCC Annex I Reporting Guidelines definiert. Für die Ermittlung der Daten und datenbezogenen Informationen wurden durch das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines erstellt. Die Emissionsberichterstattung hat den Qualitätskriterien zu entsprechen, die in den 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories dargelegt sind. Die Anforderungen an die Berichterstattung sind dabei wie folgt definiert: Transparenz, Konsistenz, Vergleichbarkeit, Vollständigkeit und Genauigkeit.

In Übereinstimmung mit den internationalen Klimaschutzabkommen ist Deutschland nach der Verordnung (EU) 2018/1999 über das Governance-System für die Energieunion und zum Klimaschutz (Governance-Verordnung 2018) verpflichtet, der Europäischen Kommission jährlich Berichte über Treibhausgasemissionen vorzulegen. Auch die Berichterstattung über fluorierte Treibhausgase (F-Gase) ist in der Verordnung (EU) 2024/573 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2024) vorgeschrieben

Dieser Bericht präsentiert die Emissionsdaten der fluorierten Treibhausgase HF(C)KW, FKW, H(C)FE und PFPME (F-Gase) in ausgewählten Quellgruppen für die Jahre 1995-2024 für Deutschland.

In den Jahren 1995 bis 1999 bewegten sich die Emissionen von HFKW und FKW auf einem hohen, relativ konstanten Niveau (s. Abbildung 1). Zwischen 2001 und 2016 war ein merklicher Aufwärtstrend zu verzeichnen. Ab 2017 kam es zu einem deutlichen Abwärtstrend. Dieser setzte sich fort, so dass die Emissionen im Jahr 2024 bei 4.220 t lagen, was 7,2 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten entspricht. Damit machen sie etwa 1% der Gesamtemissionen aller Treibhausgase in Deutschland aus. Diese lagen 2024 bei etwa 649 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (Umweltbundesamt 2025).

**Abbildung 1: Emissionen von HFKW und FKW in Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (1990-2024)**



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Dieser Bericht orientiert sich an der Strukturierung des Nationalen Inventarberichts (NID). 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 SF<sub>6</sub>. Sektor 2.C behandelt die Metallproduktion. Hier werden unter 2.C.3 die Emissionen der Aluminiumproduktion und unter 2.C.4 die Emissionen aus der 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 Sektor 2.H.3 werden vertrauliche Emissionen verschiedener Sektoren aggregiert berichtet. Darunter fallen die Emissionen aus der Produktion von fluorierten Gasen (2.B.9), der Produktion von Solarzellen mit FKW (2.E.3), aus der Verwendung von FKW als Wärmeüberträger (2.E.4), von HFKW und FKW als Lösemittel (2.F.5), von FKW und SF<sub>6</sub> aus Sportschuhen (2.G.2.d) und von Perfluordecalin in medizinischen und kosmetischen Anwendungen (2.G.2.e). Außerdem finden sich in Sektor 3.H.3 Informationen zu freiwillig berichteten fluorierten Treibhausgasen.

Die für die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Äquivalente in diesem Bericht herangezogenen GWP-Werte stammen aus dem Fünften IPCC-Sachstandsbericht (Stocker et al. 2013), da sie gemäß dem Übereinkommen von Paris (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2016) ab dem Berichtsjahr 2021 unter UNFCCC verpflichtend anzuwenden sind.

Im Nationalen Inventarbericht befindet sich der erste Teil zu den Emissionen von fluorierten Treibhausgasen im Kapitel 2.B.9. „Chemische Industrie, Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF<sub>6</sub>“. Diese Emissionen sind, mit Ausnahme der SF<sub>6</sub>-Emissionen, vertraulich und werden daher aggregiert unter 2.H.3 berichtet.

Im Sektor Metallproduktion (2.C.3, 2.C.4) bewegen sich die Emissionen von FKW und HFKW im Jahr 2024 bei ca. 17,3 Tonnen, was ca. 91,4 kt CO<sub>2</sub>-Äquivalenten entspricht. Auch in diesem Sektor sinken die Emissionen stetig.

Für den Sektor Elektronik-Industrie (2.E) stellt dieser Bericht die Emissionen von FKW aus dem Bereich Wärmeüberträger dar. Die in diesem Bericht erfassten Emissionen bewegen sich auf stabilem Niveau. Die Emissionen aus dem Einsatz von FKW bei der Produktion von Solarzellen (2.E.3) sind vertraulich und werden daher aggregiert unter 2.H.3 berichtet.

Den größten Anwendungsbereich fluorierter Gase bilden die ODS-Ersatzstoffe (2.F) mit Emissionen in Höhe von 4.220 metrischen Tonnen im Jahr 2024. Für den Sektor 2.F enthält dieser Bericht alle Kältemittelanwendungen in stationären und mobilen Kälte- und Klimaanlageanlagen sowie Treibmittel für Schäume und Aerosole, Feuerlöschmittel und Lösemittel (letztere werden unter 2.H.3 berichtet). Da in zahlreichen Kälte- und Klimaanlageanlagen seit vielen Jahren auf Alternativen zu Stoffen mit hohem GWP umgestiegen wird, ist der Bereich 2.F verantwortlich für den starken Rückgang der Gesamt-F-Gas-Emissionen.

Unter der Quellgruppe 2.G berichten wir Emissionen aus Sportschuhen (2.G.2.d), aus medizinischen und kosmetischen Anwendungen (2.G.2.e) und aus ORC-Anlagen (2.G.4).

Neben den unter UNFCCC verpflichtend zu berichtenden Stoffen werden in diesem Bericht 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), die drei stickstoffhaltigen perfluorierten Substanzen C<sub>9</sub>F<sub>21</sub>N (Fluorinert FC-3283), C<sub>5</sub>F<sub>11</sub>NO (Fluorinert FC-3284) und C<sub>12</sub>F<sub>27</sub>N (Fluorinert FC-43, Perfluortributylamin (PFTBA)).

In der Unterkategorie Kälte- und Klimaanlage (2.F.1) wurden zahlreiche Aktualisierungen vorgenommen, die auf neuen statistischen Daten und Forschungsergebnissen beruhen und zu veränderten Emissionen fluorierter Treibhausgase (FKW, HFKW) führten. Alle Quellen liegen dem UBA in einem separaten Dokument vor.

Bei steckerfertigen Geräten und Verflüssigungssätzen der Gewerbekälte wurden die Zahlen zu Krankenhäusern, Pflegeheimen, Lebensmittel- und Blumengeschäften sowie Tankstellenshops auf Basis neuer Daten des Statistischen Bundesamtes und des Bundesverbands Freier Tankstellen überarbeitet. In Discountmärkten wurde die durchschnittliche Lebensdauer zentraler Kälteanlagen von 10 auf 12 Jahre verlängert.

Für Tieftemperatur- und HFCKW-22-Umrüstanlagen sowie Industriekälteanlagen erfolgten jährliche Rekalkulationen, da die entsprechenden UStatG-Daten erst im Folgejahr vorliegen. Dadurch änderten sich die Emissionen verschiedener Kältemittel (u. a. HFKW-125, -152a, -23, -227ea). Zudem wurde der Anteil von HFKW-134a in steckerfertigen Industriekühlgeräten ab 2014 angepasst. In Molkereien, Brauereien, Schlachthöfen, Tiefkühlkost- und Schokoladenproduktion sowie Kühlhäusern und Eisbahnen wurden Emissionen ab 2016 neu berechnet, da zunehmend halogenfreie Kältemittel verwendet werden.

In der Transportkälte wurden Kältemittelanteile und Neuzulassungen für 2022/2023 gemäß Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) aktualisiert.

Bei Flugzeugen und Straßenfahrzeugen erfolgten Anpassungen an aktuelle Luftfahrt-Bundesamt (LBA)- und Abfallstatistiken.

Die Emissionen aus Pkw-Klimaanlagen wurden rekalkuliert, da ab 2020 bei der Produktion von Pkw in Deutschland nur noch das Kältemittel uHFKW-1234yf genutzt wird. Für Nutzfahrzeuge wurden die Klimaquoten ab 2016 korrigiert.

Im Bereich Schiffsklimaanlagen wurden Produktions- und Betriebszahlen auf Basis neuer Verbands- und Werftdaten überarbeitet; zudem entfielen Entsorgungsemissionen, da Schiffe im Ausland verschrottet werden.

Bei Raumklimageräten wurden neue Marktdaten berücksichtigt und die Lebensdauer von Multi-Split-Systemen von 13 auf 10 Jahre reduziert. Wärmepumpen-Wäschetrockner und Spülmaschinen mit Wärmepumpenfunktion erhielten korrigierte Kältemittelanteile und Füllmengen, unter anderem infolge kommender EU-Vorgaben.

Ergänzend zu diesen Rekalkulationen wurden Inventarverbesserungen in den folgenden Sektoren durchgeführt: Industriekälte (2.F.1.c), Kühlfahrzeuge (2.F.1.d), Isofluran in der Tiermedizin, neue berichtspflichtige Stoffe der aktuellen F-Gas-Verordnung 2024/573 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2024) und HFEs als Wärmeüberträger (alle drei Teil der freiwilligen Berichterstattung). Die Ausführungen finden sich in den entsprechenden Kapiteln dieses Berichts.

## Summary

In accordance with the obligation of the Federal Republic of Germany as a signatory to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), greenhouse gas emission data and the basic data and methods used to calculate them are submitted annually.

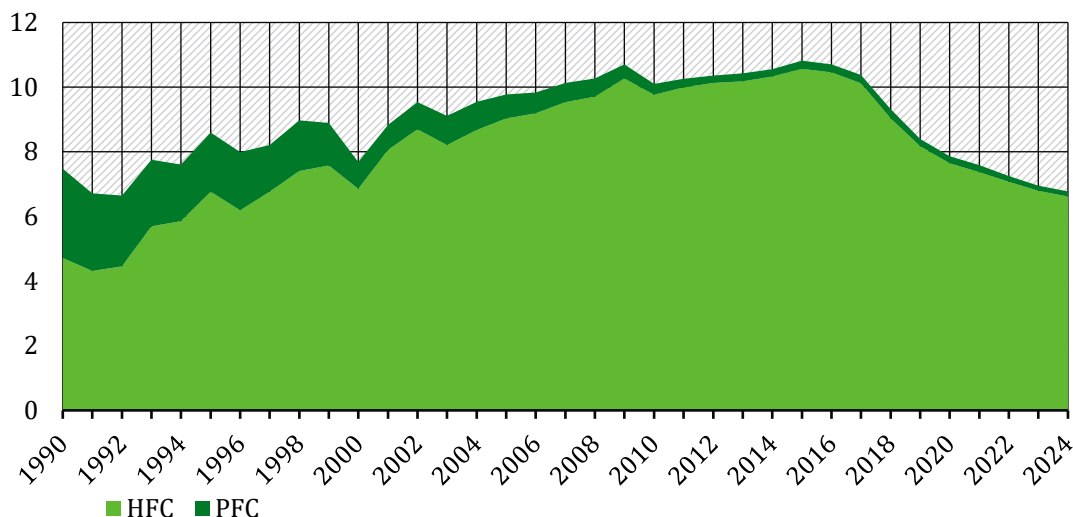
The reporting obligations for Annex I countries, which include Germany, are defined in the UNFCCC Annex I Reporting Guidelines. Guidelines for determining the data and data-related information have been drawn up by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Emissions reporting must meet the quality criteria set out in the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. The reporting requirements are defined as follows: transparency, consistency, comparability, completeness, and accuracy.

In accordance with international climate protection agreements, Germany is obliged under Regulation (EU) 2018/1999 on the Governance System for the Energy Union and Climate Action (Governance Regulation, 2018) to submit annual reports on greenhouse gas emissions to the European Commission. Reporting on fluorinated greenhouse gases (F-gases) is also required by Regulation (EU) 2024/573 (European Parliament and Council of the European Union 2024).

This report presents the emission data for the fluorinated greenhouse gases H(C)FC, PFC, H(C)FE, and PFPMIE (F-gases) in selected source groups for Germany for the years 1995-2024.

Between 1995 and 1999, emissions of HFCs and PFCs remained at a high, relatively constant level (see Abbildung 2). Between 2001 and 2016, there was an upward trend. From 2017 onwards, there was a significant downward trend. This continued, with emissions reaching 4,220 tons in 2024, which corresponds to 7.2 million tons of CO<sub>2</sub> equivalents. This represents about 1% of total greenhouse gas emissions in Germany. In 2024, these emissions amounted to about 649 million tons of CO<sub>2</sub> equivalents (Federal Environment Agency 2025).

**Abbildung 2: Emissions of HFCs and PFCs in million tons of CO<sub>2</sub> equivalents (1990-2024)**



Source: Own representation, Öko-Recherche

This report is structured in line with the National Inventory Report (NID). This report, which covers all greenhouse gases, deals with fluorinated greenhouse gases in sections 2.B, 2.C, 2.E, 2.F, 2.G, and 2.H. Sector 2.B deals with emissions from the production of halogenated hydrocarbons and SF<sub>6</sub> in 2.B.9. Sector 2.C deals with metal production. Emissions from aluminum production are listed under 2.C.3 and those from magnesium production are listed under 2.C.4. Sector 2.E covers emissions from the electronics industry, the following sector 2.F covers emissions from

applications as ODS substitutes, and sector 2.G covers “Other product manufacturing and use.” Sector 2.H.3 reports aggregated confidential emissions from various sectors. These include emissions from the manufacture of fluorinated gases (2.B.9), production of solar cells with HFCs (2.E.3), from use of HFCs as heat transfer fluids (2.E.4), HFCs and PFCs used as solvents (2.F.5), PFCs and SF<sub>6</sub> from sports shoes (2.G.2.d), and from perfluorodecalin in medical and cosmetic applications (2.G.2.e). In addition, sector 2.H.3 includes information on voluntarily reported fluorinated greenhouse gases.

The GWP values used to calculate CO<sub>2</sub> equivalents in this report are taken from the Fifth IPCC Assessment Report (Stocker et al. 2013), as they are mandatory under the UNFCCC from the 2021 reporting year onwards in accordance with the Paris Agreement (European Parliament and Council of the European Union 2016).

The first part on fluorinated greenhouse gas emissions in the National Inventory Document can be found in Chapter 2.B.9, “Chemical Industry, Production of Halogenated Hydrocarbons and SF<sub>6</sub>.” With the exception of SF<sub>6</sub> emissions, these emissions are confidential and are therefore reported in aggregate form under 2.H.3.

In the metal production sector (2.C.3; 2.C.4), emissions of HFCs and PFCs in 2024 amounted to approx. 17.3 metric tons, which corresponds to approx. 91.4 kt CO<sub>2</sub> equivalents. Emissions also fall steadily in this sector.

For the electronics industry sector (2.E), this report presents emissions of PFCs from the heat exchanger sector. The emissions recorded in this report remain at a stable level. Emissions from the use of HFCs in the production of solar cells (2.E.3) are confidential and are therefore reported in aggregate form under 2.H.3.

The largest area of application for fluorinated gases is ODS substitutes (2.F), with emissions of 4,220 metric tons in 2024. For sector 2.F, this report includes all refrigerant applications in stationary and mobile refrigeration and air conditioning systems, as well as propellants for foams and aerosols. As many refrigeration and air conditioning applications have been switching to alternatives to substances with high GWP for many years, sector 2.F is responsible for the sharp decline in total F-gas emissions.

Under source group 2.G, we report emissions from sport shoes (2.G.2.d), medical and cosmetic applications (2.G.2.e) and ORC systems (2.G.4).

In addition to the substances that must be reported under the UNFCCC, this report estimates the quantities used and emissions of other F-gases for voluntary reporting by the German Environment Agency. These include uHFC and uHCFC, hydrofluoroethers (HFE) and hydrochlorofluoroethers (HCFE), perfluoropolyether (PFPE), the three nitrogen-containing perfluorinated substances C<sub>9</sub>F<sub>21</sub>N (Fluorinert FC-3283), C<sub>5</sub>F<sub>11</sub>NO (Fluorinert FC-3284) and C<sub>12</sub>F<sub>27</sub>N (Fluorinert FC-43, perfluorotributylamine (PFTBA)).

Numerous updates were made in the subcategory refrigeration and air conditioning systems (2.F.1) based on new statistical data and research findings, which led to changes in emissions of fluorinated greenhouse gases (HFCs, PFCs). All sources are available to the UBA in a separate document.

For plug-in appliances and condensing units for commercial refrigeration, the figures for hospitals, nursing homes, food and flower shops, and gas station shops were revised based on new data from the Federal Statistical Office and the Federal Association of Independent Gas Stations. In discount stores, the average service life of central refrigeration systems was extended from 10 to 12 years.

Annual recalculations were made for low-temperature and HCFC-22 conversion systems as well as industrial refrigeration systems, as the corresponding statistical data will not be available until the following year. This resulted in changes to the emissions of various refrigerants (including HFC-125, -152a, -23, and -227ea). In addition, the proportion of HFC-134a in plug-in industrial refrigeration equipment was adjusted from 2014 onwards. Emissions from dairies, breweries, slaughterhouses, frozen food and chocolate production, cold stores, and ice rinks were recalculated from 2016 onwards, as halogen-free refrigerants are increasingly being used.

In transport refrigeration, refrigerant proportions and new registrations for 2022/2023 were updated in accordance with data from the Kraftfahrt-Bundesamt (KBA).

For aircraft and road vehicles, adjustments were made to current Luftfahrt-Bundesamt (LBA) and waste statistics; from 2020 onwards, only the refrigerant HFO-1234yf will be used in the production of passenger cars in Germany. Air conditioning quotas for commercial vehicles have been corrected from 2016 onwards.

In the field of marine air conditioning systems, production and operating figures have been revised on the basis of new association and shipyard data; in addition, disposal emissions have been eliminated, as ships are scrapped abroad.

For room air conditioners, new market data was taken into account and the service life of multi-split systems was reduced from 13 to 10 years. Heat pump clothes dryers and dishwashers with heat pump function received corrected refrigerant proportions and fill quantities, partly as a result of upcoming EU requirements.

In addition to these recalculations, inventory improvements were carried out in the following sectors: Industrial refrigeration (2.F.1.c), refrigerated vehicles (2.F.1.d), isoflurane in veterinary medicine, new substances subject to reporting under the current F-Gas Regulation 2024/573 (European Parliament and Council of the European Union 2024), and HFEs as heat transfer fluids (all three part of voluntary reporting). The details can be found in the relevant chapters of this report.

## 1 Die Emissionen von HFKW und FKW von 1995 bis 2024

Dieser Bericht präsentiert Emissionsabschätzungen für HFKW, FKW, H(C)FE und PFP(MI)E in Deutschland. Die Emissionen der anderen F-Gase, nämlich Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>), Stickstofftrifluorid (NF<sub>3</sub>), Trifluormethylschwefelpentafluorid (SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub>) und Sulfuryldifluorid (SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>), wobei mengenmäßig vor allem SF<sub>6</sub> und SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> relevant sind, werden im Nationalen Inventarbericht (NID) veröffentlicht. Eine Übersicht findet sich in Tabelle 3.

Die Emissionen von HFKW und FKW sind seit ihrer Einführung Anfang der 1990er Jahre relativ konstant angestiegen. Seit 2017 ist allerdings ein deutlicher Rückgang der Emissionen sichtbar. Im Berichtsjahr 2023 sanken sie auf 4.332 t, was dem CO<sub>2</sub>-Äquivalent von 6,95 Mio. t entspricht. Dieser Trend setzte sich in Bezug auf die metrischen Tonnen fort, so dass auch im Jahr 2024 ein deutlicher Rückgang der Emissionen auf 4.220 t zu beobachten ist. Allerdings sind die Emissionen in t CO<sub>2</sub>-Äquivalente gestiegen und zwar auf 7,2 Mio. (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2). Grund hierfür ist die gestiegene Nutzungsmenge von FKW mit hohem GWP im Bereich Metallproduktion (siehe Kapitel 1.2)

**Tabelle 1: Emissionen von HFKW und FKW [t] 1995-2024**

	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
HFKW	3.111	4.074	5.708	5.830	6.416	4.871	4.312	4.190
FKW	255,35	106,14	96,06	42,27	32,06	28,39	19,86	30,11
<b>Insgesamt</b>	<b>3.366</b>	<b>4.180</b>	<b>5.804</b>	<b>5.872</b>	<b>6.448</b>	<b>4.899</b>	<b>4.332</b>	<b>4.220</b>

**Tabelle 2: Emissionen von HFKW und FKW [Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente] 1995-2024**

	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
HFKW	4,71	6,85	9,03	9,77	10,57	7,65	6,79	6,97
FKW	2,76	0,83	0,75	0,33	0,25	0,22	0,16	0,23
<b>Insgesamt</b>	<b>7,47</b>	<b>7,68</b>	<b>9,78</b>	<b>10,10</b>	<b>10,82</b>	<b>7,87</b>	<b>6,95</b>	<b>7,20</b>

Tabelle 2 zeigt, dass die klimawirksamen Emissionen von HFKW und FKW von 1998 bis zum Jahr 2015 leicht ansteigen im Bereich von ca. 9-11 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten. Ein deutlicher Rückgang der Emissionen lässt sich seit 2017 verzeichnen. Dieser ist auf die Regelungen der aktuellen EU F-Gas-Verordnung (EU) Nr. 2024/573 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2024), der Vorgänger-Fassung (EU) Nr. 517/2014 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014) sowie der ersten EU F-Gas-Verordnung (EG) Nr. 842/2006 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2006a) zurückzuführen.

Die klimawirksamen Emissionen von **HFKW** sind 2024 im Vergleich zum Vorjahr um 0,1 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente gesunken. Dieser Effekt kann durch den steigenden Einsatz natürlicher Kältemittel in fast allen Bereichen von Kälte- und Klimaanlage erklärt werden.

Seit dem Jahr 2017 sind die HFKW-Emissionen rückläufig, besonders in den letzten beiden Jahren. Bewirkt wurde diese Reduzierung vor allem durch die Regelungen der zweiten EU F-Gas-Verordnung (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014), die unter anderem den HFKW-Phase-down und Verbote der Verwendung und des Inverkehrbringens von F-Gasen enthielt.

**FKW**-Emissionen sinken seit 1995, stiegen aber im Jahr 2024 an und lagen bei 30 t (2023: 20 t), bzw. 0,23 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente.

**Tabelle 3: F-Gas-Quellgruppen und Gase**

Quellgruppe	Unterquellgruppe	Berichtspflichtige Gase*	Freiwillig berichtete Gase	Gegenstand dieses Berichts
2.B: Chemische Industrie	2.B.9: Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF <sub>6</sub>	Siehe 2.B.9.a+b		
	2.B.9.a: Nebenprodukteemissionen	HFKW	-	HFKW
	2.B.9.b: Herstellungsbedingte Emissionen	HFKW, SF <sub>6</sub>	-	HFKW, SF <sub>6</sub> unter 2.H.3**
2.C: Metallproduktion	2.C.3a: Herstellung von Primäraluminium	FKW	-	FKW
	2.C.3b: Aluminiumguss	SF <sub>6</sub>	-	-
	2.C.4: Magnesiumproduktion	HFKW, SF <sub>6</sub>	-	HFKW
2.E: Elektronik-Industrie	2.E.1: Halbleiter- und Platinenproduktion	HFKW, FKW, SF <sub>6</sub> , NF <sub>3</sub>	-	HFKW, FKW
	2.E.2: TFT-Produktion	Keine Produktion in Deutschland		
	2.E.3: Photovoltaik	FKW, SF <sub>6</sub> , NF <sub>3</sub>	-	Keine Produktion mehr in Deutschland
	2.E.4: Verwendung als Wärmeüberträger	FKW	PFPE	FKW unter 2.H.3, PFPE
2.F: Anwendungen als ODS-Ersatzstoff	2.F.1.a: Gewerbekälte	HFKW, FKW	uHFKW	HFKW, FKW, uHFKW
	2.F.1.b: Haushaltskälte	HFKW	-	HFKW
	2.F.1.c: Industriekälte	HFKW, FKW	-	HFKW
	2.F.1.d: Transportkälte (Kühlfahrzeuge und -container)	HFKW	uHFKW	HFKW, uHFKW
	2.F.1.e: Mobile Klimaanlage (Pkw, Busse, Nutzfahrzeuge, Landmaschinen, Schiffe, Schienenfahrzeuge, mittelgroße Flugzeuge und Hubschrauber)	HFKW	uHFKW	HFKW, uHFKW
	2.F.1.f: Stationäre Klimaanlage	HFKW	uHFKW	HFKW, uHFKW

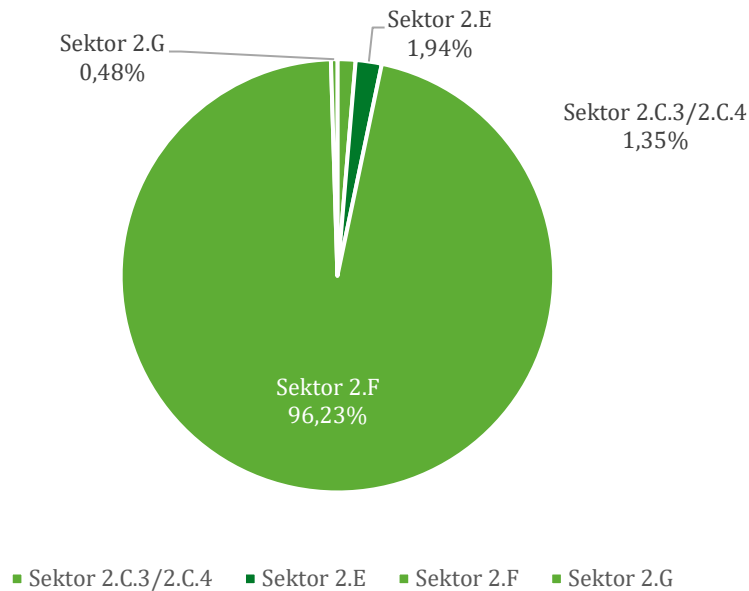
Quellgruppe	Unterquellgruppe	Berichtspflichtige Gase*	Freiwillig berichtete Gase	Gegenstand dieses Berichts
	2.F.2: Schaumherstellung (PU-Hartschaum, XPS-Schaum, PU-Integralschaum, PU-Montageschaum)	HFKW	uHFKW	HFKW, uHFKW
	2.F.3: Feuerlöschmittel	HFKW	-	HFKW
	2.F.4: Aerosole	HFKW	uHFKW	HFKW, uHFKW
	2.F.5: Lösemittel	HFKW, FKW	PFPE	HFKW, FKW, beide unter 2.H.3, PFPE
2.G: Sonstige Produktherstellung und -verwendung	2.G:1: Elektrische Betriebsmittel	SF <sub>6</sub>	-	-
	2.G.2.a: Militär - AWACS	SF <sub>6</sub>	-	Unter 2.H.3
	2.G.2.b: Teilchenbeschleuniger	SF <sub>6</sub>	-	-
	2.G.2.c: Isolierglasfenster	SF <sub>6</sub>	-	-
	2.G.2.d: Sportschuhe	SF <sub>6</sub>	-	Unter 2.H.3
	2.G.2.d: Adiabatische Anwendungen – Autoreifen und Sportschuhe	FKW, SF <sub>6</sub>	-	Unter 2.H.3
	2.G.2.e: Sonstige: Spurengas, Schweißen, optische Glasfasern, medizinische und kosmetische Anwendungen	FKW, SF <sub>6</sub>	-	Unter 2.H.3
	2.G.4: ORC-Anlagen	HFKW, FKW	uHFKW	HFKW, FKW, uHFKW
2.H: Andere Produktionen – Andere Bereiche	2.H.3: Vertraulich zu berichtende Daten: Chemische Produktion (2.B.9), Photovoltaik (2.E.3), Wärmeüberträger (2.E.4), Lösemittel (2.F.5), Flugzeugradaranlagen, Sportschuhsohlen, optische Glasfasern, Schweißen und Medizin- und Kosmetikprodukte (2.G.2)	Siehe Quellgruppen		

\*Natürliche Kältemittel wie Propan oder Ammoniak sind nicht berichtspflichtig und werden daher in dieser Tabelle nicht aufgeführt.

\*\* Emissionen von SF<sub>6</sub> werden unter 2.H.3 in Teilen mitberichtet, damit die Vertraulichkeit der gesamten unter 2.H.3 berichteten Daten sichergestellt ist.

Abbildung 3 stellt die Anteile der klimawirksamen HFKW und FKW -Emissionen dar, basierend auf der Strukturierung des Nationalen Inventarberichts (NID). Dieser Bericht umfasst alle Treibhausgase, also auch die drei mit den größten Anteilen – CO<sub>2</sub>, Methan und Lachgas. Die für die F-Gase relevanten Sektor-Abschnitte sind 2.B, 2.C, 2.E, 2.F, 2.G und 2.H. Diese enthalten Informationen zu folgenden Anwendungsbereichen von F-Gasen:

**Abbildung 3: Anteile der klimawirksamen Emissionen von HFKW und FKW bezogen auf CO<sub>2</sub>-Äquivalente nach Sektoren in Deutschland 2024 (%)**



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Abbildung 3 zeigt deutlich, dass der bei weitem größte Anteil der Gesamtemissionen von HFKW und FKW aus Sektor 2.F stammt. Der weitaus größte Anteil (90%) aus diesem Sektor emittiert wiederum aus Kälte- und Klimaanlageanlagen.

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

In der chemischen Industrie werden Emissionen fluorierter Treibhausgase bei der Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF<sub>6</sub> freigesetzt. In diesem Bericht sind die HFKW-Emissionen dieses Sektors enthalten. Da sie der Vertraulichkeit unterliegen, werden sie in der Kategorie 2.H.3 berichtet.

## 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. In diesem Bericht werden die HFKW-Emissionen aus der Magnesiumproduktion und die FKW-Emissionen aus der Herstellung von Primäraluminium dargestellt.

**Tabelle 4: Emissionen von HFKW und FKW aus der Metallproduktion [t] 1995-2024**

	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
Primäraluminiumproduktion								
FKW: CF <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	230,0	52,8	50,0	19,8	12,0	9,7	2,2	11,8
Magnesiumproduktion								
HFKW- 134a	-	-	0,6	8,3	16,8	5,8	8,0	5,5
<b>Insgesamt</b>	<b>230</b>	<b>52,8</b>	<b>50,6</b>	<b>28,1</b>	<b>28,8</b>	<b>15,5</b>	<b>10,2</b>	<b>17,4</b>

**Tabelle 5: Emissionen von HFKW und FKW aus der Metallproduktion [kt CO<sub>2</sub>-Äquivalente] 1995-2024**

	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
Primäraluminiumproduktion								
FKW: CF <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	1.618,8	371,5	352,3	141,0	85,4	69,0	15,3	84,2
Magnesiumproduktion								
HFKW- 134a	-	-	0,8	10,8	21,8	7,5	10,4	7,2
<b>Insgesamt</b>	<b>1.618,8</b>	<b>371,5</b>	<b>353,1</b>	<b>151,8</b>	<b>107,2</b>	<b>76,5</b>	<b>25,8</b>	<b>91,4</b>

### 1.2.1 Primäraluminiumproduktion (2.C.3)

Im Jahr 1997 gingen die Produzenten von Primäraluminium eine freiwillige Verpflichtung ein, ihre Emissionen unter das Niveau der ursprünglichen Emissionen von 1995 zu reduzieren. Die Ofendosierung (Zufuhr von Aluminiumoxid zur Schmelze) wurde modernisiert, wodurch fünf deutsche Hütten ihre spezifischen FKW-Emissionen pro Tonne Aluminium senken konnten und das Ziel rasch erreicht wurde. Bis 2005 blieb die Produktionskapazität unverändert, während

die FKW-Emissionen in diesem Zeitraum von 230 Tonnen im Jahr 1995 auf 50 Tonnen im Jahr 2005 sanken.

Im Jahr 2007 wurden vier Hütten in Betrieb genommen, die im selben Jahr etwa 550.000 Tonnen Primäraluminium produzierten. Zu diesem Zeitpunkt lagen die FKW-Emissionen mit 29 Tonnen auf einem historischen Tiefstand. Seitdem sind die Emissionen von CF<sub>4</sub> und C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> weiter gesunken und lagen im Jahr 2023 bei 2,2 metrischen Tonnen. Im Jahr 2024 stiegen die Emissionen wieder an auf 11,8 metrische Tonnen.

### **1.2.2 Magnesiumproduktion (2.C.4)**

Die Verwendungsmengen des HFKW-134a haben im Jahr 2016 mit 42,7 metrischen Tonnen ihren Höchststand erreicht. Der Verbrauch ist allerdings seit 2019 deutlich zurück gegangen und lag 2024 nur noch bei 11 t.

Die im Jahr 2006 publizierten IPCC-Richtlinien enthalten keine Angaben zum Emissionsfaktor für die Verwendung des HFKW-134a. In der damaligen Analyse wurde daher ein Emissionsfaktor von 100% angenommen. Der Emissionsfaktor wurde aufgrund neuer Informationen für die gesamte Zeitreihe rückwirkend auf 50% festgelegt, beginnend mit dem Berichtsjahr 2018. Um präzisere Informationen zu diesem Thema zu erhalten, sei auf Kapitel 2.1 des Inventarberichts von F-Gasen 2017/2018 (Warncke et al. 2021a) verwiesen.

Der Einsatz von HFKW-134a in der Magnesiumproduktion ist politisch intendiert, da es das stark klimaschädigende Gas SF<sub>6</sub> (GWP 23.500) ersetzt, dessen Verwendung in Druckguss-Betrieben mit einem jährlichen Schutzgasverbrauch von über 850 kg seit dem 1.1.2008 durch die erste EU-F-Gas-Verordnung (EG) Nr. 842/2006 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2006a) verboten wurde. Gemäß der früheren EU-F-Gas-Verordnung (EU) Nr. 517/2014 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014) wurde der Ausstieg aus SF<sub>6</sub> ab 2020 auch für alle übrigen Druckgießereien obligatorisch.

## **1.3 Elektronikindustrie (2.E)**

Die Elektronikindustrie umfasst in der nationalen Berichterstattung die Bereiche Halbleiter- und Platinenproduktion (2.E.1), TFT-Produktion (2.E.2), Herstellung photovoltaischer Zellen (2.E.3) sowie Verwendung als Wärmeüberträger (2.E.4). Neben HFKW und FKW finden in der Elektronikindustrie ebenfalls die fluorierten Gase SF<sub>6</sub> und NF<sub>3</sub> Anwendung, die für diesen Bericht nicht berücksichtigt werden. In Deutschland, wie auch in ganz Europa, werden derzeit keine Flachbildschirme (TFT) produziert. Der Bereich der auf Silizium-Dünnschichttechnologie basierenden Photovoltaik (PV) ist ebenfalls ohne Bedeutung, seit diese Industrie im Jahr 2010 eine Krise erlitt. Als Folge wurde im Jahr 2014 die gesamte Produktion in Deutschland eingestellt. In diesem Bericht werden die FKW-Emissionen im Bereich Wärmeüberträger näher betrachtet.

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

Informationen zur Halbleiter- und Platinenproduktion in Deutschland finden sich im Nationalen Inventarbericht (NID). Dort sind auch die Emissionen aller in diesem Bereich eingesetzten F-Gase zu finden. Die bei der Halbleiter- und Platinenproduktion auftretenden HFKW- und FKW-Emissionen sind ebenfalls im Anhang aufgeführt.

### **1.3.2 Photovoltaik (2.E.3)**

Dieser Anwendungsbereich wird für diesen Bericht nicht näher betrachtet. Die Methodik zur Berechnung der Emissionen ist im Nationalen Inventarbericht (NID) veröffentlicht, ebenso die

Emissionen aller F-Gase dieses Anwendungsbereichs. Die Emissionen von Perfluormethan (CF<sub>4</sub>), das bis 2012 zum Kantenisolieren kristalliner Solarzellen eingesetzt wurde, sind aggregiert mit anderen vertraulichen Emissionen unter 2.H.3 im Anhang aufgeführt.

### 1.3.3 Wärmeüberträger (2.E.4)

Fluorierte Flüssigkeiten spielen in der Industrie, vor allem in der Halbleiterproduktion, eine wichtige Rolle als Wärmeüberträger zur Kühlung von Prozessen und Geräten. Die einzelnen Schritte des Fertigungsprozesses müssen bei eindeutig festgelegten und überwachten Temperaturen vollzogen werden.

In der Halbleiterindustrie werden verschiedene Arten von fluorierten Wärmeübertragern eingesetzt. Allerdings sind nur vollfluorierte Kohlenwasserstoffe im engeren Sinne berichtspflichtig unter UNFCCC. Es geht dabei vor allem um Perfluorhexan (C<sub>6</sub>F<sub>14</sub>, Fluorinert TM FC-72). C<sub>6</sub>F<sub>14</sub> wurde in der Halbleiterindustrie in den 1990er Jahren häufig als Wärmeüberträger eingesetzt, die Nutzung jedoch bis 2016 vollständig eingestellt. Zurzeit sind teilfluorierte Ether (HFE) die dominierenden fluorierten Wärmeüberträger in der Halbleiterindustrie, und sie haben seit 2001 die perfluorierten Substanzen ersetzt (die Verwendung der HFE wird im Kapitel 2.3.3 behandelt). Die Anwendung fluorierte Substanzen als Wärmeüberträger finden in geschlossenen Systemen statt, so dass die Leckageraten unserer Einschätzung zufolge etwa 5% betragen.

Bis vor einigen Jahren verwendete die Deutsche Bahn C<sub>6</sub>F<sub>14</sub> (Perfluorhexan) auch in Hochgeschwindigkeitszügen, und zwar insbesondere zur Kühlung der Traktionsstromrichter in den Triebköpfen des ICE-1 und ICE-2. Dieser Stoff wurde bis 2009 vollständig durch C<sub>5</sub>F<sub>11</sub>NO (Fluorinert FC-3284, Perfluor-N-Methylmorpholin; GWP: 9.500) ersetzt. Diese vollfluorierte, stickstoffhaltige Substanz ist weder unter UNFCCC, noch der Unternehmensberichterstattung gemäß EU F-Gas-Verordnung (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2024) berichtspflichtig. Der in der Halbleiterindustrie verwendete Stoff C<sub>9</sub>F<sub>21</sub>N (Fluorinert FC-3283, Perfluor-Tri-N-Butylamin; GWP: 8.690) ist ebenfalls nicht berichtspflichtig. Die beiden als Wärmeüberträger genutzten Stoffe sind in den freiwillig in das F-Gas-Inventar aufgenommenen „weiteren“ fluorierten Treibhausgasen enthalten (siehe Anhang).

## 1.4 Anwendungen als ODS-Ersatzstoffe (2.F)

In Deutschland ist die Verwendung von Substanzen, die die Ozonschicht schädigen (Ozone Depleting Substances, ODS), größtenteils verboten, abgesehen von wenigen geregelten Ausnahmen. F-Gase wurden seit den 1990er Jahren als Alternativen zu ODS eingeführt und stellen deren Hauptanwendungsbereich dar. Seitdem wurden auch andere nicht-fluorierte Substanzen in einigen Anwendungen eingeführt, und ihre Verwendung variiert je nach Marktanteil. Wie bereits erläutert, ist die Verwendung von F-Gasen gesetzlichen Bestimmungen unterworfen, die ihren Einsatz einschränken oder untersagen. Dies gilt insbesondere für die EU-F-Gas-Verordnung (EU) 2024/573 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2024). Die überarbeitete Verordnung sieht einen vollständigen Ausstieg aus der Produktion und dem Verbrauch von HFKW in Europa bis 2036 bzw. 2050 vor.

Dieser Bericht beschreibt die Emissionen aus den Quellgruppen 2.F.1 Kälte- und Klimaanlage, 2.F.2 Schaumherstellung, 2.F.3 Feuerlöschmitteln, 2.F.4 Aerosole. Die Emissionen aus den Sektor Lösemittel (2.F.5) werden unter 2.H.3 aggregiert berichtet, da sie der Vertraulichkeit unterliegen.

HFKW wurden von der Chemieindustrie vor Jahrzehnten als Alternative zu ozonschichtschädigenden Substanzen eingeführt. Sie schaden zwar der Ozonschicht nicht, haben jedoch einen Treibhauseffekt. Anwendung finden HFKW hauptsächlich als Kältemittel in Kälte- und Klimaanlage, als Treibmittel in der Schaumherstellung, als Feuerlöschmittel und als Treibgas in Dosieraerosolen (vor allem in Asthmasprays).

Tabelle 6 zeigt die HFKW-Emissionen aus unterschiedlichen Anwendungen im Zeitraum von 1995 bis 2024. Im Jahr 2024 ist ein Rückgang gegenüber dem Vorjahr in nahezu allen Bereichen zu verzeichnen.

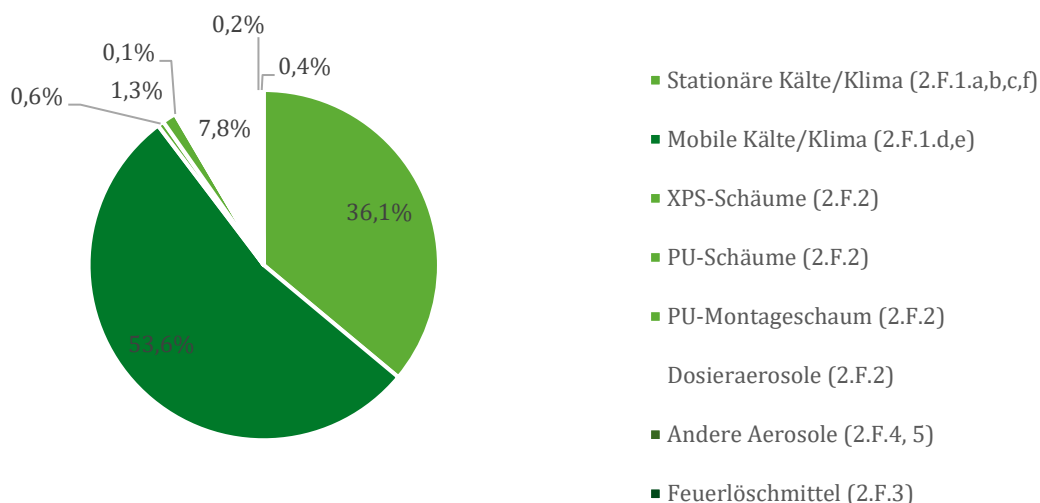
Die Zahlen sind abgesehen von den steigenden Emissionen von Dosieraerosolen in den meisten kleineren HFKW-Sektoren rückläufig. Auch im Bereich der XPS-Schäume sind geringere F-Gas Emissionen zu verzeichnen.

Die Anteile der unterschiedlichen Sektoren an den HFKW-Emissionen in Tonnen sind in Abbildung 4 dargestellt. Sie illustriert nicht nur grafisch den erheblichen Beitrag der Klima- und Kälteanwendungen zu den gesamten HFKW-Emissionen, sondern betont auch im Vergleich zu den Emissionsdaten in Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten in Tabelle 6, dass die Emissionen aus der stationären Kälte in Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalenten einen deutlich höheren Anteil an den Gesamtemissionen haben als in metrischen Tonnen. Dies lässt sich durch den hohen Anteil von R-404A mit seinem GWP von 3.943 (AR5) im Bestand in der Gewerbekälte erklären.

**Tabelle 6: HFKW-Emissionen [Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente] 1995-2024**

	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
Gesamt Stationäre Kälte/Klima	0,234	2,248	3,518	4,382	4,698	3,357	3,068	3,283
<i>Gewerbe, Industrie, Haushaltskälte</i>	0,221	2,140	3,224	3,759	3,655	2,272	1,861	2,005
<i>Zentral-AC, Raumklima, Wärmepumpen</i>	0,013	0,108	0,294	0,623	1,042	1,085	1,207	1,278
Gesamt Mobile Kälte/Klima	0,306	1,705	3,035	3,724	4,222	3,463	3,071	3,021
<i>Mobilklima Pkw</i>	0,223	1,368	2,429	2,901	3,231	2,422	2,013	1,906
XPS-Schäume	-	-	0,553	0,486	0,405	0,047	0,032	0,032
PU-Schäume	-	0,123	0,199	0,241	0,376	0,203	0,049	0,050
PU-Montageschaum	1,533	1,082	0,520	0,124	0,057	0,022	0,004	0,003
Dosieraerosole	-	0,184	0,319	0,317	0,333	0,368	0,452	0,452
Andere Aerosole	0,205	0,214	0,314	0,237	0,256	0,002	0,008	0,013
Feuerlöschmittel	-	0,002	0,008	0,037	0,063	0,086	0,059	0,057
<b>Insgesamt</b>	<b>2,278</b>	<b>5,558</b>	<b>8,466</b>	<b>9,548</b>	<b>10,410</b>	<b>7,548</b>	<b>6,743</b>	<b>6,912</b>

**Abbildung 4: Anteile der Subsektoren von 2.F an den HFKW-Emissionen in metrischen Tonnen in Deutschland im Jahr 2024 (%)**



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

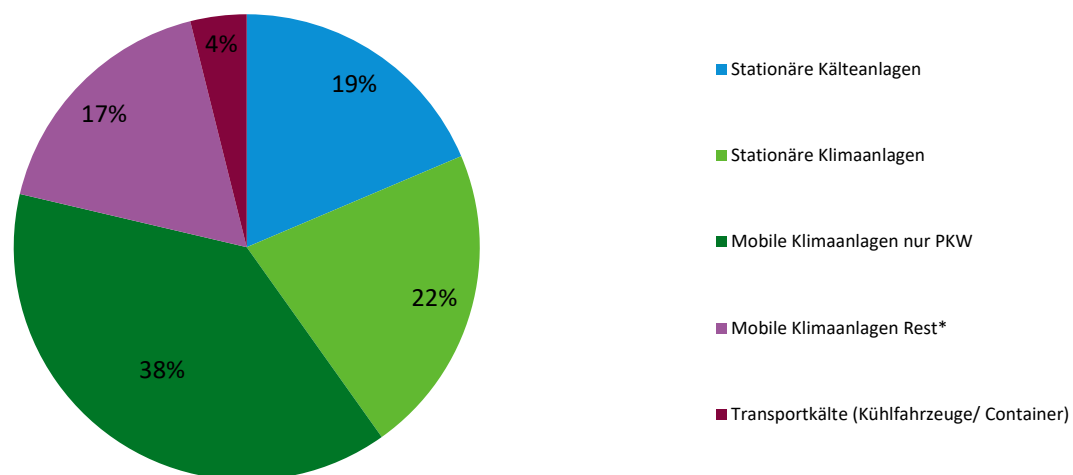
Die EU F-Gas-Verordnung aus dem Jahr 2014 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014) hat beträchtliche Wirkung gezeigt, insbesondere was den Rückgang von HFKW-Emissionen aus dem Betrieb von stationären Kälte- und Klimaanlage betrifft. Grund hierfür ist der sogenannten „Phase-down“, eine stufenweise Einschränkung des Angebots an

HFKW mit hohem GWP zugunsten einer umfassenden Etablierung von HFKW-freien Substanzen und Verfahren bzw. HFKW mit geringerem GWP. Die verringerten Emissionen sind aber auch auf Verwendungsverbote der Verordnung in einzelnen Sektoren zurückzuführen. Die revidierte Fassung dieser Verordnung, Verordnung (EU) 2024/573, beschränkt die Nutzung von F-Gasen weiter und enthält nicht nur, wie erwähnt, einen „Phase-out“, sondern weitere Verwendungsverbote, sowohl für Neuanlagen als auch für die Wartung von Bestandsanlagen mit bestimmten Kältemitteln.

#### 1.4.1 Kälte- und Klimaanlage (2.F.1)

Den größten Sektor als Emissionsquelle von fluorierten Treibhausgasen bilden Kälte- und Klimaanlage.

**Abbildung 5: Anteile der Emissionen der verschiedenen Subsektoren im Sektor Kälte- und Klimaanlage in metrischen Tonnen in Deutschland im Jahr 2024 (%)**



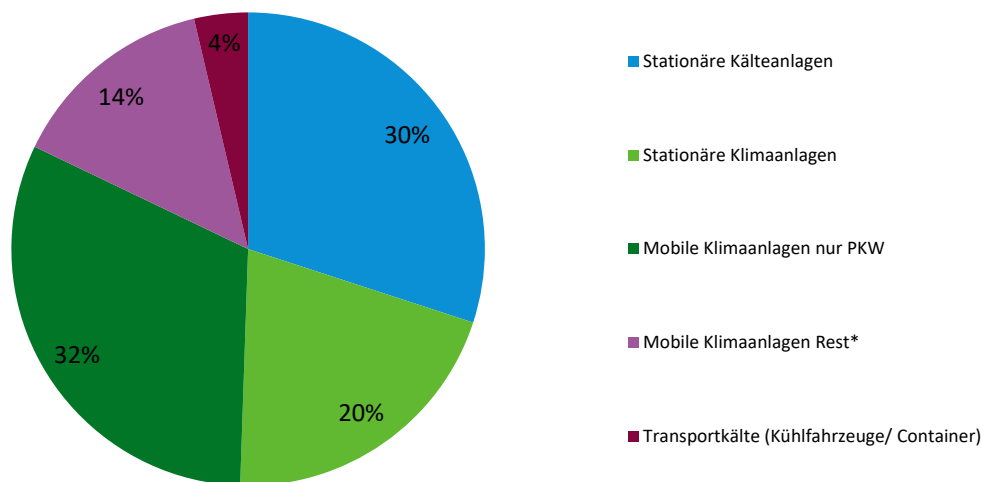
\* Nutzfahrzeuge, Busse, Landmaschinen, Züge, Schiffe und Flugzeuge

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Wie aus Abbildung 5 hervorgeht, entfallen über 40% aller Emissionen in metrischen Tonnen im Zusammenhang mit Kälte- und Klimaanlage auf Pkw-Klimaanlagen. Ein erheblicher Unterschied wird allerdings, deutlich, wenn die Emissionen in Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten herangezogen werden. In Abbildung 6 ist dies sichtbar: Die klimawirksamen Emissionen aus dem Pkw-Sektor sind geringer, während die aus stationären Kälteanlagen höher sind. Der Anteil der klimawirksamen Emissionen im Bereich Pkw wird in den nächsten Jahren weiter abnehmen, da in Fahrzeugen, die seit 2018 neu zugelassen wurden, ausschließlich Kältemittel mit einem GWP-Wert von unter 150 verwendet werden dürfen. Dabei wird vor allem der ungesättigte HFKW uHFKW-1234yf eingesetzt.

Aber auch in vielen anderen Sektoren kommen Kältemittel mit niedrigerem oder keinem GWP zum vermehrten Einsatz, weshalb auch hier eine Verringerung der klimawirksamen Emissionen stattfindet.

**Abbildung 6: Anteile der Emissionen der verschiedenen Subsektoren im Sektor Kälte- und Klimaanlage in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten in Deutschland im Jahr 2024 (%)**



\* 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

Der Bereich der stationären Kältetechnik umfasst zwei wesentliche Sektoren (der jeweilige Anteil an klimawirksamen Emissionen ist in Klammern angegeben), nämlich Gewerbekälte (etwa 52%) und Industriekälte (etwa 46%). Der Haushaltssektor, der Haushaltskühlschränke und Speiseeismaschinen beinhaltet, macht den verbleibenden Anteil von 2% aus.

Untergliedert wird der Bereich der Gewerbekälte in Zentralanlagen in Supermärkten und Discountern sowie in sonstige Gewerbekälte (z.B. Gastronomie, Fleischereien und Tankstellen), die vorwiegend mit Verflüssigungssätzen kühlt. Zudem werden steckerfertige Geräte in gewerblichen Bereichen hinzugezählt.

Bei steckerfertigen Geräten und Verflüssigungssätzen wurde die Anzahl der Tankstellenshops für die Jahre 1999-2023 auf Basis von veröffentlichten Daten vom Bundesverband Freier Tankstellen e. V. (bft) rekalkuliert. Bei Verflüssigungssätzen der Gewerbekälte wurde zudem die Anzahl von Blumenläden für die Jahre 2022 und 2023 aufgrund neu veröffentlichter statistischer Daten des Statistischen Bundesamtes aktualisiert

Für Discounter wurde die Lebensdauer der Kälteanlagen von 10 auf 12 Jahre erhöht. Diese Änderung ergibt sich aus den Ergebnissen eines anderen Forschungsprojektes mit dem Titel „Praxisnahe Rückgewinnungsfaktoren für UNFCCC F-Gas Inventare“ (Gschrey, Veröffentlichung ausstehend), in dem Branchenexperten die Lebensdauer von 10 Jahren als zu niedrig angesehen haben.

Die Haushaltskälte, die Haushaltskühlschränke und Speiseeismaschinen umfasst, ist der kleinste Posten im Bereich der stationären Kälteanlagen. In Haushaltskühlschränken werden allerdings seit 1994 Kohlenwasserstoffe verwendet, weshalb die Emissionen auf die Nutzung von alten Geräten oder deren Entsorgung zurückzuführen sind. In der EU ist seit 2015 die Verwendung von F-Gasen mit GWP>150 in der Haushaltskälte nicht mehr erlaubt, ab 2026 ist der Einsatz von

jeglichen F-Gasen in neuen Haushaltskühl- und -gefriergeräten verboten (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2024).

Die Anwendung von F-Gasen als Kältemittel in Speiseemaschinen wurde im Zuge der Aktualisierung des Inventars im Jahr 2017 (Warncke et al. 2017) in das Inventar aufgenommen.

### Inventarverbesserung Industriekälte

Das Modell der Industriekälte ist eines der umfangreichsten und größten im gesamten deutschen Emissionsinventar. Die Berechnungen bauen auf Basis der Produktionsmenge der Güter auf. Das heißt, vereinfacht gesagt, es wird pro Gütermenge eine notwendige installierte Kälteleistung angenommen, die wiederum mit bestimmten Kältemittelmengen bereitgestellt wird. Das Modell gliedert sich in 12 Sektoren, 9 davon sind große Nahrungsmittelsektoren (Bierproduktion, Keltereien, Schlachthöfe, Molkereien, Kühlhäuser, Schokoladenproduktion, Tiefkühlkostproduktion, Fruchtsaftproduktion, Milchviehbetriebe), außerdem Eisbahnen, sonstige Industrie, die zu 80% im Chemiesektor liegt, und als 12. Sektor hermetisch geschlossene Geräte in der verarbeitenden Industrie (z.B. Schaltschrankkühler). Dabei befanden sich bis zur Überarbeitung des Modells folgende Kältemittel im Bestand: R-422A, R-407C, R-404A, R-227ea, R-134a, R-23 und R-717 (NH<sub>3</sub>; Ammoniak).

Bei den in diesem Bereich eingesetzten steckerfertigen Kühlgeräten wurde der Anteil der neuen Geräte, die mit HFKW-134a befüllt sind, ab 2014 korrigiert, da hier stattdessen vor allem Propan eingesetzt wird. Diese Entwicklung fand analog zur Einführung von R-290 in steckerfertigen Geräten in anderen Sektoren, wie bspw. in der Gewerbekälte, statt. Die Kältemittelanteile verhalten sich nun wie in Tabelle 7 dargestellt.

**Tabelle 7: Kältemittelanteile bei steckerfertigen Geräten in der Industriekälte [%] 2013-2024**

Kältemittel-anteil in %	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
R-134a	100	95	80	65	50	45	40	35	30	25	20	15
R-290	-	5	20	35	50	55	60	65	70	75	80	85

Der Bereich der Industriekälte ist der Einzige, in dem in sehr hohem Maße Ammoniak als Kältemittel eingesetzt wird. Grund hierfür ist, dass es sich um teilweise sehr große Kälteanlagen handelt, die außerdem wenig öffentlich aufgestellt werden können, um ein Expositionsrisiko zu vermeiden (Ammoniak ist toxisch). Im Rahmen der durch den in der F-Gas-Verordnung festgeschriebenen HFKW-Phase-down haben sich auch im Bereich der Industriekälte Änderungen in der Zusammensetzung der Kältemittel ergeben. Nicht nur ist die Nutzung von Ammoniak weiter gestiegen, auch R-744 (CO<sub>2</sub>) hat Einzug gefunden. Zudem ist die Installation von Anlagen mit R-404A, wie auch in anderen Sektoren, enorm zurückgegangen.

Die Kältemittelanteile in einem Teil der o.g. Sektoren, vor allem der Lebensmittelindustrie, wurden daher angepasst. In der Industriekälte hat parallel zu den anderen Sektoren der Kälte- und Klimaanlage die Entwicklung hin zu Kältemitteln mit niedrigem oder niedrigerem GWP stattgefunden. Die Änderungen sind in Tabelle 8 zu sehen. Zu beachten ist, dass R-404A und R-407C stets zusammen genannt werden und im Modell ein allgemeiner Split von 80% R-404A und 20% R-407C angenommen wird.

**Tabelle 8: Kältemittelanteile in Neuanlagen in der Großkälte der Industriekälte [%] 2016-2024**

Sektor und Kältemittelanteil in %	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
<b>Tiefkühlkostproduktion</b>									
R-404A/R-407C	35	35	35	35	35	30	20	10	-
NH <sub>3</sub>	65	65	65	65	65	70	75	85	95
R-290	-	-	-	-	-	-	5	5	5
<b>Schokoladenproduktion</b>									
R-404A/R-407C	100	100	100	75	55	35	15	5	0
NH <sub>3</sub>	-	-	-	25	45	60	80	90	95
CO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	5	5	5	5
<b>Brauereien</b>									
R-404A/R-407C	10	10	10	10	10	5	3	0	0
NH <sub>3</sub>	90	90	90	90	90	93	94	95	95
CO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	1	2	3	3
R-290	-	-	-	-	-	1	1	2	2
<b>Eisbahnen</b>									
R-404A/R-407C	51,5	51,5	51,5	51,5	51,5	38	24	10	0
NH <sub>3</sub>	30	30	30	30	30	45	60	75	85
CO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	1	5	8	10
R-723*	-	-	-	-	-	1	1	2	5
R-134a	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	15	10	5	0
<b>Kühlhäuser</b>									
R-404A/R-407C	16	8	5	0	0	0	0	0	0
NH <sub>3</sub>	84	90	90	90	90	90	90	90	90
CO <sub>2</sub>	-	2	4	8	8	8	8	8	8
R-290	-	-	1	2	2	2	2	2	2
<b>Schlachthöfe</b>									
R-404A/R-407C	35	35	35	35	35	20	10	0	0
NH <sub>3</sub>	65	65	65	65	65	75	85	95	95
CO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	5	5	5	5

Sektor und Kältemittelanteil in %	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
<b>Weinproduktion</b>									
R-404A/R-407C	100	100	90	80	60	40	25	10	5
R-410A	-	-	10	20	30	40	40	40	40
R-454B	-	-	-	-	-	-	5	10	15
R-32	-	-	-	-	5	5	10	10	10
CO <sub>2</sub>	-	-	-	-	5	10	10	15	15
R-290	-	-	-	-	-	5	10	15	15
<b>Fruchtsaftproduktion</b>									
R-404A/R-407C	100	100	100	100	80	60	40	20	5
NH <sub>3</sub>	-	-	-	-	15	25	45	65	75
CO <sub>2</sub>	-	-	-	-	3	10	10	10	15
R-290	-	-	-	-	2	5	5	5	5
<b>Molkereien</b>									
R-404A/R-407C	35	35	35	35	35	20	10	0	0
NH <sub>3</sub>	65	65	65	65	65	75	85	95	95
CO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	5	5	5	5
<b>Milchviehbetriebe</b>									
R-404A/R-407C	100	100	85	77,5	65	57,5	42,5	22,5	5
R-448	-	-	5	7,5	10	12,5	12,5	12,5	10
R-449	-	-	10	15	25	30	35	35	35
R-452B	-	-	-	-	-	-	5	15	25
R-290	-	-	-	-	-	-	5	10	20
CO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	5	10
<b>Chemische Industrie</b>									
R-404A/R-407C	51,5	50	40	30	20	10	5	-	-
NH <sub>3</sub>	30	30	35	45	50	55	60	60	60
R-134a	18,5	18,5	10	10	5	5	-	-	-
R-410A	-	-	5	5	10	10	5	5	5
R-454B	-	-	-	-	-	-	5	10	10

Sektor und Kältemittelanteil in %	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
R-513A	-	-	5	5	10	10	10	5	5
R-290	-	-	-	-	-	3	5	10	10
CO <sub>2</sub>	-	-	5	5	5	7	10	10	10

\* Ammoniak-Dimethylether

Es wird deutlich, dass sich die bereits historisch starke Stellung von Ammoniak in vielen Bereichen im Zuge der Verknappung und Verteuerung von HFKW durch die F-Gas-Verordnung weiter verstärkt hat. Außerdem haben weitere natürliche Kältemittel wie CO<sub>2</sub> und Propan Einzug gefunden. Es sind aber auch neue Blends wie R-454B hinzugekommen und es wird in einigen Bereichen auf den ehemals gängigen Stoff R-410A zurückgegriffen. Dieser Einsatz wird allerdings nicht mehr lange stattfinden, da der GWP mit 1927 (AR 5) unter die Verbote der neuen EU-F-Gas-Verordnung (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2024) fällt (ab 2027/2032).

Wie auch in anderen Sektoren hat sich die Effizienz der Anlagen verbessert, weshalb in einigen Anwendungen weniger Kältemittel benötigt wird. Das Industriekältemodell arbeitet hier mit Kältemittelraten (kg/kW). Sie ergeben sich für jeden Sektor aus den typischen Relationen zwischen Plus- und Minuskühlung sowie zwischen direkter und indirekter Kühlung (Genauere Angaben finden sich in „Modelle für die Inventarerhebung“ (Schwarz 2013)). Die alten und neuen Raten sind in der folgenden Tabelle abgebildet (Tabelle 9).

**Tabelle 9: Kältemittelraten (kg/kW)**

	Bis 2019	Ab 2020	
Normaltemperatur, direkte Kühlung*	5,5	2,75	kg/kW
Normaltemperatur, indirekte Kühlung**	2	1	kg/kW
Tieftemperatur, direkte Kühlung	8,8	8	kg/kW
Tieftemperatur, indirekte Kühlung	3	2,5	kg/kW

\* Bei der direkten Kühlung ist das Kühlmedium direkt mit dem Objekt oder Raum, das/der gekühlt werden soll, in Kontakt.

\*\* Bei der indirekten Kühlung wird ein Wärmetauscher verwendet, der die Kälte über ein Zwischenmedium, z.B. Sole, überträgt, ohne dass ein direkter Kontakt mit dem Objekt oder Raum besteht.

Weitere Parameter des Modells sind die Emissionsfaktoren und die zur Berechnung der Entsorgungsemissionen notwendigen Werte des Restfüllstandes und der Rückgewinnungsrate, die in Tabelle 10 aufgeführt sind.

**Tabelle 10: Emissionsfaktoren, Restfüllstand und Rückgewinnungsrate in Prozent im Jahr 2024**

	Großkälte	Steckerfertige Geräte
Emissionsfaktor Bestand	4,5%	1%
Emissionsfaktor Befüllung	1%	0,5%
Restfüllstand	85%	90%
Rückgewinnungsrate	80%	60%

Auch diese Parameter wurden im Rahmen des bereits erwähnten Projektes „Praxisnahe Rückgewinnungsfaktoren für UNFCCC F-Gas Inventare“ (Gschrey, Veröffentlichung ausstehend) überprüft und bedürfen keiner Änderung.

### FKW

Die Emissionen von FKW-Kältemitteln setzen ihren rückläufigen Trend fort und betragen im Jahr 2024 noch 0,3 t. Diese Emissionen werden hauptsächlich bei der Außerbetriebnahme von Gewerbekälte-Altanlagen freigesetzt, die in den 1990er Jahren im Rahmen des Ersatzes von FCKW-12 mit sogenannten Service-Kältemitteln befüllt wurden. Diese enthielten häufig FKW-218 (C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>) als chlorfreie Komponente. Zusätzlich ist FKW-218 Teil von zwei Service-Kältemitteln (R-413A und Isceon MO 89). Auch in Zukunft werden diese Bestandsemissionen erzeugen, ebenso wie FKW-116 (C2F6), das zusammen mit HFKW-23 Teil der in geringen Mengen verwendeten Tieftemperatur-Kältemittelgemische R-508A und R-508B ist.

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

##### Mobile Klimaanlage

Die Emissionen von HFKW aus mobilen Klimaanlage werden zu fast zwei Dritteln durch Pkw-Klimaanlagen verursacht. Seit 2011 stiegen die Neuzulassungen von Pkw kontinuierlich an, doch im Jahr 2020 sanken sie aufgrund der Corona-Pandemie auf 2,9 Millionen Fahrzeuge, was den geringsten Wert seit 2010 darstellt. Die Neuzulassungen haben sich seitdem nicht wieder erholt und lagen im Jahr 2024 bei 2,8 Millionen Fahrzeuge.

Die Klimaquote der Neuzulassungen von Pkw hat sich über die Jahre kontinuierlich erhöht und erreichte im Jahr 2024 einen Wert von 99,5%. Ab 2018 gilt die Quote nur noch für R-1234yf, da Pkw mit R-134a nicht mehr neu zugelassen wurden. Die durchschnittliche Kältemittelfüllmenge in klimatisierten Neufahrzeugen war über einen langen Zeitraum rückläufig und betrug im Jahr 2015 547 Gramm (2005: 0,661 g). Allerdings wurde in den letzten Jahren ein leichter Anstieg dieser Menge festgestellt, da die derzeit beliebten SUVs (Sports Utility Vehicles) größere Klimaanlage und höhere Kältemittel-Füllmengen haben (2024: 0,575 g)

Im Jahr 2024 lagen die Emissionen von HFKW-134a aus dem Pkw-Kältemittelbestand mit 1.429 t im Vergleich zu den Vorjahren deutlich niedriger (2020: 1.829 t). Die Entsorgungsmissionen sanken von 33 t (2020) auf 18 t R-134a, bezogen auf die Anzahl der Altfahrzeuge, die im Inland demontiert wurden.

Die EU-Richtlinie 2006/40/EG (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen 2006b, MAC-Richtlinie) ist für den Ausstieg von HFKW-134a aus Autoklimaanlagen verantwortlich, da sie einen GWP von unter 150 für alle neuen Pkw-Modelle ab 2017 festlegt. Die Automobilbranche nutzt seitdem als Ersatz das ungesättigte uHFKW-1234yf. Im AR5 wird das Treibhauspotenzial (GWP) von uHFKW-1234yf nur noch mit 1 angegeben, im Vergleich zu 4 im AR4. Damit liegt es

deutlich unter den erlaubten 150 der MAC-Richtlinie (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2006b).

Einige Hersteller haben begonnen, Klimaanlage auf den Markt zu bringen, die CO<sub>2</sub> (R-744) als Kältemittel nutzen. Die meisten Hersteller bieten diese Option allerdings eher für hochpreisige Modelle an, da auch der Preis einer CO<sub>2</sub>-Klimaanlage höher liegt. Es gibt aber mittlerweile auch kleinere Modelle mit dieser Art von Klimatisierung. Für die Zukunft ist im Zuge der Elektrifizierung davon auszugehen, dass sowohl CO<sub>2</sub>- als möglicherweise auch Propan-Klimaanlagen in Wärmepumpenausführung eine wichtige Rolle spielen werden. Grund ist der, dass ein Elektromotor deutlich weniger Vibrationen verursacht und so Leckagen eher verhindert werden können, die bei Pkw-Klimaanlagen in Pkw mit Verbrennungsmotor im laufenden Betrieb dauerhaft auftreten. Zudem übt ein mögliches Verbot per- und polyfluorierter Alkylverbindungen (PFAS) unter der EU Chemikalienverordnung REACH (Umweltbundesamt 2023b), unter welches auch uHFKW fallen würden, Druck auf die Hersteller aus, Alternativen einzusetzen.

Auch für die Gruppe 1 der kleinsten Gewichtsklasse der Nutzfahrzeuge N1 ist die MAC-Richtlinie bindend. Deswegen werden seit 2016 auch bei Nutzfahrzeugen der Klasse N1 zunehmend Klimatisierungen mit R-1234yf vorgenommen. Diese Daten werden ebenfalls aggregiert im Abschnitt 2.1 dargestellt. Der Bericht zur Inventarerhebung der F-Gase für 2017/2018 (Warncke et al. 2021a) enthält eine detaillierte Beschreibung dieser Verbesserung des Inventars.

Mittlerweile bestehen klare Bedenken gegenüber dem Einsatz von R-1234yf, da sich gezeigt hat, dass ungesättigte HFKW (Hydrofluorolefine, HFO) als Abbauprodukt Trifluoressigsäure (TFA) bilden. TFA ist eine in der Umwelt schwer abbaubare Substanz, sehr gut wasserlöslich und gilt daher als wassergefährdend, denn es gelangt bis ins Grund- und Trinkwasser. Messungen von Regenwasser, die im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) von einem Konsortium mit Beteiligung von Öko-Recherche durchgeführt wurden, zeigen, dass die TFA-Konzentrationen seit den 1990er Jahren deutlich zugenommen haben (Behringer et al. 2021). Obwohl sich bisher keine regulatorischen Konsequenzen aus diesen Messungen ergeben haben, würde TFA auch unter die Regulierung von PFAS gemäß der derzeit diskutierten EU-Chemikalienverordnung REACH fallen. In einer aktuellen Einstufung haben außerdem mehrere deutsche Behörden, darunter die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, das Bundesinstitut für Risikobewertung und das Umweltbundesamt, TFA als reproduktionstoxisch, sehr persistent und sehr mobil eingestuft und ein entsprechendes Dossier bei der Europäische Chemikalienagentur (ECHA) eingereicht (Umweltbundesamt 2025b).

Im Zuge dieser Berichterstattung wurde eine rückwirkende Änderung in Bezug auf die genutzten Kältemittel bei der inländischen Pkw-Produktion umgesetzt. Bisher war davon ausgegangen worden, dass nur die für den europäischen Markt produzierten Fahrzeuge mit R-1234yf befüllt werden und die restlichen Fahrzeuge für den außereuropäischen Export weiterhin mit R-134a. Eine Nachfrage bei den Herstellern hat ergeben, dass dies nicht zutreffend ist, da der Betrieb von zwei Produktionslinien auf Dauer nicht wirtschaftlich ist. Die Kältemittel-Trennung hat nur in den ersten Jahren nach dem Verbot von R-134a stattgefunden; dies ist aus den unter dem Umweltstatistikgesetz (Statistisches Bundesamt, fortl.) gemeldeten Daten ersichtlich. Daher nehmen wir nun an, dass seit 2020 kein in Deutschland hergestelltes Fahrzeug mehr mit R-134a befüllt worden ist.

Für andere mobile Klimaanlage (wie Busse, Nutzfahrzeuge der Gewichtsklassen N3, N2 und teilweise N1, Landmaschinen, Schiffe, Schienenfahrzeuge, mittelgroße Flugzeuge und Hubschrauber) existiert bislang keine gesetzliche Regelung für den Ausstieg aus HFKW-134a.

Die HFCKW-Menge in der EU wird durch die EU-F-Gas-Verordnung (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2024) allerdings generell kleiner, was zur Folge hat, dass diese Anwendungen indirekt betroffen sind.

Bei Schiffen erfolgte eine Korrektur der Anzahl im Inland produzierter Binnenkabinenschiffe im Jahr 2023 sowie der Kreuzfahrtschiffe für die Jahre 1997-2000, 2003-2005, 2010, 2012, 2019 und 2021 auf Grundlage von Daten des Verbands für Schiffbau und Meerestechnik e.V. (VSM, fortl.) und Informationen der Meyer Werft Papenburg (Meyer Werft, fortl.).

**Tabelle 11: Anzahl der in Deutschland produzierten Kreuzfahrtschiffe 1997-2024**

1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
1	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2	2	2	3
2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
2	3	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2

Auch die Zahl der in Betrieb befindlichen Kreuzfahrtschiffe musste geändert werden; das bisher einzige unter deutscher Flagge fahrende Kreuzfahrtschiff (MS Deutschland, 1998-2014) hatte eine Klimaanlage mit dem nicht berichtspflichtigen ozonabbauenden Stoff HFCKW-22. Die Füllmenge bei Marineschiffen wurde im Jahr 2002 von 500 kg auf 1.250 kg angepasst. Auch bei der Schiffsentsorgung waren Anpassungen erforderlich. Recherchen haben ergeben, dass bis einschließlich 2024 keine Schiffsentsorgungen in Deutschland stattfanden und dass ausgemusterte Schiffe zum Abwracken ins Ausland transportiert wurden. Die vormals berichteten Entsorgungsemissionen der Jahre 2022 und 2023 wurden auf null korrigiert, denn bisher haben keine Entsorgungen stattgefunden. Dies wird sich in naher Zukunft ändern, denn die in der Emdener Werft und Dock GmbH ansässige Firma EWD Benli Recycling GmbH & Co. KG hat seit diesem Jahr, genauer gesagt seit Juni 2025, eine Zulassung für Abwrackungen bekommen und ist damit die einzige Werft in Deutschland, die diese besitzt. Das Unternehmen rechnet damit, dass das erste Schiff Ende 2025 dort entsorgt wird. Die Entsorgung von Binnenschiffen wird von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV, Ressort des Bundesministeriums für Verkehr (BMV)) statistisch erfasst. Für das deutsche Modell werden diese Statistiken bereits für Bestandszahlen genutzt.

Da Nutzfahrzeuge gewerblich genutzt werden, hängen sie stark von der Konjunktur ab. Im Jahr 2020 gingen die Neuzulassungen von Nutzfahrzeugen aller Gewichtsklassen (N1, N2 und N3) infolge der Corona-Pandemie deutlich zurück, doch in den beiden darauffolgenden Jahren erholten sie sich wieder. Die Klimaquote für alle drei Kategorien von Nutzfahrzeugen ist deutlich gestiegen von 91% im Jahr 2023 auf 93% im Jahr 2024.

Der Kältemittelbestand in der Flotte der Nutzfahrzeuge ist in den vergangenen Jahren weiter angestiegen. In der Folge erhöhten sich die Betriebsemissionen deutlich von 307 t im Jahr 2020 auf derzeit 382 t im Jahr 2024. Da fast alle Nutzfahrzeuge vor ihrer Demontage als Gebrauchtfahrzeuge exportiert werden, sind inländische Entsorgungsemissionen von geringer Bedeutung.

Leichte Zunahmen der Bestandsemissionen waren bei Bussen zu verzeichnen; bei den Schienenfahrzeugen hingegen fand eine leichte Abnahme in beiden Jahren statt. Im Bereich Landmaschinen sind die Emissionen im Jahr 2024 um 3 t gesunken, dies liegt vor allem an weniger Neuzulassungen und damit einem weniger stark gewachsenen Bestand. Zwar sind in diesem Sektor die Herstellungsemissionen gering, allerdings ist die Produktion von

Landmaschinen in Deutschland stark eingebrochen, während sie in den Vorjahren relativ stabil war.

Seit 1993 liegt der R-134a-Bestand für die Klimatisierung mittelgroßer, mehrmotoriger Flugzeuge und Hubschrauber relativ konstant bei etwa 2,6 Tonnen. Auf dieser Grundlage resultieren kalkulierte jährliche Emissionen von etwa 130 kg. R-134a findet auch in der Bordkühlung von Passagierflugzeugen Verwendung.

### **Transportkälte**

Nach dem Einbruch der Neuzulassungen von Kühlfahrzeugen im Jahr 2020 und 2021 von knapp 12.000 Fahrzeugen auf nur 8.514 (2021) sind die Neuzulassungen wieder gestiegen. Noch ist keine Erholung auf Vor-Corona-Niveau zu beobachten, die Neuzulassungen im Jahr 2024 lagen bei 10.521 Fahrzeugen. Die Bestandsemissionen von HFKW (R-404A, R-134a und R-410A) sanken von 68 t im Jahr 2020 auf 42 t im Jahr 2024. Seit 2015 wird in neuen Kälteaggregaten auch die HFKW-uHFKW-Mischung R-452A (GWP 1945; AR5) als Ersatz für R-404A verwendet. Daher sind diese Emissionen stark angestiegen, von 2 t im Jahr 2016 auf 47 t im Jahr 2024.

Die der Bundesrepublik Deutschland zugerechneten Bestandsemissionen aus Kühlcontainern betragen 2024 etwa 53 t – hauptsächlich R-134a (85%).

Obwohl Container mit CO<sub>2</sub> durchaus durch Frachtunternehmen in größerem Umfang getestet werden, ist Expertenschätzungen zufolge frühestens ab 2032 mit nennenswerten Marktanteilen zu rechnen. Daneben wird derzeit der Einsatz von Propan (R-290) erprobt, etwa im Rahmen eines Vorhabens der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), finanziert durch die Internationale Klimaschutzinitiative (IKI) und in Kooperation mit Reedereien, Containerherstellern und Logistikunternehmen (GIZ 2023).

### **Inventarverbesserung Kühlfahrzeuge**

Im Zuge dieser Inventarverbesserung war vorgesehen, die Marktsituation in Bezug auf mögliche Kältemittel-Neuheiten, vor allem Alternativen zu R-452A, da dieses einen GWP von 1945 (AR5) aufweist, zu eruieren. Es hat sich allerdings gezeigt, dass bisher kaum Kältemittel-Alternativen mit niedrigeren GWP-Werten eingesetzt werden. Es gibt zwar Hersteller von R-290 und CO<sub>2</sub>-Anlagen, diese werden aber bisher nicht in großem Maßstab eingesetzt. Dies könnte künftig unter Umständen zu Versorgungsengpässen in dieser Anwendung führen.

Aufgrund der Recherche-Ergebnisse wurden aber die Kältemittel-Anteile der Jahre 2023 und 2024 angepasst und diejenigen von R-452A in allen Gewichtsklassen erhöht, während die von R-134a verringert wurden.

**Tabelle 12: Kältemittelanteile von Kühlfahrzeugen [%] 2022-2024**

Neuzulassungs-Menge des Fahrzeugs und Kältemittelanteil in %	2022	2023	2024
<b>&gt; 26 t Gesamtgewicht</b>			
R-410A	10	10	10
R-134a	5	0	0
R-452A	85	90	90
<b>&gt; 12 t GG</b>			
R-410A	10	10	10
R-134a	10	5	0
R-452A	80	85	90
<b>&gt; 7,5 - 12 t GG</b>			
R-410A	10	10	10
R-134a	30	15	0
R-452A	60	75	90
<b>&gt; 3,5 - 7,5 t GG</b>			
R-134a	30	15	5
R-452A	70	85	95
<b>&lt; 3,5 t GG</b>			
R-134a	30	20	15
R-452A	70	80	85

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

Insbesondere bei Gebäude-Klimaanlagen (Flüssigkeitskühlsätzen) und Wärmepumpen ist der Bestandszuwachs von HFKW-Kältemitteln noch nicht vollständig ausgeschöpft und hat auch im Jahr 2024 weiter zugenommen.

#### Raumklimageräte

Seit Jahren unterliegt der Markt für Raumklimageräte aller Kategorien in Europa und weltweit deutlichem Wachstum. Der Kältemittelbestand der insgesamt in Betrieb befindlichen beweglichen Kleingeräte und einfachen Split-Geräte war 2024 in Deutschland dreimal so hoch wie 2004 (2.951 t/962 t). Der Einsatzbereich von Raumklimageräten hat sich stetig erweitert - auf bis zu 60 kW Kälteleistung und mehr. Der Einsatz von Multisplit-Geräten, insbesondere solchen mit individuell einstellbaren Kältemittelströmen (VRF-Technologie), ermöglicht diese Ausweitung des Anwendungsbereichs, denn es werden mehrere (meist drei bis sieben) Innengeräte mit einem einzigen Außengerät verbunden.

Bereits die EU F-Gas-Verordnung von 2014 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014) sah 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. Darüber hinaus dürfen gemäß der neuen EU F-Gas-Verordnung von 2024 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2024) steckerfertige Raumklimageräte, Monoblock-Klimaanlagen, andere in sich geschlossene Klimaanlagen und in sich geschlossene Wärmepumpen mit einer Höchstnennleistung von bis zu einschließlich 12 kW, die F-Gase mit GWP von 150 oder mehr enthalten, ab 2027 nicht mehr in Verkehr gebracht werden, außer wenn dies am Standort zur Einhaltung von Sicherheitsanforderungen erforderlich ist. Nur sofern Sicherheitsregelungen am Standort die Verwendung von F-Gasen mit einem GWP geringer als 150 nicht erlauben, können noch Kältemittel mit einem GWP-Höchstwert von 750 verwendet werden.

Auch Monoblock-Anlagen und andere in sich geschlossene Klimaanlagen und Wärmepumpen mit einer Höchstnennleistung von über 12 kW bis maximal 50 kW dürfen keine F-Gase mit GWP größer als 150 mehr enthalten, sofern dies nicht zur Einhaltung von Sicherheitsregelungen erforderlich ist. Es gilt allerdings ebenfalls eine Ausnahme für Kältemittel mit GWP-Höchstwert 750, wenn Sicherheitsanforderungen ansonsten nicht umgesetzt werden können.

Für Split-Klimaanlagen und Split-Wärmepumpen gelten etwas geänderte Anforderungen, das Inverkehrbringensverbot für Mono-Splitgeräte mit Füllmengen unter 3 kg bezieht sich nun nämlich bereits ab 2025 auf Kältemittel mit GWP-Höchstwert von 750. Die Verordnung gibt außerdem den Ausstieg aus der Verwendung von F-Gasen in neuen Split-Systemen bis 12 kW Nennleistung ab 2035 vor. In neuen Split-Systemen mit Nennleistungen von mehr als 12 kW sind ab 2029 keine F-Gase mit höheren GWP-Werten als 750 mehr erlaubt.

Für Luft-Wasser-Splitsysteme und Luft-Luft-Anlagen mit Nennleistung von bis zu 12 kW gelten Inverkehrbringensverbote ab 2027 und 2029 hinsichtlich der Verwendung von Kältemitteln mit GWP-Höchstwerten von 150.

Vor rund 10 Jahren war das Unternehmen Daikin der erste Hersteller, der, statt der früher verwendeten Kältemittel R-410A (GWP 1.924 (AR5)) und R-407C (1.624 (AR5)), die umfassende Einführung des Kältemittels R-32 (677 (AR5)) in seinen neuen Geräten umsetzte. Es folgten andere Hersteller. R-32 wurde 2015 erstmals in einfachen Split-Geräten eingeführt, sein Einsatz hat sich seitdem auf 100 Prozent aller Neuanlagen (im Berichtsjahr 2024) ausgeweitet. Die Nutzung in VRF-Geräten begann 2020, seit 2021 auch in Multisplit-Geräten. Die Füllmenge von R-32 beträgt im Durchschnitt 11,7 kg und ist etwas geringer als die der bislang verwendeten Kältemittel.

In vorherigen Berichtszyklus wurden die Kältemittel-Anteile für die beweglichen Raumklimageräte angepasst. Vorher war noch von einem hohen Anteil R-410A ausgegangen worden, was nicht mehr der Realität entsprach. Außerdem sind bewegliche Geräte laut EU F-Gas-Verordnung (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014 und 2024) ab dem 01.01.2020 nur noch mit Kältemittel mit einem GWP unter 150 zugelassen. Mittlerweile sind alle Produkte auf R-290 umgestellt.

Die Anzahl neuer beweglicher Raumklimageräte wurde im Rahmen dieser Erhebung aktualisiert, basierend auf neuen Statistiken von JARN und BSRIA. Außerdem wurde die durchschnittliche Lebensdauer von Multi-Split- und VRF-Multi-Split-Klimageräten auf Basis der Auswertung der vom Verband Deutscher Kälte-Klima-Fachbetriebe e.V. (VDKF) erhobenen Datensatz, die in einem anderen Projekt mit dem Titel „Praxisnahe Rückgewinnungsfaktoren für UNFCCC F-Gas Inventare“ durchgeführt wurde, von 13 auf 10 Jahre gesenkt.

Aufgrund der oben genannten Regelungen der EU F-Gas-Verordnung und von Änderungen relevanter Produktstandards in den vergangenen Jahren werden derzeit von verschiedenen Herstellern Kältemittel mit niedrigem GWP für die Anwendung in ortsfesten Klimaanlage entwickelt und getestet. Hervorzuheben ist hier vor allem der Standard IEC 60335-2-40 „Sicherheit elektrischer Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke – Besondere Anforderungen für elektrisch betriebene Wärmepumpen, Klimageräte und Raumluft-Entfeuchter“, dessen überarbeitete Fassung 2022 veröffentlicht wurde und unter Einhaltung bestimmter Sicherheitsvorkehrungen deutliche höhere Füllmengen von Kältemitteln der Sicherheitsklassen A2L und A3 erlaubt. Auf Fachmessen werden bereits entsprechende Produkte gezeigt, etwa Single-Split-Wärmepumpen mit Propan (R-290) bis etwa 6 kW Nennleistung. In den nächsten Jahren ist mit weiteren Produkteinführungen zu rechnen.

Auch die Verwendung von CO<sub>2</sub> (R-744) in VRF-Anlagen wurde von einem Hersteller angekündigt.

### **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, jedoch wird in den nächsten Jahren mit etwas Wachstum gerechnet, da von einem höheren Klimatisierungsbedarf auszugehen ist, wie auch bei der Raumklimatisierung.

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.

Im letzten Berichtszyklus hat eine Überarbeitung des Modells stattgefunden (Warncke 2024). Diese bezog sich vor allem auf die Füllmengen und Kältemittelanteile. 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 seit 2022, auf R-515B gesetzt. Da Fachleute R-513A als Übergangslösung betrachten, gehen auch wir davon aus, dass die Zahl der Neuinstallationen mit diesem Kältemittel ab 2023 bzw. 2024 wieder sinkt.

Das Modell geht allerdings auch in den Folgejahren noch von einem gewissen Anteil der „alten“ HFKW-Kältemittel, vor allem R-410A, aus. Der Grund hierfür ist, dass diese unter anderem in öffentlichen Aufträgen teilweise noch explizit gefordert werden bzw. häufig genannt sind. Das Bewusstsein in dieser Hinsicht wird sich nun, nach der Einführung der neuen EU F-Gas-Verordnung ändern, der Prozess verläuft jedoch eher schleppend.

Die EU F-Gas-Verordnung (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2024) sieht für ortsfeste Kühler folgende Regelungen vor, sofern keine Sicherheitsanforderungen entgegenstehen: Ab 2027 gelten Inverkehrbringensverbote für Chiller mit Nennleistung bis zu 12 kW und F-Gas-Kältemittel mit GWP von 150 oder mehr. Für größere Kühler ab 12 kW gilt das Inverkehrbringensverbot für F-Gas-Kältemittel mit GWP von 150 oder mehr ab 2032, wobei schon ab 2027 nur noch F-Gas-Kältemittel mit GWP-Höchstwert von 750 eingesetzt werden dürfen.

## Wärmepumpenanlagen

Wärmepumpen (WP) wurden in Deutschland bis vor wenigen Jahren vor allem mit den Kältemitteln R-134a, R-407C, R-404A und R-410A betrieben. Die Überarbeitung des Modells im Rahmen der letzten Inventarerhebung hat die Entwicklungen des Marktes inkludiert und vor allem die genutzten Kältemittel sowie deren Anteile aktualisiert, ebenso die entsprechenden Kältemittelfüllmengen (Warncke 2024). Dies war auch angesichts der sehr stark gestiegenen Verkaufszahlen essentiell. Diese sind allerdings im Zuge der Mediendebatten um den „Wärmepumpenzwang“ massiv eingebrochen und zwar von 438.500 Neuinstallationen im Jahr 2023 auf 234.500 im Jahr 2024, was nahezu einer Halbierung entspricht.

Der Trend bei Luft-Wasser-Wärmepumpen geht deutlich hin zur weitgehenden Verwendung von Propan (R-290) als Kältemittel. Der Marktanteil wurde bereits für 2021 auf etwa 10% geschätzt (Bundesverband Wärmepumpe 2023). 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.

Für die künftige Entwicklung ist die neue EU F-Gas-Verordnung von Bedeutung. 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.

Außerdem wurde die Option geschaffen, zusätzliche HFKW-Quoten für Wärmepumpenanwendungen bereitzustellen, wenn dies notwendig ist, um die Zielvorgaben des REPowerEU-Maßnahmenpakets nicht zu gefährden (Europäische Kommission 2022).

Die EU-Kommission hat 2025 eine Analyse beauftragt, die durch Öko-Recherche durchgeführt wurde (Öko-Recherche 2025). Dabei wurde das Wärmepumpenmodell mit neuen Verkaufszahlen zu den Jahren 2023 und 2024 aktualisiert und an die derzeitige Marktsituation angepasst. Die Ergebnisse zeigen, dass das Wachstum des Wärmepumpenmarktes in den nächsten Jahren absehbar nicht durch Kältemittelengpässe aufgrund fehlender Quoten eingeschränkt werden wird.

## Wärmepumpen-Wäschetrockner

Der Anteil dieses Bereichs an allen HFKW-Emissionen im Bereich der ODS-Ersatzstoffe ist mit weniger als 1% sehr gering.

In diesem Sektor waren Korrekturen der Kältemittelanteile bei großen Wärmepumpen-Wäschetrocknern (WP-WT) mit HFKW-134a erforderlich, da aufgrund vorzeitiger Marktverschiebungen wegen eines ab 2027 bevorstehenden Verbots des Inverkehrbringens dieser Geräte gemäß der EU-F-Gas-Verordnung die Anteile seit 2018 aktualisiert werden mussten (s. Tabelle 13).

**Tabelle 13: Kältemittelanteile in neuen Wärmepumpen-Wäschetrocknern [%] 2014-2024**

Kältemittel	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
R-290	0	3	13	17	37	60	69	75	80	85	90
R-407C	20	17	11	9	1	0	0	0	0	0	0
R-134a in kleinen WP-WT	42	42	42	42	40	35	30	25	20	15	10
R-134a in großen WP-WT	38	38	34	32	23	5	1	0	0	0	0

Die Unterteilung in kleine und große WP-WT bezieht sich auf die R-134a-Füllmenge, die bei kleinen Geräten bei durchschnittlich 0,22 kg liegt und bei Großen bei 0,485 kg.

#### **Gewerbliche Spülmaschinen mit Wärmepumpenfunktion**

Diese Anwendung wurde 2018 in das deutsche Inventar integriert. Seit 2005 sind in Deutschland Gewerbegeschirrspüler mit Wärmepumpenfunktion erhältlich, welche vor allem in Großküchen eingesetzt werden. Es gibt nur sehr wenige deutsche Hersteller, aber diese decken nahezu den gesamten Markt ab. Auch das Produktionsvolumen weist eine hohe Stabilität auf.

Als Kältemittel kommen R-134a, R-513A, R-450A sowie R-744 (CO<sub>2</sub>) zum Einsatz. Im Jahr 2026 wird auch in diesem Sektor R-290 eingeführt werden.

In diesem Sektor wurden die durchschnittlichen Füllmengen von Aggregaten mit dem Kältemittel R-450A von 2,5 auf 0,8 kg pro Gerät und bei Spülmaschinen mit R-513A von 2,5 auf 3 kg pro Gerät angepasst. Auch die Auffüllmengen bei der Herstellung von Geräten mit R-450A wurden von 0,2 auf 0,064 kg pro Gerät und bei solchen mit R-513A von 0,2 auf 0,24 kg pro Gerät angepasst.

Die Emissionen in diesem Anwendungsbereich sind äußerst gering: Im Jahr 2024 betragen sie 0,015 Tonnen, was 0,017 kt CO<sub>2</sub>-Äquivalenten entspricht.

### **1.4.2 Schaumherstellung (2.F.2)**

Fluorierte Stoffe werden im Schaumsektor als ODS-Ersatzmittel verwendet und fungieren als Treibmittel.

#### **1.4.2.1 PU-Hartschaum**

Seit 2002 werden flüssige HFKW-365mfc und HFKW-245fa als physikalische Treibmittel für PU-Hartschaum eingesetzt und berichtet. Die vom Hersteller Solvay gemeldeten Mengen werden mit den Anteilen verrechnet, die aus den Erhebungen nach UStatG zwischen PU-Hartschaum und PU-Integralschaum entnommen werden. Seit 1998 wird HFKW-134a verwendet. Fluorierte Treibmittel werden im Vergleich zu den 1990er Jahren weniger verbraucht, denn die Anwender sind in den meisten Fällen auf Kohlenwasserstoffe umgestiegen. HFKW kommen insbesondere zum Einsatz, wenn eine geringe Entflammbarkeit des Treibmittels notwendig ist. Weil Dämmschaum aufgrund seiner langen Lebensdauer derzeit noch nicht entsorgt wird, steigen die langfristigen Emissionen von Hartschaum (Emissionsrate 0,5 - 1%) weiterhin an. Der HFKW-245fa wird seit 2021 nicht mehr zur Produktion eingesetzt.

#### **1.4.2.2 XPS-Schaum**

Nachdem HFKW-Treibmittel seit 2001 durch HFKW ersetzt wurden, war die Produktion von Dämmplatten aus extrudiertem Polystyrol (XPS) bis 2018 der Bereich mit den höchsten

Emissionen im Schaumsektor. Im Jahr 2019 wurde die Produktion mit HFKW-134a eingestellt, da dessen Verwendung für Schäume ab dem 1.1.2020 gemäß der EU-F-Gas-Verordnung (EU) Nr. 517/2014 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014) nicht mehr gestattet ist. Der Gebrauch von HFKW-152a nahm seit 2001 ab und stieg seit 2015 wieder an. Allerdings war seit 2018 auch an dieser Stelle ein markanter Rückgang festzustellen und ab 2023 war die Produktion komplett eingestellt.

Seit 2012 nutzt ein deutscher Produzent für einen Großteil seiner Produkte das ungesättigte uHFKW-1234ze anstelle des HFKW-152a als Treibmittel. Die verwendeten Mengen sind schon beträchtlich und können über die Erhebung nach dem Umweltstatistikgesetz abgerufen werden.

#### **1.4.2.3 PU-Integralschaum**

Aufgrund von Produktionsverlegungen und den Einsatz anderer Stoffe, kommen HFKW-Treibmittel für Integralschaum in Schuhsohlen, Lenkradummantelungen, Schreibtischstuhllehnen usw. kaum noch zum Einsatz. Die halogenierten Treibmittel waren identisch mit denen für Hartschaum: HFKW-134a, HFKW-245fa und HFKW-365mfc (letzterer wird ergänzt durch HFKW-227ea). Mittlerweile wird nur noch HFKW-365mfc genutzt; HFKW-134a und -227ea seit 2020 nicht mehr; HFKW-245fa seit 2023 nicht mehr. Ab 2019 wird der Stoff uHFKW-1336mzz(Z) unter UStatG für diese Anwendung berichtet, weshalb wir ihn in das Modell integriert haben.

#### **1.4.2.4 PU-Montageschaum**

Die Emissionen, die durch die Anwendung von PU-Montageschaum entstanden – bis zum Jahr 2000 die größte HFKW-Emissionsquelle in Deutschland – sind seitdem kontinuierlich gesunken, da mittlerweile natürliche Treibmittel wie Pentan genutzt werden. Die Produktion von Montageschaumdosen mit HFKW-152a wurde bereits 2005 eingestellt, HFKW-134a wurde nur bis 2022 in der nationalen Produktion eingesetzt. Die HFKW-Füllmenge der verkauften, seit 2023 ausschließlich importierten OCF-Dosen ist auf 0,4 g/Stück gesunken.

In der EU-F-Gas-Verordnung aus dem Jahr 2014 (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014) ist ein Verbot für Treibmittelgemische (Zubereitungen) mit einem GWP von mehr als 150 festgelegt. Dies macht die Verwendung von HFKW-134a als Gemisch-Komponente möglich, vorausgesetzt, der GWP-Grenzwert von 150 wird nicht überschritten. Dadurch kann das Gasgemisch bis zu 10% HFKW-134a sowie Kohlenwasserstoffe enthalten. Die im Treibmittelgemisch aller Dosen, die im Inland verwendet werden, gemessenen Konzentrationen von HFKW-134a beliefen sich im Jahr 2024 auf 0,1%, also praktisch null. Der HFKW-152a wird nicht mehr eingesetzt. Stattdessen werden Stoffe wie Dimethylether, Butan oder Propan eingesetzt.

#### **1.4.3 Feuerlöschmittel (2.F.3)**

Dieser Anwendungsbereich von HFKW wird für diesen Bericht nicht näher betrachtet. Die Methodik zur Berechnung der Emissionen ist im Nationalen Inventarbericht (NID) veröffentlicht. Die Emissionen aus Feuerlöschern sind auch im Anhang aufgeführt und fließen in die Summenberechnung der HFKW-Emissionen im Anhang ein.

#### 1.4.4 Aerosole (2.F.4)

In diesem Abschnitt erfolgt eine Beschreibung der Dosieraerosole (Metered Dose Inhalers, MDI), die in der Medizin Anwendung finden, sowie der allgemeinen Aerosole und Novelty-Aerosole.

##### 1.4.4.1 Dosieraerosole

Bei den medizinischen Sprays für die Behandlung von Asthma und anderen Atemwegs- und Lungenerkrankungen ist vor allem bei der Nutzung von HFKW-134a in den letzten Jahren ein deutlicher Anstieg von etwa 240 t im Jahr 2021 auf über 300 t im Jahr 2024 zu beobachten. Der Verbrauch von HFKW-227ea ist im selben Zeitraum von etwa 15 t auf knapp 13 t gesunken.

Durch die Einbindung der Anwendung der Dosieraerosole in den EU HFKW-Phase-out und damit verbundene Preissteigerungen arbeiten relevante Hersteller an der Einführung von alternativen Gasen. Produkte mit HFKW-152a (Firma Chiesi) und dem ungesättigten HFKW-1234ze (Firma AstraZeneca) wurden durch die Hersteller bereits angekündigt und sollen ab 2025 bzw. 2026 auf dem EU-Markt eingeführt werden.

##### 1.4.4.2 Sonstige Aerosole

Bereits 1995 lagen die Emissionen nichtmedizinischer Aerosole im Vergleich zu den historischen Werten Ende der 1970er Jahre auf einem niedrigen Niveau. Momentan enthalten nur einige wenige technische Sprays (Kaltluft, Druckluft, Reinigungssprays) Aerosole mit HFKW. Ihr hauptsächlichster Einsatz erfolgt zur Reparatur von elektrischen und elektronischen Bauteilen, die unter Strom stehen und bei denen es notwendig ist, dass sie nicht entflammbar sind. Es existieren außerdem die sogenannten „Novelties“. Hierzu zählen dekorative Sprays und reine Spaßartikel wie Signalhörner und Luftschlangen sowie Sprays für Kunstschnee.

Der Verkauf HFKW-haltiger Novelties mit einem GWP von über 150 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). Bisher waren wir im Modell von der Verwendung von einer R-134a-Mischung ausgegangen, deren GWP unter 150 liegt. Seit 2017 wird jedoch ausschließlich der uHFKW-1234ze als Treibmittel genutzt. Daher haben wir in diesem Berichtszyklus die Aktivitätsraten der Anwendung von HFKW-134a für die Jahre 2014 bis 2023 aktualisiert.

Ungesättigtes uHFKW-1234ze wird bereits seit 2013 auch in Industrie-Aerosolen als Treibmittel auf dem deutschen Markt verwendet. Bis Ende 2018 haben alle Unternehmen, die uns bekannt sind, nahezu vollständig auf diesen Stoff umgestellt. Einige Firmen verwenden jedoch weiterhin HFKW-134a in Kombination mit uHFKW-1234ze (10% HFKW-134a, 90% uHFKW-1234ze). Kapitel 2 enthält Informationen zur Verwendung von uHFKW-1234ze.

Die neue EU F-Gas-Verordnung (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2024) sieht ab 2030 ein Verbot der Verwendung von F-Gasen in technischen Aerosolen vor, sofern dies nicht aus Sicherheitsgründen oder für medizinische Zwecke erforderlich ist.

#### 1.4.5 Lösemittel (2.F.5)

Dieser Anwendungsbereich von HFKW und FKW wird für diesen Bericht nicht näher betrachtet. Die Methodik zur Berechnung der Emissionen ist im Nationalen Inventarbericht (NID) veröffentlicht. Die Emissionen sind aggregiert mit anderen vertraulichen Emissionen unter 2.H.3 im Anhang aufgeführt.

## 1.5 Sonstige Produktherstellung und -verwendung (2.G)

Die Quellgruppe 2.G umfasst maßgeblich die Emissionen von SF<sub>6</sub>. Diese werden im Nationalen Inventarbericht (NID) veröffentlicht. An dieser Stelle berichten wir die HFKW-Emissionen aus ORC-Anlagen (Sektor 2.G.4). Die ebenfalls unter 2.G. berichteten Daten zu Sportschuhen und medizinischen und kosmetischen Anwendungen werden vertraulich unter 2.H.3 zusammengefasst, aber an dieser Stelle beschrieben. Weiterhin enthält dieses Kapitel eine Inventarverbesserung aus dem Bereich 2.G.

### 1.5.1 FKW aus sonstiger Produktverwendung (2.G.2) Adiabatische Anwendungen – Sportschuhe (2.G.2.d)

SF<sub>6</sub> war für eine gewisse Zeit in den Sohlen verschiedener Sportschuhe enthalten. Der FKW-218 hat dieses zwischen 2004 und 2006 ersetzt. Da man von einer durchschnittlichen Lebensdauer von drei Jahren ausging, kam es im Jahr 2007 zu Entsorgungsemissionen dieser Schuhe. Das Jahr 2009 stellte somit das letzte Jahr mit Emissionen dar.

### 1.5.2 Sonstige: medizinische und kosmetische Anwendungen (2.G.2.e)

Perfluordecalin (PFD; C<sub>10</sub>F<sub>18</sub>) muss seit 2013 berichtet werden und findet in kosmetischen und medizinischen Anwendungen Verwendung, was auf sein ursprüngliches Einsatzgebiet als FKW-basiertes Blutersatzmittel zurückzuführen ist. Der britische Hersteller F2 Chemicals vertreibt Perfluordecalin unter dem Produktnamen „Flutec PP6“. Seit dem Jahr 2000 erfolgt die Einfuhr von C<sub>10</sub>F<sub>18</sub> nach Deutschland. Die jährlich als Bulkware importierten Mengen von C<sub>10</sub>F<sub>18</sub> wurden uns vertraulich vom Hersteller F2 Chemicals aus dem Vereinigten Königreich bereitgestellt. Sie sind dem Umweltbundesamt bekannt, können hier jedoch aus Gründen der Vertraulichkeit nicht wiedergegeben werden.

Pro Artikel beträgt die Einsatzkonzentration von Perfluordecalin 0,1%. In allen genannten Anwendungsbereichen von Perfluordecalin ist aufgrund der hohen Verdampfungsrate dieses Stoffes mit vollständigen Emissionen zu rechnen.

### 1.5.3 ORC-Anlagen (2.G.4)

#### HFKW

Der Organic Rankine Cycle (ORC) ist ein Verfahren zur Erzeugung von elektrischem Strom, bei dem verschiedene Arbeitsstoffe verwendet werden, die anstelle von Wasser bei geringeren Temperaturen verdampfen. Bei Geothermieranlagen kommen häufig Kohlenwasserstoffe wie Isobutan zum Einsatz. Seit 2011 werden in geothermischen ORC-Anlagen HFKW verwendet (HFKW-365mfc oder HFKW-245fa; zuvor auch HFKW-134a und FKW C<sub>5</sub>F<sub>12</sub>).

Aufgrund neuer Erkenntnisse zu Marktanteilen von einzelnen Unternehmen, hat sich der Inlands-Neuverbrauch von HFKW-245fa in den Jahren 2018 bis 2023 verringert, weshalb auch der Bestand gesunken ist. Außerdem wurden die Arbeitsmittel uHFCKW-1224yd, uHFCKW-1233zd und uHFKW-1234ze für diesen Zeitraum in das Inventar aufgenommen. Die Mengen werden in Kapitel 2 berichtet.

Die Branche zeigt sich in Bezug auf ungesättigte HFKW gespalten. Denn zum einen sind diese durch die PFAS-Problematik möglicherweise nicht mehr zukunftsfähig und zum anderen sind sie sehr teuer. In großen Megawatt-Anlagen werden Turbinen eingesetzt und die Füllmengen bewegen sich bei mehreren Tonnen. Hier ist der Preis des Arbeitsmittels von großer Bedeutung, zumal es sich bei ORC-Anlagen im Gegensatz zu Großwärmepumpen meist um private Betreiber handelt und der Preisdruck deutlich höher ist. Die Branche versucht aber, die Nutzung von

HFKW zu verringern. Generell kommen die uHFKW in mittelgroßen und kleinen Anlagen zum Einsatz, also mit Leistungen von unter 1 MW. Auch ORC-Anlagen mit Isobutan und Pentan für Hochtemperatur-Industrieanwendungen finden sich im Einsatz. Bei großen Füllmengen und niedrigeren Temperaturen wird jedoch nach wie vor auf HFKW-245fa gesetzt. In der EU besteht zwar die Nachfrage nach Alternativen zu HFKW, allerdings ist im Allgemeinen kein starkes Marktwachstum im Bereich ORC festzustellen.

Die Emissionen des Jahres 2024 aus Befüllung und Betrieb von ORC-Anlagen schätzen wir auf knapp 29 t (nur HFKW).

#### **FKW**

Der Stoff Perfluorpentan ( $C_5F_{12}$ ) unterliegt ebenfalls der UNFCCC-Berichterstattung. Die potenziellen Einsatzgebiete waren Lösemittel zur Präzisionsreinigung, Kontrastmittel und als Wärmeüberträger. Die Anwendungen spielen in Deutschland nach unseren Recherchen aber keine Rolle mehr.

$C_5F_{12}$  wurde aber ab 2003 als Arbeitsfluid in einer ORC-Anlage verwendet (Füllmenge 450 kg), deren Außerbetriebnahmen im Jahr 2010 stattfand. Die Emissionen im Betrieb dieser Anlage beliefen sich in der aktiven Zeit auf knapp 20 kg pro Jahr.

### **1.6 Andere Bereiche (2.H.3)**

In dieser Quellgruppe werden alle Anwendungen berichtet, welche der Vertraulichkeit unterliegen. Dazu gehören die Chemische Produktion (2.B.9) 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 Kosmetik- und Medizinprodukt. Die Anwendungsbereiche sind, soweit möglich, bereits in den vorherigen Kapiteln beschrieben. Zudem findet sich eine Übersicht der Quellgruppen, zu berichteten Gase und welche davon Gegenstand dieses Berichts sind in Tabelle 3. Die Daten zu 2.H.3 befinden sich in der entsprechenden Tabelle im Anhang.

## 2 Fluorierte Treibhausgase für die freiwillige Berichterstattung

Die vorherigen Kapitel enthalten die unter der Klimarahmenkonvention (UNFCCC) verpflichtend zu berichtenden Gase. Der Artikel 26 der aktuellen EU F-Gas-Verordnung (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2024) fordert eine Berichterstattung zusätzlicher fluoriertes Treibhausgase, soweit sie im Anhang I, II oder III der Verordnung aufgelistet sind, nämlich:

- ▶ Perfluor-2-methylpentan FKW-4-1-14 (R-41-14)
- ▶ ungesättigte teil(chlor)fluorierte Kohlenwasserstoffe,
- ▶ fluorierte Ether inklusive teilfluorierter Ether (HFE) und perfluorierter Polyether (PFPMIE),
- ▶ fluorierte Ether, Ketone und Alkohole und andere fluorierte Verbindungen

Die Berichtspflicht gegenüber der EU-Kommission betrifft jedoch nicht einzelne EU-Mitgliedstaaten, sondern die Unternehmen, die solche Stoffe in der EU herstellen, importieren oder exportieren. Die angegebenen Mengen sind nicht länderspezifisch aufgeschlüsselt, sondern beziehen sich auf die gesamte EU.

Für Deutschland hat das Umweltbundesamt festgelegt, diese Stoffe ebenfalls zu erfassen, die Daten in der Datenbank „Zentrales System Emissionen“ (ZSE) zu speichern und an die UN zu berichten. Auch für die freiwillig berichteten Gase sollen die Aktivitätsraten, Neuverbrauch, Bestand und Entsorgungsmengen sowie die dazu gehörigen Emissionen abgeschätzt werden, und zwar ab dem ersten Einsatzjahr bis zur Gegenwart.

Die Einsatzbereiche fast aller zusätzlichen Substanzen sowie Zeitreihen ihrer Aktivitätsdaten und Emissionen wurden von Öko-Recherche im November 2015 erstmals in einer Studie für das Umweltbundesamt zusammengefasst (Gschrey et al. 2015). Auf dieser Basis wurden ab 2016 entsprechende Daten in die Berichterstattung integriert. Im vorliegenden Bericht liefern wir die Daten für die Jahre 2023 und 2024.

Aus Vertraulichkeitsgründen werden die Emissionen häufig nur aggregiert und in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten angegeben.

### 2.1 Perfluor-2-methylpentan - FKW-4-1-14 (R-41-14)

Als Inventarverbesserungen werden Anwendungen von F-Gasen, wenn nötig, in das deutsche Inventar integriert, die gemäß der EU F-Gas-Verordnung 2024/573 neu berichtspflichtig sind. Hierzu zählt der FKW-4-1-14 (R-41-14) / Perfluor-2-methylpentan (GWP 7370). Es handelt sich um eine hochspezialisierte fluorierte Verbindung, die in Deutschland ausschließlich in der Forschung und Spezialanalytik eingesetzt wird. Aufgrund ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften – insbesondere chemischer Trägheit, hoher Dichte und geringer Polarität – eignet sich die Substanz hervorragend als Lösemittel für hochpräzise Anwendungen in geringen Mengen, typischerweise im Milliliter- bis Grammbereich. Perfluor-2-methylpentan ist toxisch und führt bei Kontakt zu schweren Irritationen.

Die Hauptanwendungsfelder liegen im analytischen und physikalisch-chemischen Laborbereich. Dazu zählen unter anderem die hochauflösende Massenspektrometrie (HR-MS) sowie Multikern-NMR-Experimente, bei denen Perfluor-2-methylpentan als Lösemittel zur Stabilisierung und Analyse empfindlicher Moleküle verwendet wird. In der biologischen

Forschung dient es als Medium zur Aktivierung von Interferon oder zur Unterstützung bei der Plasmidaktivierung, während es in der elektrochemischen Analytik, insbesondere bei der elektrochemischen Impedanzspektroskopie zur Untersuchung von Protonierungsprozessen und Leitfähigkeit eingesetzt wird.

Darüber hinaus findet die Substanz Anwendung in der Strukturanalyse mittels Röntgenkristallographie, bei der sie zur Bestimmung von Molekülstrukturen schwer kristallisierbarer Stoffe beiträgt. Ein weiterer wichtiger Verwendungszweck ist ihre Rolle als Lösemittel für schwer lösliche Substanzen in der Grundlagenforschung und Spezialchemie.

Die Verbindung ist nicht für den industriellen Einsatz gedacht und kommt nicht in größeren Produktionsprozessen vor. Stattdessen beschränkt sich ihre Verwendung auf spezifische, forschungsnahe Fragestellungen – mit einer entsprechend geringen Verbreitung und sehr kleinen Mengen in Deutschland; Verkaufsmengen liegen im einstelligen oder niedrigen zweistelligen Grammbereich. Die Verwendung und die Emissionen liegen derzeit im vernachlässigbaren Bereich von wenigen Kilogramm pro Jahr, daher werden sie nicht in das deutsche Inventar aufgenommen. Sollten nicht neue Anwendungsfelder gefunden werden, wird die Menge nicht signifikant steigen.

## 2.2 Ungesättigte teil(chlor)fluorierte Kohlenwasserstoffe

Die zunehmende Verwendung von ungesättigten, teil(chlor)fluorierten Kohlenwasserstoffen (uHFKW und uHFCKW) wird seit Jahren wissenschaftlich erforscht und hat aufgrund des Potenzials mancher dieser Stoffe zur Bildung von Trifluoressigsäure (TFA) zu weitreichenden Bedenken geführt. Möglicherweise werden in den nächsten Jahren einige Substanzen neuen Regelungen für PFAS unterliegen. Darüber hinaus wird der mögliche Beitrag dieser Stoffgruppen zur Bildung von langlebigen Treibhausgasen wie dem HFKW-23 durch Ozonolyseprozesse in der Atmosphäre untersucht, was neue Bedenken hervorruft (McGillen et al 2023).

Hierzulande werden bisher zwei Reinstoffe in relevanten Mengen eingesetzt: uHFKW-1234yf (GWP 1 (AR5); GWP 4 (AR4)) und 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 Kaltwassersätzen. Daneben kommen drei Stoffe in geringeren Mengen vor, nämlich der uHFCKW-1233zd(E), uHFCKW-1224yd(Z) und uHFKW-1336mzz(Z).

Wie bereits beschrieben, wird der uHFKW-1234yf seit 2017 in Pkw-Klimaanlagen als Alternative zu R-134a eingesetzt. Ab dem Jahr 2018 waren in Deutschland alle neu zugelassenen klimatisierten Fahrzeuge mit R-1234yf ausgestattet. Der inländische Bestand von R-1234yf in Fahrzeugklimaanlagen lag im Jahr 2024 bei 12.866 t (zum Vergleich R-134a: 14.290 t).

Auch für Gruppe 1 der kleinsten Gewichtsklasse der Nutzfahrzeuge (N1) gilt die MAC-Richtlinie (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2006a). Daher werden seit 2016 zunehmend auch N1-Nutzfahrzeuge mit R-1234yf klimatisiert.

Der uHFKW-1234ze(E) wird seit 2013 als Reinstoff-Kältemittel in stationären Anwendungen, insbesondere in Kaltwassersätzen, verwendet. Darüber hinaus ist in Turbochillern der chlorhaltige Stoff uHFCKW-1233zd(E) eingeführt worden.

Nicht als Reinstoff, sondern als Mischungskomponente werden R-1234yf und R-1234ze bisher in mehreren kommerziell verfügbaren Kältemitteln eingesetzt, die in Tabelle 14 aufgeführt sind.

**Tabelle 14: Anteile von R-1234yf und R-1234ze in Kältemittelmischungen [%]**

Kältemittel	GWP AR5	Anteil R-1234yf (GWP AR5 1)	Anteil R-1234ze(E) (GWP AR5 1)
R-448A	1.273	20%	7%
R-449A	1.282	25%	-
R-452A	1.945	30%	-
R-450A	547	-	58%
R-454B	467	31%	-
R-454C	146	78,5%	-
R-455A	146	75,5%	-
R-513A	573	50%	-
R-515B	299		91,1%

Mengenmäßig sind R-449A und R-448A am relevantesten. Allerdings haben die Mengen in den letzten Jahren bereits wieder stark abgenommen, für diese Anlagen eine kürzere Lebensdauer besteht und die GWP-Werte sehr hoch sind, weshalb sie nicht mehr im Bereich Gewerbekälte eingesetzt werden.

R-452A wurde im Jahr 2015 zum ersten Mal in großem Maßstab in Kühlfahrzeugen verwendet. Alle Hersteller haben inzwischen ihre neuen Anlagen auf R-452A umgestellt. R-452A wird zudem seit 2018 in Kühlcontainern verwendet.

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

R-513A wird nicht nur in Kaltwassersätzen eingesetzt, sondern ebenfalls in Kühlcontainern, gewerblichen Spülmaschinen und Verflüssigungssätzen. In Kaltwassersätzen werden außerdem R-454B und R-515B genutzt. R-515B ist neben R-450A, der in gewerblichen Spülmaschinen Anwendung findet, der einzige neue Blend, der R-1234ze(E) enthält.

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

Die drei uHF(C)KW uHFCKW-1233zd(E), uHFCKW-1224yd (Z) und uHFKW-1234ze(E) werden in ORC-Anlagen als Arbeitsmedium verwendet.

Die folgende Tabelle 15 zeigt die Emissionen ungesättigter HFKW in Tonnen je Sektor und kt CO<sub>2</sub>-Äquivalenten in der Summe. Die Mengen sind seit der Einführung der Stoffe deutlich gestiegen und ohne Verbote ist auch für die Zukunft mit einem deutlichen Wachstum zu rechnen, da die GWP-Werte sehr niedrig sind.

**Tabelle 15: Emissionen ungesättigter HFKW in Tonnen und kt CO<sub>2</sub>-Äquivalenten 2012, 2015, 2017, 2022-2024**

Substanz	Sektor	2012	2015	2017	2022	2023	2024
uHFKW-1234yf	Pkw	0,3	33,9	320,5	1070,1	1184,3	1298,9
uHFKW-1234yf	Nutzfahrzeuge N1	-	-	0,21	18,27	25,16	31,95
uHFKW-1234yf	R-448A, R-449A Supermärkte	-	1,08	7,4	11,227	9,003	5,434
uHFKW-1234yf	R-449A Verflüssigungssätze	-	-	0,18	1,11	1,31	1,48
uHFKW-1234yf	R-452A Kühlfahrzeuge	-	0,15	1,50	10,05	11,92	13,87
uHFKW-1234yf	R-452A Kühlcontainer	-	-	-	0,07	0,10	0,14
uHFKW-1234yf	R-454B Chiller	-	-	-	0,027	0,259	0,745
uHFKW-1234yf	R-454C Verflüssigungssätze + steckerfertige Geräte	-	-	-	0,24	0,42	0,54
uHFKW-1234yf	R-455A Verflüssigungssätze + steckerfertige Geräte	-	-	-	0,68	1,20	1,56
uHFKW-1234yf	R-513A Kühlcontainer	-	-	-	0,16	0,22	0,32
uHFKW-1234yf	R-513A Spülmaschinen	-	-	-	0,00072	0,00098	0,00124
uHFKW-1234yf	R-513A Chiller	-	-	0,23	7,68	10,08	12,19
uHFKW-1234ze(E)	Verflüssigungssätze	-	-	-	0,55	0,66	0,74
uHFKW-1234ze(E)	XPS und techn. Aerosole	-	41,84	83,46	121,10	67,08	75,27
uHFKW-1234ze(E)	R-448A Supermärkte	-	0,02	0,53	0,790	0,641	0,363
uHFKW-1234ze(E)	R-450A Spülmaschinen	-	-	-	0,00010	0,00017	0,00019
uHFKW-1234ze(E)	R-515B und R- 1234ze Chiller	-	0,15	1,97	28,25	37,57	48,28
uHFKW-1234ze(E)	ORC-Anlagen	-	-	-	0,65	1,69	1,69

Substanz	Sektor	2012	2015	2017	2022	2023	2024
uHFCKW-1233zd(E)	Turbochiller	-	-	0,06	0,77	0,89	1,01
uHFCKW-1233zd(E)	ORC-Anlagen	-	-	-	0,09	0,21	0,40
uHFCKW-1233zd(E)	PU-Integralschaum	-	-	-	13,1	23,15	23,15
uHFCKW-1336mzz(Z)	PU-Integralschaum	-	-	-	46,62	61,97	61,97
uHFCKW-1224yd(Z)	ORC-Anlagen	.	.	.	0,53	0,92	0,92
<b>uHFCKW-1234yf</b>	<b>Summe Emissionen in kt CO<sub>2</sub>-Äq.</b>	<b>0,001</b>	<b>0,035</b>	<b>0,331</b>	<b>1,116</b>	<b>1,241</b>	<b>1,368</b>
<b>uHFCKW-1234ze(E)</b>	<b>Summe Emissionen in kt CO<sub>2</sub>-Äq.</b>	<b>-</b>	<b>0,042</b>	<b>0,095</b>	<b>0,151</b>	<b>0,108</b>	<b>0,126</b>
<b>uHFCKW-1233zd(E)</b>	<b>Summe Emissionen in kt CO<sub>2</sub>-Äq.</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0,00006</b>	<b>0,0140</b>	<b>0,0242</b>	<b>0,0246</b>
<b>uHFCKW-1336mzz(Z)</b>	<b>Summe Emissionen in kt CO<sub>2</sub>-Äq.</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0,02</b>	<b>0,05</b>	<b>0,06</b>	<b>0,06</b>
<b>uHFCKW-1224yd(Z)</b>	<b>Summe Emissionen in kt CO<sub>2</sub>-Äq.</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0,00053</b>	<b>0,00092</b>	<b>0,00092</b>
<b>SUMME</b>	<b>Summe Emissionen in kt CO<sub>2</sub>-Äq.</b>	<b>0,001</b>	<b>0,077</b>	<b>0,446</b>	<b>1,332</b>	<b>1,434</b>	<b>1,580</b>

GWP nach AR5 für alle uHF(C)KW 1

## 2.2.1 Inventarverbesserung: Neue ungesättigte teil(chlor)fluorierte Kohlenwasserstoffe

In der neuen EU F-Gas-Verordnung wurden weitere Gase in die Berichterstattung gemäß Artikel 26 aufgenommen. Hierzu zählen auch ungesättigte HFKW und HFCKW, nämlich HFCKW-1224yd(Z), HFKW-1132a und HFCKW-1233xf.

### 2.2.1.1 cis-1-Chlor-2,3,3,3-Tetrafluorprop-1-en (uHFCKW-1224yd(Z))

uHFCKW-1224yd(Z) (R-1224yd(Z)), ein Hydro-Chlor-Fluor-Olefin (HCFO), wurde vom japanischen Glas- und Chemikalienhersteller AGC Asahi Glass, Tokio/Japan, als nicht brennbares A1-Kältemittel entwickelt und wird unter dem Namen „Amolea“ vermarktet. In Europa wurde das Kältemittel auf der Chillventa 2018 erstmals vorgestellt. Dieses Niederdruckkältemittel wird als Alternative zu HFKW-245fa und HFCKW-123 für die Rechenzentrums Kühlung, in Zentrifugal- und Turbochillern, Hochtemperaturwärmepumpen sowie für Organic Rankine Cycle (ORC)-Systeme angeboten.

Bisher spielt dieses Kältemittel in Deutschland und Europa keine große Rolle, was sich jedoch bald ändern könnte. Aktuelle Unsicherheiten auf dem Kältemittelmarkt hängen mit der Revision der REACH-Verordnung zusammen (siehe Kapitel 1.4.1.2).

In Untersuchungen der TU-München wurde der Vergleich zwischen R-245fa und R-1224yd(Z) gezogen (Dawo 2021). Ergebnis dieser Untersuchungen war, dass R-1224yd(Z) eine

vergleichbare Effizienz über einen weiten Betriebsbereich wie R-245fa zeigte, bei gleichzeitig besserer Materialverträglichkeit als andere Alternativen wie R-1233zd(E). Beide uHFKW werden in Deutschland bereits in ORC-Anlagen eingesetzt.

### 2.2.1.2 1,1-Difluorethen (uHFKW-1132)

Der ungesättigte uHFKW-1132 wurde von Daikin entwickelt und kann in drei Isomeren vorkommen, welche die gleiche chemische Zusammensetzung aufweisen, sich aber in der Anordnung ihrer Atome unterscheiden. Die drei Formen sind uHFKW-1132(E), uHFKW-1132(Z) sowie uHFKW-1132a, das von Koura als Kältemittel bei ASHRAE registriert wurde. Der uHFKW-1132(E) als Reinstoff mit hoher Dichte ist zu instabil, um als Kältemittel verwendet zu werden (Danfoss 2025). Zu uHFKW-1132(Z) gibt es nur Informationen zur Synthese, es sind keine Anwendungen bekannt.

Bei R-1132a handelt es sich um ein A2-Kältemittel, das auch als Ausgangsstoff in der Produktion von Fluorpolymeren eingesetzt wird. Hierbei ist es ein wichtiger Rohstoff in der Kunststoff- und Chemieindustrie, vor allem für die Herstellung von Polyvinylidenfluorid (PVDF), auch bekannt als Polyvinylidene difluoride (PVF<sub>2</sub>). PVDF ist ein halb-kristallines thermoplastisches Fluorpolymer mit hoher Reinheit und einer Einsatztemperatur von bis zu 150 °C. Die Polymerstruktur besteht aus abwechselnden CH<sub>2</sub>- und CF<sub>2</sub>-Gruppen, deren Polarität zu Eigenschaften wie geringer Löslichkeit und besonderen elektrischen Eigenschaften führt.

Neben der Herstellung von PVDF wird 1,1-Difluorethen auch für die Produktion thermoplastischer oder elastomerer Copolymere, kleiner Mengen von Terpolymeren auf Basis von Tetrafluorethylen (TFE) und Hexafluorpropylen sowie als Ausgangsstoff für die Produktion des Kältemittels HFKW-143a eingesetzt.

Außerdem wird R-1132a als Komponente für spezialisiertere Kältemittel verwendet, etwa das Tieftemperaturkältemittel R-473A von Koura (60% CO<sub>2</sub>, 20% R-1132a, 10% R-23, 10% R-125; GWP-Wert 1.830). Im Jahr 2024 wurde auch erstmals von R-485A als Kältemittel-Alternative zu R-744 (CO<sub>2</sub>) berichtet, das ebenfalls von Koura entwickelt wurde und sich aus 69% CO<sub>2</sub>, 10% R-1132a und 21% R-32 zusammensetzt (GWP-Wert 143). Hierbei unterliegt keine der verwendeten Komponenten der PFAS-Definition im Kontext der Revision der REACH-Verordnung. Außerdem wird die GWP-Grenze von 150 unterschritten.

Das Isomer uHFKW-1132(E) ist sowohl als Reinstoff-Kältemittel als R-1132(E) bei ASHRAE registriert und als B2-Kältemittel klassifiziert, als auch als Komponente für Blends. Daikin hat für R-1132(E) viele Patente angemeldet – für die Produktion und für dessen Anwendung in zahlreichen Kältemittelgemischen für spezielle Anwendungen. Dem Kältemittel R-474A (77% R-1234yf/23% R-1132(E), GWP <1), das für die Anwendung in Elektrofahrzeugen vorgesehen ist, wird von Seiten des Herstellers Daikin großes Potential zugestanden. Nach Unternehmensangaben werden für dieses Kältemittel auch Anwendungsmöglichkeiten in stationären Anlagen angedacht, da sich durch die strikten Quotenvorgaben der EU F-Gas-Verordnung entsprechender Bedarf für Bereiche ergibt, in denen Sicherheitsanforderungen keine A3-Kältemittel erlauben. Die Produktion von R-474A in Japan wird derzeit in großem Maßstab ausgebaut und soll nach Unternehmensangaben ab 2027 erfolgen, wobei die breite, kommerzielle Verfügbarkeit erst zum Ende der Dekade gegeben sein wird.

Die Verwendung von Kältemitteln mit uHFKW-1132 in Deutschland und Europa wird also voraussichtlich in den nächsten Jahren steigen, so dass die weitere Beobachtung dieser Stofffamilie anzuraten ist.

### 2.2.1.3 2-Chlor-3,3,3-Trifluorprop-1-en (uHFCKW-1233xf)

Der uHFCKW-1233xf (CAS 2730-62-3) tritt in der Kältemittelproduktion als Zwischenprodukt bei der Herstellung von uHFCKW-1234yf auf. Es wird aufgrund des niedrigen Treibhauspotenzials von <1 als umweltfreundliches Kälte- und Treibmittel bzw. Komponente von Gemischen angesehen und spielt unserer Kenntnis nach bisher außerhalb der Kältemittelproduktion keine kommerzielle Rolle.

## 2.3 Teilfluorierte Ether (HFE)

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

### 2.3.1 HFE in der Industrie

Die HFE für industrielle Anwendungen umfassen im Wesentlichen vier Produkte der „7000er“-Serie: HFE-7100, HFE-7200, HFE-7300 und HFE-7500. Die GWP-Werte variieren von 57 (AR5) für HFE-7200 bis zu 425 (AR5) für HFE-7300. Der GWP des HFE-7100 nach AR5 beträgt 410. In den meisten Anwendungen sind mehrere HFE-Typen gleichzeitig vorhanden.

In der Vergangenheit kam außerdem der sogenannte H-Galden zur Anwendung. Es handelt sich um eine Gruppe von mehreren Einzelsubstanzen, die sich in ihren Siedepunkten unterscheiden. H-Galden, das als Ersatz für perfluorierte Polyether (PFPE) aus der „Galden“-Reihe entwickelt wurde, hat ein hohes GWP von 2.820 (AR5), während PFPE einen noch höheren GWP von 9.710 (AR5) aufweisen. Allerdings gelang es H-Galden nicht, sich am Markt zu behaupten, weshalb die Produktion 2011 eingestellt wurde. In der Halbleiterindustrie wurde H-Galden ausschließlich als Wärmeüberträger-Flüssigkeit in geschlossenen Systemen verwendet, nicht in offenen Anwendungen.

#### 2.3.1.1 Offene Anwendungen in der Industrie

HFE der „7000er“-Reihe finden Verwendung in Schmierstoffen, bei der Präzisionsreinigung sowie bei der Oberflächenbeschichtung von Elektronikbauteilen. Diese Anwendungen sind in der deutschen Industrie recht verbreitet.

#### **Lösemittel für Polymere zur Oberflächenbeschichtung in der Elektronik**

In der Produktion werden bestückte Leiterplatten, elektronische Bauelemente oder verschiedene Festplattenkomponenten häufig mit einem Schutzfilm versehen, um Feuchtigkeit und bestimmte Lösemittel abzuweisen. Der Schutzlack enthält 2 bis 15% Feststoff (ein fluorhaltiges Acrylatpolymer), der in einer Lösung von 85 bis 98% HFE-7100 oder HFE-7200 gelöst ist. Bei der Anwendung verdunstet das Lösemittel, was bedeutet, dass Verbrauch und Emissionen identisch sind. Der Verbrauch bzw. die Emission von HFE in dieser Anwendung betragen im Jahr 2024 etwa 7 kt CO<sub>2</sub>-Äquivalente.

#### **Trägerflüssigkeit für Schmierstoffe**

Die Verwendung als Trägermittel bzw. Lösemittel für Schmierstoffe stellte 2024 mit 10,6 kt CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (vor allem HFE-7100, HFE-7200 und HFE-7300) den größten Posten des Absatzes dar.

#### **Lösemittel in der Oberflächenreinigung**

In Deutschland sind fluorierte Medien in der Präzisionsreinigung, im Gegensatz zu den USA, Japan oder Frankreich, nur von geringer Bedeutung. In Deutschland wurden seit 2005 Reinigungsanlagen eingeführt, die HFE enthalten, meist HFE-7100. Im Jahr 2024 sind die

jährlichen Einsatzmengen in Deutschland deutlich gestiegen und betragen etwa 5,8 kt CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Tabelle 16 zeigt die Emissionen von HFE (-7100, -7200, -7300, -7500) aus offenen industriellen Anwendungen in kt CO<sub>2</sub>-Äquivalenten.

**Tabelle 16: Emissionen von HFE (-7100, -7200, -7300, -7500) aus offenen industriellen Anwendungen [kt CO<sub>2</sub>-Äquivalente] 2000-2024**

Offene HFE-Anwendungen	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
Summe [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	1,47	8,99	12,01	15,99	16,53	23,62	23,62

### 2.3.1.2 Geschlossene Anwendungen in der Halbleiter- und sonstigen Industrie

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

Die Halbleiterindustrie ist das Hauptanwendungsfeld der HFE. Fluorierte Wärmeüberträger kommen dort in vielen Phasen der Wafer-Produktion zum Einsatz. HFE finden auch in verschiedenen anderen industriellen Anwendungen, die mit konstanten Temperaturen arbeiten, Verwendung, jedoch in geringerem Ausmaß.

Die Emissionsabschätzung ist in der folgenden Tabelle 17 dargestellt. Aufgrund der Vertraulichkeit sind die Werte der HFE-7000er-Reihe (Durchschnitts-GWP: 301(AR5)) und von H-Galden (GWP: 2.820 (AR5)) zusammengefasst.

**Tabelle 17: Wärmeübertragung: HFE-Emissionen in der Halbleiter- und sonstigen Industrie [kt CO<sub>2</sub>-Äquivalente] 2000-2024**

Geschlossene HFE-Anwendungen	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
Summe [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	0,54	1,76	2,47	2,31	1,85	1,93	1,97

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

### 2.3.1.3 Inventarverbesserung HFE-Wärmeüberträger

Die Firma 3M meldete uns bisher auf freiwilliger Basis die Summe der Verkäufe der HFE, getrennt nach offenen und geschlossenen Anwendungen, aber nicht nach den einzelnen Substanzen der Reihe. Aufgrund des derzeit diskutierten Verbotes von Per- und Polyfluoralkylsubstanzen (PFAS) in Europa, hohen Schadensersatzklagen in den USA und den nachgewiesenen Umweltbelastungen in der Umgebung des Werkes in Zwijndrecht in den Niederlanden hat der Konzern 3M allerdings angekündigt, bis 2025 vollständig aus der Produktion aller Fluorpolymere, fluorierten Flüssigkeiten sowie PFAS-basierten Additivprodukte auszusteigen. Die Produktion in den Niederlanden ist bereits eingeschränkt und bis zum Sommer 2024 sollten alle Endprodukte, die PFAS enthalten, vom Werksgelände verschwunden sein. Die Stoffe werden mittlerweile auch von anderen Herstellern angeboten und vertrieben. Da es sich nun um eine Vielzahl von Herstellern bzw. Betriebskanälen handelt, u.a. auch aus China, und die Daten sehr vertraulich behandelt werden, ist es bisher nicht gelungen, alternative Datenquellen für diesen Bereich zu etablieren. Für den Bereich Halbleiter würde es sich anbieten, über die Nutzer der Stoffe an Daten zu gelangen, da die Unternehmen bekannt sind und ihre Anzahl überschaubar ist. Generell ist es allerdings so, dass der Markt für

diese Stoffe gerade dabei ist, sich aufgrund des Rückzugs von 3M neu zu sortieren, daher ist es sinnvoll, die Recherche in ein bis zwei Jahren zu wiederholen, wenn sich einige Marktteilnehmer etabliert haben.

## 2.3.2 HFE als Narkosegase in der Medizin

### 2.3.2.1 Humanmedizin

In der Humanmedizin kommen in Deutschland drei fluorierte Narkosemittel für inhalative Vollnarkosen zum Einsatz. Die Anteile wurden seit 2014 wie folgt als stabil angenommen: Sevofluran (> 65% der Fälle), Desfluran (> 32%) und Isofluran (< 3%). Durch Gespräche mit Experten aus Praxis und Industrie hat sich ergeben, dass die Verteilung der Anteile entsprechend Tabelle 18 aktualisiert werden muss.

**Tabelle 18: Anteile Narkosemittel [%] 2018-2024**

Anteil Narkosemittel	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Desfluran	32	27	22	17	12	7	5
Sevofluran	65	68	73	78	83	88	90
Isofluran	5	5	5	5	5	5	5

Laut neuer EU F-Gas Verordnung ist die Nutzung von Desfluran ab dem 01.01.2026 verboten.

Messungen aus dem Jahr 2015, auf dem Jungfraujoch in der Schweiz, zeigten bereits relevante Konzentrationen aller drei Gase in der Atmosphäre (Reimann et al. 2018).

Isofluran ist als einzige der derzeit eingesetzten Substanzen nicht nur fluorhaltig, sondern enthält auch Chlor. Daher handelt es sich nicht um ein HFE, sondern um ein HCFE, das zur Schädigung der Ozonschicht beiträgt. Tabelle 19 zeigt die chemischen und ökologischen Kenndaten der fünf halogenierten Narkosegase; Halothan kommt bereits seit 2000 nicht mehr in Deutschland zum Einsatz, Enfluran seit 2006.

**Tabelle 19: Chemische und ökologische Kenndaten der fünf halogenierten Narkosegase**

Name	Chemische Formel	Industrielle Bezeichnung	ODP	GWP-Werte*	Atmosphärische Lebensdauer (Jahre)
Halothan	$C_2HBrClF_3$	(kein Ether)	1,56	41	1,0 <sup>a</sup>
Enfluran	$C_3H_2ClF_5O$	HCFE-235ca2	0,04	583	8,2 <sup>b</sup>
Isofluran	$CHF_2OCHClCF_3$	HCFE-235da2	0,03 <sup>b</sup>	491	3,2 <sup>c</sup>
Desfluran	$CHF_2OCHF_3$	HFE-236ea2	-	1.790	14 <sup>d</sup>
Sevofluran	$CH_2FOCH(CF_3)_2$	HFE-347mcc3	-	216	1,1 <sup>d</sup>

\* 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.

„Emissionen fluoriertes Treibhausgas in Deutschland 2013“ (Zeiger et al. 2015) bietet detaillierte Erklärungen zur Berechnung der Emissionen, einschließlich Quellen und Eingabewerten.

Die Emissionen für den Berechnungszeitraum, basierend auf dem jährlichen Verbrauch und den Emissionsraten der einzelnen Gase, sind in Tabelle 20 dargestellt.

**Tabelle 20: Emissionen der halogenierten Narkosegase in Deutschland [t] 1990-2024 unter Einbeziehung ihrer Metabolisierungsraten**

Substanz	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
Desfluran	-	-	31,6	65,0	103,0	102,7	68,1	22,7	16,2
Sevofluran	-	-	15,2	31,8	50,8	69,4	75,6	94,53	96,68
Isofluran	8,7	21,4	19,9	15,6	9,1	4,0	3,9	4,0	4,0
Enfluran	20,4	19,1	13,9	4,7	-	-	-	-	-
Halothan	6,2	4,1	-	-	-	-	-	-	-
<b>Summe [t]</b>	<b>35,3</b>	<b>44,6</b>	<b>80,5</b>	<b>117,1</b>	<b>162,9</b>	<b>176,0</b>	<b>146,9</b>	<b>121,2</b>	<b>116,9</b>

In Tabelle 21 sind die klimawirksamen Emissionen der vier Narkosegase auf Ether-Basis, d.h. ohne Halothan, enthalten. Die Emissionen von HCFE und HFE als Narkosegase in der Humanmedizin betragen im Jahr 2024 ca. 52 kt CO<sub>2</sub>-Äquivalente.

**Tabelle 21: Emissionen der halogenierten Narkosegase in Deutschland [kt CO<sub>2</sub>-Äquivalente] 1990-2024 – ohne Halothan**

Substanz	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
Desfluran	-	-	56,5	116,3	184,3	183,8	121,7	40,5	28,9
Sevofluran	-	-	3,3	6,9	11,0	15,0	16,2	20,4	20,9
Isofluran	4,3	10,5	9,8	7,7	4,5	2,0	1,9	2,0	2,0
Enfluran	11,9	11,1	8,1	2,8	-	-	-	-	-
<b>Summe [kt CO<sub>2</sub>-Äq.]</b>	<b>16,1</b>	<b>21,8</b>	<b>77,6</b>	<b>133,6</b>	<b>199,8</b>	<b>200,7</b>	<b>139,8</b>	<b>62,9</b>	<b>51,8</b>

### 2.3.2.2 Inventarverbesserung HFE-Narkosegase in der Tiermedizin

#### Allgemeine Tiermedizin

Wie auch in der Humanmedizin finden Narkosen für Operationen im Bereich Tiermedizin mittels Inhalationsnarkosen statt. Hierbei wird vor allem Isofluran als Anästhetikum verwendet. Es sind fünf Produkte in Deutschland zugelassen. Isofluran wird erst seit Ende der 1990er Jahre eingesetzt; die erste Zulassung stammt aus 1998, andere folgen weitaus später um 2006. Auch ein Sevofluran-Produkt hat in Deutschland die Zulassung für die Inhalationsnarkose bei Hunden. Desfluran wird im Bereich Tiermedizin in Deutschland nicht genutzt, in anderen Ländern allerdings schon. Da seit dem 1. Januar 2021 die betäubungslose Ferkelkastration in

Deutschland verboten ist, wird auch in diesem Bereich nun Isofluran als Narkosegas eingesetzt. Die Produkte sind verschreibungspflichtig, daher erfolgt der Verkauf ausschließlich an Tierärzte und durch diese an Landwirte mit Sachkundenachweis.

Die Anzahl der Heimtiere, also Hunde, Katzen, Kleintiere, Vögel und Fische, ist in den letzten Jahren deutlich gestiegen, von ca. 20 Millionen im Jahr 2000 auf ca. 34 Millionen im Jahr 2024. Neben OPs bei Hunden und Katzen, werden auch kleinste Heimtiere wie Mäuse tlw. mit Inhalationsnarkose mit Isofluran operiert.

Die Pferdepopulation ist nach Angaben der Deutsche Reiterlichen Vereinigung (Fédération Equestre Nationale – FN) stabil bis rückläufig. Dabei geht es um die erfassten Tiere in Sport und Zucht. Es sind vor allem diese Pferde, die bei Bedarf operiert werden. OPs finden aber ebenfalls auch bei Pferden von Hobbyreitern statt. Laut FN belief sich die Anzahl der Pferde im Privatbesitz im Jahr 2024 auf rund 1,25 Millionen. Auch das Statistische Bundesamt führt unter dem Agrarstatistikgesetz Viehbestandserhebungen durch. Hier werden für das Jahr 2024 487.000 Pferde erfasst (Statistisches Bundesamt, fortl.). Inwiefern sich diese Zahl mit der o.a. Angabe überschneidet, kann nicht ermittelt werden.

Allein aufgrund der Größe der Tiere werden für die OPs von Pferden deutlich höhere Mengen an Narkosegas verwendet, als bei Heimtieren. Zudem wird bei Hund und Katze häufig noch mit Injektionsnarkose und nicht Inhalationsnarkose gearbeitet. Inhalationsnarkosen werden vor allem bei größeren und länger andauernden Eingriffen angewendet, die oft an Kliniken durchgeführt werden.

Andere große Tiere wie Kühe, aber auch andere Nutztiere, werden generell sehr selten operiert, da die OPs teuer sind und nicht im Verhältnis zu den sehr geringen Gewinnmargen in der Landwirtschaft stehen.

Insgesamt lässt sich sagen, dass über alle Tierarten verteilt, ein Wachstum hinsichtlich der Anzahl der Population sowie der Narkosen stattgefunden hat.

Generell werden die Narkosegeräte in Tierkliniken, im Gegensatz zur Ferkelkastration, ohne Filter verwendet. Hier wird das Narkosegas, wie auch in den meisten Fällen in der Humanmedizin, zwar aus dem OP-Saal abgesaugt, um für die Sicherheit der Mitarbeitenden zu sorgen, im Anschluss aber in die Abluft entlassen.

Ein zentraler Aspekt hinsichtlich der Emissionen und der Rückgewinnung halogenierter Inhalationsnarkotika ist die Tatsache, dass diese nicht metabolisiert werden. Sie werden nahezu vollständig wieder abgeatmet, jedoch verteilt über einen Zeitraum von Stunden bis Tagen nach der Narkose. Das bedeutet, dass etwa 50% der verabreichten Dosis nicht direkt während des Eingriffs über die Filter aufgefangen werden kann. Dennoch gelingt es, insbesondere bei Ferkeln, durch geeignete Technik rund 80% des verabreichten Isoflurans zurückzugewinnen. Entscheidend für die Rückgewinnung ist dabei der Frischgasfluss: Je höher der Fluss, desto größer das Atemvolumen und damit auch die Menge des Gases, die im Filter kondensiert und aufgefangen werden kann.

### **Ferkelkastration**

Wie bereits erwähnt, ist die betäubungslose Ferkelkastration in Deutschland verboten. Stattdessen sind vier Verfahren gesetzlich zugelassen, um den Tierschutz bei der Kastration männlicher Ferkel sicherzustellen.

Die Injektionsnarkose wird bei etwa 15 bis 25% der Ferkel eingesetzt. Sie darf ausschließlich von Tierärzten durchgeführt werden, da Wirkstoffe wie Ketamin und Azaperon verwendet werden, die unter das Betäubungsmittelgesetz fallen. Diese Methode ist aufwendiger und

verursacht höhere Kosten pro Eingriff als die Inhalationsnarkose, weshalb sie seltener zur Anwendung kommt.

Die Immunokastration, bei der männliche Ferkel mit dem Impfstoff Improvac behandelt werden, macht derzeit nur etwa 1 bis 2% der Eingriffe aus. Durch zwei Injektionen wird die hormonelle Entwicklung unterdrückt, wodurch auf eine chirurgische Kastration verzichtet werden kann.

Weiterhin gibt es noch die Ebermast, bei der auf die Kastration vollständig verzichtet wird. Etwa 20-25% der Ferkel werden auf diese Weise gemästet. Das Verfahren erfordert jedoch eine sorgfältige Qualitätskontrolle, da bei geschlechtsreifen Ebern das Risiko besteht, dass sich sogenannter Ebergeruch im Fleisch entwickelt, was teilweise zu Akzeptanzproblemen beim Verbraucher führt und gerade von kleinen Schlachtereien abgelehnt wird.

Die am häufigsten eingesetzte Methode ist die Inhalationsnarkose mit Isofluran, die bei etwa 50-55% der Ferkel zur Anwendung kommt. Hierbei wird das Narkosegas durch ein spezielles Gerät verabreicht, das neben Tierärzten auch von Landwirten mit entsprechender Sachkunde bei Ferkeln bis zum 7. Lebensstag selbst bedient werden darf (Ferkelbetäubungs-Sachkundeverordnung, FerkBetSachkV, Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat 2020). Die Technische Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 525 "Gefahrstoffe in Einrichtungen der medizinischen Versorgung" schreibt dabei technische Maßnahmen zur Minimierung der Raumluftbelastung vor. Geschlossene Systeme zur Absaugung sind vorgeschrieben, dabei ist es theoretisch auch möglich, am Gerät einen Schlauch zu befestigen und die Abluft nach Außen abzulassen. Dieses Vorgehen wird nach Aussagen der Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG) aber nicht angewandt.

Es werden in diesen Geräten derzeit ausschließlich Filter der Firma ZeoSys eingesetzt. Die Vermarktung findet dabei nicht durch ZeoSys selbst statt, sondern über den Veterinärvertrieb Vetshop. Aktuell erfolgt noch keine Wiederaufbereitung des Narkosegases in Deutschland, allerdings werden die gebrauchten, von den Landwirten zurückgegebenen Filter gesammelt und zwischengelagert, da eine spätere Rückgewinnung möglich ist. Das Entnehmen und Aufarbeiten des Isoflurans aus den Filtern kann noch bis zu fünf Jahre nach Ausbau erfolgen. Derzeit baut ZeoSys einen Standort zur Rückgewinnung von Isofluran auf, welcher voraussichtlich 2026 fertig gestellt werden soll.

In Österreich hingegen wird Sevofluran bereits als recyceltes Narkosegas genutzt. Die Zulassung für den deutschen Markt wird voraussichtlich Ende des Jahres 2025 erwartet.

Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass gemäß EU-Vorgaben alle Verkaufszahlen veterinärmedizinischer Arzneimittel, einschließlich Inhalationsanästhetika wie Isofluran, Sevofluran und Desfluran von den herstellenden Unternehmen an das Union Pharmacovigilance Database (UPD) gemeldet werden müssen. In Deutschland hat das Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) Zugriff auf diese Daten und kann daraus Rückschlüsse auf Marktvolumen und Verbrauch ableiten. Das UBA plant, eine Vereinbarung mit dem BVL zu treffen, um diese Werte zukünftig für die Emissionsberichterstattung nutzen zu können.

Durch den Kontakt mit dem Bundesverband für Tiergesundheit liegen dem UBA die Mengen für das Jahr 2024 vor. Diese sind aber vertraulich. Da das Auffangen durch Filter im Bereich Ferkelkastration verpflichtend ist, ein Teil des Gases aber erst später abgeatmet wird, gehen wir von einem Emissionsfaktor von 30% aus (die oben erwähnten 80% Auffangen stellen den Idealfall dar). Da in der restlichen Tiermedizin nur sehr selten mit Filtern gearbeitet wird, gehen wir von einem Emissionsfaktor von 100% aus. Die Daten werden nach Erhalt der Verkaufszahlen des BVL aktualisiert und für die Vergangenheit berechnet.

## 2.4 Perfluorierte Polyether (PFPE)

Perfluorierte Polyether (PFPE) enthalten im Gegensatz zu vollfluorierten Kohlenwasserstoffen neben Kohlenstoff (C) und Fluor (F) auch Sauerstoff (O), jedoch keinen Wasserstoff (H), wie HFKW oder HFE (Hydrofluorether). Nur für einen PFPE, den sogenannten PPFMIE oder Galden® HT-70, legt die EU F-Gas-Verordnung (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2014) ein GWP fest, und zwar 10.300. Dieser Wert ist dem sechsten Sachstandbericht des IPCC (AR6) zu entnehmen. Der GWP für die UNFCCC-Berichterstattung beträgt 9.710, gemäß dem AR5.

Folgende Einsatzgebiete existieren für PFPE: Dampfblöten von Platinen, Wärmeüberträger in der Halbleiterbranche, Komponenten in ORC-Anlagen sowie als Träger- oder Lösemittel für Schmierstoffe bei extremen Temperatursituationen.

Die Produktgruppe wird unter dem Handelsnamen Galden vermarktet.

### 2.4.1 Mengen von PFPE

In der Vergangenheit war das Unternehmen Solvay nicht bereit, die PFPE-Lieferungen der Galden-Reihe nach Deutschland für uns zusammenzustellen. Allerdings bestätigte das Unternehmen die Eigenschätzungen, die wir 2015 vorgelegt hatten, in allgemeiner Form. Die Emissionsdaten weisen demnach eine deutlich höhere Unsicherheit auf, als die anderen Schätzungen und Berechnungen in diesem Bericht. Für die Berechnung der Klimawirksamkeit wird der AR5 verwendet, während für PFPE generell ein GWP von 9.710 zur Anwendung kommt.

### 2.4.2 Verwendung in ORC-Anlagen

Im vorliegenden Bericht wird bereits auf die Nutzung in ORC (Organic Rankine Cycle)-Anlagen eingegangen. Hier findet der PFPE Galden, genauer Galden® HT-55, zusammen mit 65% HFKW-365mfc, als 35%-Komponente im ORC-Arbeitsmittel „Solkatherm SES 36“ Anwendung.

### 2.4.3 Wärmeüberträger in der Halbleiterindustrie

Wärmeüberträger in der Halbleiterindustrie wurden bereits im Abschnitt 1.3.3 behandelt. Zusätzlich zu den freiwillig berichteten HFE und PFPEs werden auch Galden-PFPE, vor allem Galden® HT-135, verwendet. Die Menge des Einsatzes ist in den vergangenen Jahren gesunken.

### 2.4.4 Dampfphasen-Reflow-Löten von Leiterplatten mit PPFMIE (Perfluorpolymethylisopropylether)

Um Leiterplatten zu löten und eine dauerhafte Verbindung zwischen den elektronischen Komponenten und den Schaltkreisen auf der Leiterplatte herzustellen, wird das Lötmedium durch Erhitzen der gesamten Baugruppe auf 200 °C oder mehr geschmolzen (dieser Prozessabschnitt wird „Reflow“ genannt). Damit werden dauerhafte elektronische Verbindungen geschaffen. Reflow-Öfen werden durch erwärmte Luft (Konvektion), Infrarot oder Laser, teilweise auch in der Dampfphase von kochendem GALDEN-PFPE beheizt.

Beim Be- und Entladen der Kammer, wofür eine Öffnung notwendig ist, entstehen Emissionen. Weitere Emissionen können auch durch das Abdampfen der Platine entstehen.

Aus vertraulichen Gründen können die genauen Details zu den entsprechenden Parametern der Emissionsabschätzungen an dieser Stelle nicht angegeben werden (Warncke 2024).

## 2.4.5 Lösemittel in Schmierstoffen

Die niedrig siedenden PFPE der Galden®-Serie finden als Lösemittel (unter dem Handelsnamen Fomblin®) in größerem Umfang Verwendung. Zu den Anwendungsbereichen gehören die Halbleiterfertigung für Vakuumpumpen sowie die Luftfahrt, Feinwerktechnik, Textilmaschinenbau, Automobilindustrie und Druckbehälter usw. Bei der Anwendung emittieren die Lösemittel vollständig, was einem Emissionsfaktor von 100% entspricht (Warncke 2024).

## 2.4.6 Zusammenfassung der PFPE-Emissionen in Deutschland

Tabelle 22 zeigt die Summe der PFPE-Emissionen. Im Jahr 2023 traten Emissionen in Höhe von 227,7 kt CO<sub>2</sub>-Äquivalenten auf. Die Emissionen für das Jahr 2024 wurden mangels Daten fortgeschrieben.

**Tabelle 22: PFPE-Emissionen aus Wärmeübertragung, Dampfphasen-Reflow-Löten, Schmierstoffen und ORC-Anlagen in Tonnen und kt CO<sub>2</sub>-Äquivalenten 1990-2024**

Substanz	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
PFPE [t]	10,92	12,22	16,55	20,01	22,49	22,33	22,10	22,10	22,10
PFPE [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	112,2	125,4	170,0	205,6	231,4	229,9	227,7	227,7	227,7

## 2.5 Weitere stickstoffhaltige fluorierte Treibhausgase

Das deutsche F-Gas-Inventar enthält zusätzlich die Stoffe C<sub>9</sub>F<sub>21</sub>N (Fluorinert FC-3283, Perfluor-Tri-N-Propylamin; GWP 8.690 (AR4)) und C<sub>5</sub>F<sub>11</sub>NO (Fluorinert FC-3284, Perfluor-N-Methylmorpholin; GWP 8.800 (REACH-Registrierungsdossier)).

Außerdem wird die stickstoffhaltige vollfluorierte Substanz Perfluortributylamin (PFTBA, C<sub>12</sub>F<sub>27</sub>N) mit dem 3M-Handelsnamen Fluorinert FC-43 berichtet (GWP AR6: 8.490 (AR6, Forster et al. 2021)). PFTBA kann unter anderem in der Elektroindustrie, bei der Kalibrierung in der Massenspektroskopie, als Partikelzähler für Kraftstoff in Flugzeugen und in der Augenmedizin eingesetzt werden. Diese Anwendungsgebiete wurden von der Firma 3M bestätigt. Die Mengen, die verkauft wurden, wurden uns vertraulich mitgeteilt. Die Emissionen liegen bei 100%.

In der folgenden Tabelle 23 sind die Emissionen der drei Substanzen aggregiert dargestellt.

**Tabelle 23: Emissionen der drei stickstoffhaltigen fluorierten Treibhausgase C<sub>9</sub>F<sub>21</sub>N, C<sub>5</sub>F<sub>11</sub>NO und C<sub>12</sub>F<sub>27</sub>N in Tonnen und kt CO<sub>2</sub>-Äquivalenten 1990-2024**

Substanz	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
C <sub>9</sub> F <sub>21</sub> N, C <sub>5</sub> F <sub>11</sub> NO, C <sub>12</sub> F <sub>27</sub> N [t]	-	-	0,33	1,46	3,33	5,38	6,43	6,57	6,62
C <sub>9</sub> F <sub>21</sub> N, C <sub>5</sub> F <sub>11</sub> NO, C <sub>12</sub> F <sub>27</sub> N [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	-	2,87	13,00	30,15	48,25	57,49	58,67	59,10

### 2.5.1 Inventarverbesserung: Neue Gase

#### Heptafluorisobutyronnitril, Iso-C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>CN/C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N

Heptafluorisobutyronnitril (2,3,3,3-Tetrafluor-2-(trifluormethyl)-propannitril, Iso-C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>CN; GWP 2.750 (AR6)) wurde in Anhang I der überarbeiteten EU F-Gas-Verordnung 2024/573 eingefügt.

Es handelt sich um ein Fluornitril, das unter dem Handelsnamen „Novec 4710“ als Ersatzstoff für SF<sub>6</sub> in gasisolierten Schaltanlagen in den Markt eingeführt wurde.

Die Vorgaben der EU-F-Gas-Verordnung (Artikel 13(3)) erlauben allerdings den Einsatz von Iso-C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>CN über das Jahr 2035 hinaus nur in bestimmten Ausnahmefällen. Die künftige Verbreitung dieser SF<sub>6</sub>-Alternative ist noch unklar, da viele Anlagenbetreiber keine Übergangstechnologien in ihren Anlagenpark integrieren möchten. Außerdem steht eine Regulierung als PFAS im Rahmen der Überarbeitung der REACH-Verordnung im Raum.

Die geplanten Verbote von C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N sind in der Branche stark umstritten, denn bisher gibt es, außer von Siemens, die SF<sub>6</sub>-freie Lösungen anbieten (eine Mischung aus Sauerstoff und Stickstoff), keine weiteren Alternativen für den Hochspannungsbereich. Zudem hat sich „Novec 4710“ in mittlerweile vielen Neuanlagen der Hochspannung als sehr gangbar erwiesen. Es wird ausschließlich in Mischung mit O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> eingesetzt, der Anteil schwankt dabei je nach Anwendung, liegt aber im Bereich von etwa 10%. Da die Füllmengen im Bereich der Hochspannung mehrere Tonnen betragen können, steigen die Mengen deutlich an, weshalb der Stoff in das Inventar aufgenommen werden sollte.

Die Daten von SF<sub>6</sub> im Bereich der elektrischen Betriebsmittel werden dem UBA im Rahmen der Freiwilligen Selbstverpflichtung der Hersteller und Betreiber übermittelt. Es ist daher sinnvoll, auch die Erhebung der Mengen von „Novec 4710“ in diese Erfassung mitaufzunehmen.

#### **1,1,1,3,4,4,4-Heptafluor-3-(trifluoromethyl) butan-2-on, CF<sub>3</sub>C(O)CF(CF<sub>3</sub>)<sub>2</sub>**

1,1,1,3,4,4,4-Heptafluor-3-(trifluormethyl) butan-2-on (GWP 0,29) wurde in Anhang III der EU F-Gas-Verordnung 2024/573 eingefügt. Es handelt sich um ein Fluorketon, das unter dem Handelsnamen „Novec 5110“ als Ersatzstoff für SF<sub>6</sub> in gasisolierten Schaltanlagen in den Markt eingeführt wurde.

„Novec 5110“ wurde vor allem um das Jahr 2020 von einigen Unternehmen wie ABB/Hitachi in größerem Maßstab auch im Feld in der Mittelspannung eingesetzt, hat sich allerdings als nicht marktfähig erwiesen und wird daher nicht mehr in Neuanlagen verwendet. Da es nur als Mischung mit synthetischer Luft oder O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> eingesetzt wurde, mit einem Anteil von etwa 15%, und die Füllmengen in der Mittelspannung gering sind (wenige kg) dürften die im Bestand befindlichen Mengen keine nennenswerte Größe erreicht haben. Der Stoff sollte aber im Zuge der o.g. Erhebung der Vollständigkeit halber mitaufgenommen werden.

#### **2,2,3,3,3-Pentafluorpropan-1-ol (PFPOH)**

2,2,3,3,3-Pentafluorpropan-1-ol (PFPOH, GWP 34,3 (AR6)) ist ein fluorierter Alkohol, der als Spezialchemikalie vorrangig in der Gaschromatographie und ähnlichen Analysemethoden sowie in der Produktion von Pharmazeutika eingesetzt wird. Die Verwendung erfolgt in hoher Reinheit und geringen Mengen im Grammbereich, größere Gebinde können durch den Chemikalienhandel in Deutschland nicht bezogen werden (z. B. Sigma Aldrich, Fisher Scientific). Der Stoff muss daher nicht in das Inventar aufgenommen werden.

#### **1,1,1,3,3,3-Hexafluor-2-propanol (Hexafluorisopropanol, HFIP)**

1,1,1,3,3,3-Hexafluor-2-propanol (Hexafluorisopropanol, HFIP; GWP 221 (AR6)) ist ein fluorierter Alkohol, der in verschiedenen wissenschaftlichen und industriellen Bereichen eingesetzt wird. HFIP zeichnet sich durch eine hohe Löslichkeit in vielen organischen Lösungsmitteln sowie durch die Fähigkeit aus, Wasserstoffbrückenbindungen zu bilden. Dies macht es zu einem wertvollen Lösungsmittel, besonders in der chemischen Synthese, analytischen Chemie und Biochemie.

In der Forschung und Entwicklung wird HFIP häufig verwendet, um Proteine und Nukleinsäuren zu denaturieren oder deren Sekundärstruktur zu beeinflussen. Es dient zudem als Reaktionsmedium bei speziellen Polymerisationsprozessen, etwa bei der Herstellung von Fluorpolymeren.

Industrieanwendungen umfassen den Einsatz als Lösungsmittel in der Pharma- und Feinchemie sowie bei der Reinigung und Herstellung von Halbleitermaterialien. HFIP wird auch in der Elektrochemie genutzt, etwa zur Modifikation von Elektrodenoberflächen oder in speziellen Analyseverfahren. Es handelt sich um eine ätzende Flüssigkeit, die vermutlich reproduktionstoxisch wirkt sowie auf Haut und Augen schwere Verätzungen hervorrufen kann.

Aufgrund seiner besonderen Eigenschaften ist HFIP ein wertvoller, jedoch auch teurer Spezialchemikalienrohstoff, der in Deutschland und weltweit in moderaten Mengen verwendet wird. Die genaue Mengenangabe für Deutschland ist nicht öffentlich verfügbar, auch für die EU liegen bisher keine Daten vor. Jedoch gilt HFIP als wichtige Komponente in High-Tech-Anwendungen, die eine hohe chemische Reinheit und spezifische Lösungsmittelqualitäten erfordern. Mit steigender Verwendung in Branchen wie der Elektronik- und Halbleiterindustrie ist zu rechnen. HFIP wird bisher nicht in industriellem Maßstab eingesetzt. Der Stoff muss daher nicht in das Inventar aufgenommen werden.

### **2,2,3,3,4,4,5,5-Octafluorocyclopentan-1-ol, (CF<sub>2</sub>)<sub>4</sub>CH(OH)**

2,2,3,3,4,4,5,5-Octafluorocyclopentan-1-ol wurde in Anhang III der EU F-Gas-Verordnung 2024/573 eingefügt (GWP 13,6). Es wird als Cotensid bei der Synthese von Silber- und Silberiodidnanokristallen verwendet. Cotenside werden zusammen mit einem primären Tensid verwendet, um Mikroemulsionen zu stabilisieren. Tenside sind grenzflächenaktive Stoffe, die die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit verringern. (CF<sub>2</sub>)<sub>4</sub>CH (OH) wird in Deutschland ausschließlich in sehr geringen Labormengen verwendet. Der Stoff muss daher nicht in das Inventar aufgenommen werden.

### **Perfluor(2-methyl-3-pentanon), CF<sub>3</sub>CF<sub>2</sub>C(O)CF(CF<sub>3</sub>)<sub>2</sub>**

Perfluor(2-methyl-3-pentanon) (1,1,1,2,2,4,5,5,5-nonafluor-4-(trifluormethyl)pentan-3-on) wurde in Anhang III der EU F-Gas-Verordnung 2024/573 eingefügt (GWP 0,114). Dieser Stoff ist besser bekannt als Novec 1230, welcher ab 2004 von 3M als Löschmittel auf den Markt gebracht wurde. Das sich im deutschen Inventar enthaltene Löschmittel HFKW-227ea wurde mittlerweile vollständig durch diesen Stoff ersetzt.

**Tabelle 24: Mengen Erstbefüllung HFKW-227ea 2015-2024 in t**

Substanz	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
HFKW-227ea	65,41	92,08	47,85	4,72	0,10	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00

Die eingesetzten Mengen von HFKW-227ea bewegten sich in den Jahren 2008-2017 im Mittel um die 49 t und waren zwar Jahresschwankungen unterworfen, aber keinem eindeutigen Trend. Wir gehen für Novec 1230 daher von ähnlichen Mengen für die Jahre ab 2018 aus.

## 2.6 Übersicht der Emissionen der zusätzlichen F-Gase für die freiwillige Berichterstattung

Den größten Beitrag liefern PFPE mit 227 kt CO<sub>2</sub>-Äquivalenten. Dies hängt mit dem hohen GWP von 9.710 (AR5) für diese Substanzgruppe zusammen.

Die Emissionen der stickstoffhaltigen F-Gase C<sub>9</sub>F<sub>21</sub>N (GWP 8.690 (AR4)), C<sub>5</sub>F<sub>11</sub>NO (GWP 8.800 (REACH-Registrierungsdossier)) und C<sub>12</sub>F<sub>27</sub>N (GWP 8.490 (AR6)) sind für insgesamt 59 kt CO<sub>2</sub>-Äquivalente verantwortlich.

**Tabelle 25: Emissionen der vom Umweltbundesamt freiwillig berichteten zusätzlichen F-Gase nach Stoffen im Jahr 2024 [kt CO<sub>2</sub>-Äquivalente]\***

Anwendung	2024
uHFKW (1234yf, 1234ze, 1336mzz), uHFCKW-1233zd, 1224yd)	1,58
Industrielle HFE (offen und geschlossen)	25,6
HFE für Anästhesie in der Humanmedizin	51,8
PFPE	227,7
Weitere (N-haltige) FKW	59,1
<b>Summe [kt CO<sub>2</sub>-Äq.]</b>	<b>365,7</b>

\* Unter diese fällt auch SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, welches zur Containerbegasung eingesetzt wird. Dieser Stoff ist nicht Teil dieser Erhebung, sondern wird im NID unter 2.G.4 „Container fumigation“ berichtet und findet sich der Vollständigkeit halber ebenfalls im Anhang A.1.6.

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. Forschungskennzahl 3717 41 305 0. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Texte 36/2021. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/persistente-abbauprodukte-halogenerter-kaelte> (23.10.2025).

Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (2020): Verordnung zur Durchführung der Betäubung mit Isofluran bei der Ferkelkastration durch sachkundige Personen (Ferkelbetäubungssachkundeverordnung – FerkBetSachkV). [https://www.bmlh.de/SharedDocs/Gesetzestexte/DE/Isofluran\\_Verordnung.html](https://www.bmlh.de/SharedDocs/Gesetzestexte/DE/Isofluran_Verordnung.html) (29.10.2025).

Bundesverband Wärmepumpe (2023): Branchenstudie 2023: Marktentwicklung – Prognose – Handlungsempfehlungen. [https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user\\_upload/waermepumpe/08\\_Sonstige/Filedump/BWP\\_Branche\\_nstudie\\_2023\\_DRUCK.pdf](https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/waermepumpe/08_Sonstige/Filedump/BWP_Branche_nstudie_2023_DRUCK.pdf) (12.10.2025)

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.

Dawo, F., Fleischmann, J., Kaufmann, F., Schiffler, C., Eyerer, S., Wieland, C., Spliethoff, H. (2021): R1224yd(Z), R1233zd(E) and R1336mzz(Z) as replacements for R245fa: Experimental performance, interaction with lubricants and environmental impact. Applied Energy Vol. 288. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116661.

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (2023): Demonstration von klima- und umweltfreundlichen Kühlungscontainern für die Schifffahrt. <https://www.giz.de/de/projekte/greener-reefers-im-internationalen-seeverkehr> (12.10.2025).

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> (10.10.2025).

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](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_3131) (10.10.2025).

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 fluorierte Treibhausgase. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2006R0842:20081211:de:PDF> (10.10.2025).

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2006a): Richtlinie 2006/40/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Emissionen aus Klimaanlage in Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG des Rates. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0040> (29.10.2025).

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 Klimaanlage in Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG des Rates. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A32006L0040> (10.10.2025).

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

der Verordnung (EG) Nr. 842/2006. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517> (10.10.2025).

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> (10.10.2025).

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> (10.10.2025).

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2024): Verordnung (EU) 2024/573 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Februar 2024 über fluorierte Treibhausgase, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2019/1937 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 517/2014. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L\\_202400573](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202400573) (10.10.2025).

Forster, P., Storelvmo, 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. Forschungskennzahl 3711 43 324. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Climate Change 06/2015. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/massnahmen-zur-verbesserung-der-marktdurchdringung> (23.10.2025).

Gschrey, B., Behringer, D., Warncke, K. (Veröffentlichung ausstehend): Praxisnahe Rückgewinnungsfaktoren für UNFCCC F-Gas Inventare. Bestimmung praxisnaher Rückgewinnungsfaktoren für fluorierte Arbeitsmittel aus Wärmepumpen, Kälte- und Klimaanlageanlagen und elektrischen Betriebsmitteln zur Verbesserung von UNFCCC F-Gas Inventaren. Forschungskennzahl 3721 41 302 0. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Climate Change 2024.

Langbein, T., Sonntag, H., Trapp, D., Hoffmann, A., Malms, 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.

McGillen, Fried, Z., Kahn, A., Kuwata, K., Martin, C., O'Doherty, S., Peceref, F., Shallcross, D., Stanley, K., Zhang, K. (2023): Ozonolysis can produce long-lived greenhouse gases from commercial refrigerants. Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 120, No. 51. <https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.2312714120>. (12.10.2025)

Meyer Werft (fortl.): Referenzliste Kreuzfahrtschiffe. Papenburg. <https://www.meyerwerft.de/de/presse/publikationen/index.jsp> (29.10.2025).

Öko-Recherche (2025): Monitoring of the HFC quota system and the heat pump sector. [https://climate.ec.europa.eu/document/download/6a50e353-d329-4c2c-bd2c-64f4f3602403\\_en?filename=Monitoring%20of%20the%20HFC%20quota%20system%20and%20the%20heat%20pump%20sector.pdf](https://climate.ec.europa.eu/document/download/6a50e353-d329-4c2c-bd2c-64f4f3602403_en?filename=Monitoring%20of%20the%20HFC%20quota%20system%20and%20the%20heat%20pump%20sector.pdf) (29.10.2025).

REACH-Registrierungsdossier <https://echa.europa.eu/registration-dossier/-/registered-dossier/10075/5/1> (Das Dossier ist in seiner ursprünglichen Form nicht mehr erreichbar, der Wert bleibt dennoch bestehen).

Reimann, S., Vollmer, M.K., Brunner, D., Steinbacher, M., Hill, M., Henne, S., Emmenegger, L. (2018): Kontinuierliche Messung von Nicht-CO<sub>2</sub>-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> (10.10.2025).

Schwarz, W., Leisewitz, A. (1996): Aktuelle und künftige Emissionen treibhauswirksamer fluorierter Verbindungen in Deutschland. Umweltbundesamt, Berlin. <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1007/BF03038150> (27.10.2025)

Schwarz, W. (2007): Effizientere Datenerhebung für das SF<sub>6</sub>-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 fluorierter Treibhausgase (HFKW, FKW und SF<sub>6</sub>) 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> (10.10.2025).

Statistisches Bundesamt (fortl.): Erhebung bestimmter klimawirksamer Stoffe. Erscheint jährlich. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Klimawirksame-Stoffe/Tabellen/klimametrisch.html> (29.10.2025).

Statistisches Bundesamt (fortl.): Viehbestand. <https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/tierhaltung/viehbestand> (29.10.2025).

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. [https://www.bjanaesthesia.org/article/S0007-0912\(17\)33404-9/fulltext](https://www.bjanaesthesia.org/article/S0007-0912(17)33404-9/fulltext) (27.10.2025)

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 (2023b): PFAS sollen EU-weit beschränkt werden. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/pfas-sollen-eu-weit-beschaenkt-werden> (28.11.2023).

Umweltbundesamt (fortl.): Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change. National Inventory Document for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 – ongoing. (<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen>) (27.10.2025)

Umweltbundesamt (2025): Treibhausgas-Emissionen in Deutschland.

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung> (10.09.2025).

Umweltbundesamt (2025a): Trifluoressigsäure (TFA): Bewertung für Einstufung in neue Gefahrenklassen vorgelegt. <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/trifluoressigsaeure-tfa-bewertung-fuer-einstufung> (12.10.2025).

Umweltbundesamt (2025b): 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. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

<https://www.umweltbundesamt.de/dokument/treibhauspotentiale-global-warming-potential-gwp> (10.10.2025).

Verband für Schiffbau und Meerestechnik e.V. (VSM) (fortl.): Jahresbericht. Hamburg.

<http://www.vsm.de/de/service/publikation-und-medien/jahresberichte> (29.10.2025).

Warncke, K., Schwarz, W., Gschrey, B., Zeiger, B. (2016a): Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland 2014. Daten von HF(C)KW, FKW, SF<sub>6</sub>, NF<sub>3</sub>, SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub>, 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, SF<sub>6</sub>, NF<sub>3</sub>, SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub>, 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, SF<sub>6</sub>, NF<sub>3</sub>, SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub>, 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, SF<sub>6</sub>, NF<sub>3</sub>, SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub>, 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, SF<sub>6</sub>, NF<sub>3</sub>, SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub>, H(C)FE und PFPME für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für die Berichtsjahre 2019 und 2020. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Projektnummer 141272.

Warncke, K., Gschrey, B. (2024): Inventarermittlung der F-Gase 2021/2022: Daten von HF(C)KW, FKW, SF<sub>6</sub>, NF<sub>3</sub>, SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub>, H(C)FE und PFPME für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für die Berichtsjahre 2021 und 2022. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Projektnummer 173638.

Zeiger, B., Gschrey, B., Schwarz, W., Warncke, K., Volmer, R. (2015): Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland 2013, Daten von HF(C)KW, FKW, SF<sub>6</sub>, NF<sub>3</sub>, SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub>, H(C)FE und PFPME für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für das Berichtsjahr 2013. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Projektnummer 40708.

## A Emissionstabellen von HFKW und FKW für 2024 im Vergleich mit 1990, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 und 2023

### A.1 Metallproduktion (2C)

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
<b>Primäraluminiumproduktion (2.C.3)</b>								
CF <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> [t]	369,1	52,8	50,0	19,8	12,0	9,7	2,2	11,8
Emissionen FKW [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	2.596,8	371,5	352,3	141,0	85,3	69,0	15,3	84,2
<b>Magnesiumproduktion (2.C.4)</b>								
HFKW-134a [t]	-	-	0,6	8,3	16,8	5,8	8,0	5,5
Emissionen HFKW [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	-	0,8	10,8	21,8	7,5	10,4	7,2
<b>Summe Emissionen Metallproduktion [t]</b>	369,1	52,8	50,6	28,1	28,8	15,5	10,2	17,4
<b>Summe Emissionen Metallproduktion [kt CO<sub>2</sub>-Äq.]</b>	2.596,8	371,5	353,1	151,8	107,2	76,5	25,8	91,3

### A.2 Elektronikindustrie (2.E)

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
<b>Halbleiter- und Platinenproduktion (2.E.1)</b>								
HFKW-23 [t]	3,40	1,14	1,07	0,80	0,96	0,95	0,99	1,07
Emissionen HFKW [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	42,16	14,14	13,22	9,88	11,90	11,76	12,33	13,27
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> [t]	8,40	13,97	8,85	5,17	4,46	3,52	3,95	3,35
CF <sub>4</sub> [t]	9,35	20,03	13,54	8,35	8,76	8,90	9,77	9,74
C <sub>3</sub> F <sub>8</sub> [t]	0,00	3,22	4,64	2,40	1,83	1,38	1,59	0,42
c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> [t]	0,00	0,05	0,15	0,23	0,56	0,56	0,61	0,54
CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>					0,06	0,02	0,06	0,14
<b>Summe Emissionen FKW [t]</b>	17,75	37,27	27,17	16,15	15,62	14,35	15,92	14,05

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022
<b>Summe Emissionen FKW [kt CO<sub>2</sub>-Äq.]</b>	157,17	318,56	232,18	137,86	130,81	117,14	130,13	112,13

### A.3 Anwendung als ODS-Ersatzstoff (2.F)

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
--	------	------	------	------	------	------	------	------

#### 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	116,3	106,7
R-404A	-	229,5	419,4	583,4	495,9	185,1	93,1	80,0
R-407C	-	33,8	27,9	27,8	14,2	9,9	7,1	6,2
R-23	-	1,6	2,4	2,0	1,8	1,9	1,9	1,8
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	0,0	0,0
R-422D	-	-	-	-	-	-	0,0	0,0
R-152a	-	10,3	8,5	-	-	-	0,0	0,0
R-125	-	70,9	42,4	0,6	0,7	0,3	0,1	0,1
R-449A	-	-	-	-	3,8	41,7	33,5	23,2
R-448A	-	-	-	-	0,2	11,4	9,2	5,2
R-455A	-	-	-	-	-	0,5	1,6	2,1
R-454C	-	-	-	-	-	0,2	0,5	0,7
R-452A - TK	-	-	-	-	-	2,1	2,5	2,6
R-513A	-	-	-	-	-	4,5	8,5	9,6

Entsorgungsemissionen [t]

R-134a	-	43,1	51,5	55,2	51,1	41,3	37,5	37,5
R-404A	-	46,3	34,9	30,4	93,9	75,2	77,3	74,7
R-407C	-	6,5	6,9	8,9	7,3	7,7	10,4	11,3
R-23	-	-	0,3	0,9	0,8	0,7	0,8	0,9
R-116	-	-	-	0,04	0,04	0,1	0,1	0,1

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
R-218	-	-	3,9	2,6	0,3	0,1	0,02	0,03
R-422D	-	-	-	-	-	-	-	-
R-152a	-	-	3,3	-	-	-	-	-
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	-	1,6	1,5	1,8	2,0	0,8	0,3	0,2
R-404A	-	3,1	3,9	4,0	2,2	0,0	0,0	0,0
R-407C	-	0,2	0,2	0,2	0,3	0,1	0,024	0,012
R-23	-	-	-	-	-	-	-	-
R-116	-	-	-	-	-	-	-	-
R-218	-	0,1	-	-	-	-	-	-
R-422D	-	-	-	1,2	-	-	-	-
R-152a	-	-	-	-	-	-	-	-
R-125	-	0,1	-	-	-	-	-	-
R-449A	-	-	-	-	0,5	0,1	0,1	0,1
R-448A	-	-	-	-	0,1	0,0	0,0	0,0
R-455A	-	-	-	-	0,1	0,1	0,1	0,1
R-454C	-	-	-	-	0,1	0,1	0,1	0,1
R-452A - TK	-	-	-	-	-	0,024	0,012	0,024
R-513A	-	-	-	-	0,4	0,3	0,2	0,3
Emissionen [t]	-	642,6	821,4	909,5	850,1	534,0	401,4	363,5
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	1.684,2	2.465,0	2.888,7	2.719,5	1.362,6	935,0	859,6

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
--	------	------	------	------	------	------	------	------

**Haushaltskälte (2.F.1.b)**

Haushaltskühl- und gefriergeräte und Speiseemaschinen

*Haushaltskühl- und gefriergeräte*

Bestandsemissionen R-134a [t]	-	1,28	1,34	0,18	0,17	0,11	0,07	0,06
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	1,09	1,08
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	1,66	1,74	1,56	1,54	1,47	1,42	1,40

*Speiseemaschinen*

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 <sub>2</sub> -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	1,94	1,92
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	1,71	1,85	1,74	3,44	3,04	2,96	2,93

**Industriekälte (2.F.1.c)**

Bestandsemissionen [t]

R-134a	-	45,0	49,5	42,2	36,6	30,9	30,8	30,5
R-404A	-	77,5	127,6	160,5	176,1	170,8	178,7	182,4
R-407C	-	19,4	31,9	40,1	44,0	42,7	44,7	45,6

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
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	0,3	0,2
R-116	-	0,1	0,1	-	-	0,0	0,0	0,0
R-422D	-	-	-	34,8	67,6	42,6	24,3	18,6
Entsorgungsemissionen [t]								
R-134a	-	-	18,7	29,6	25,0	20,3	20,6	21,5
R-404A	-	-	6,1	6,5	5,9	14,1	13,3	12,8
R-407C	-	-	1,5	1,6	1,5	3,5	3,3	3,2
R-23	-	-	1,8	1,0	0,9	0,5	0,0	0,1
R-227ea	-	-	0,7	0,9	0,6	0,2	0,4	0,2
R-116	-	-	-	-	-	0,0	0,0	0,0
R-422D	-	-	-	-	-	17,3	17,2	16,7
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	1,5	1,5
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	336,0	334,2
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	454,1	757,4	867,7	927,5	896,2	912,0	926,7

**Transportkälte (2.F.1.d)**

Kühlfahrzeuge und Kühlcontainer

*Kühlfahrzeuge*

Bestandsemissionen [t]

R-134a	-	13,3	19,1	15,4	11,1	10,8	9,8	9,0
--------	---	------	------	------	------	------	-----	-----

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
R-404A	-	32,5	45,8	54,9	59,9	37,2	20,7	15,0
R-410A	-	4,1	7,3	8,1	8,4	8,6	8,6	8,6
R-134a Retrofit	-	-	-	-	-	-	-	-
R-152a v. R-401B	-	-	-	-	-	-	-	-
R-218 v. R-413A	-	-	-	-	-	-	-	-
R-452A					0,5	24,2	41,1	47,8
<b>Entsorgungsemissionen [t]</b>								
R-134a	-	-	1,8	3,4	2,8	1,5	1,5	1,5
R-404A	-	-	5,5	7,3	9,6	10,9	9,4	9,9
R-410A	-	-	0,8	1,0	1,4	1,8	1,5	1,6
R-134a Retrofit	-	-	0,8	-	0,5	-	-	-
R-152a v. R-401B	-	-	0,1	-	-	-	-	-
R-218 v. R-413A	-	-	0,1	-	-	-	-	-
R-452A					-	-	-	-
<b>Herstellungsemissionen [t]</b>								
R-134a	-	0,019	0,019	0,008	0,009	0,007	0,009	0,009
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	0,013	0,014
Emissionen [t]	-	50,0	80,4	91,3	93,00	94,95	92,61	93,40
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	153,5	245,7	293,3	308,6	225,7	152,9	131,4
<b>Kühlcontainer</b>								
<b>Bestandsemissionen [t]</b>								
R-134a	-	16,7	34,0	50,6	51,5	33,3	31,2	30,1

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
R-404A	-	1,1	3,9	7,7	9,8	6,1	5,4	5,1
R-513A	-	-	-	-	-	0,15	0,74	1,09
R-452A	-	-	-	-	-	0,08	0,33	0,48

Entsorgungsemissionen [t]

R-134a	-	-	-	8,1	7,8	13,4	7,6	14,0
R-404A	-	-	-	-	1,1	2,2	1,3	2,3
R-513A	-	-	-	-	-	-	-	-
R-452A	-	-	-	-	-	-	-	-
Emissionen [t]	-	17,8	38,0	66,3	70,3	55,3	46,5	53,1
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	26,0	59,7	106,4	120,5	93,7	77,3	87,5

Summe Transportkälte (2.F.1.d)

Emissionen [t]	-	67,8	118,3	157,6	163,34	150,23	139,14	146,51
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	179,6	305,4	399,7	429,1	319,4	230,2	218,9

**Mobile Klimaanlage (2.F.1.e)**

Pkw, Nutzfahrzeuge, Busse, Landmaschinen, Schienenfahrzeuge, Schiffe, Flugzeuge

*Pkw*

Bestandsemissionen [t]

R-134a	-	1037,1	1850,2	2196,8	2425,2	1829,9	1529,0	1429,0
--------	---	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Entsorgungsemissionen [t]

R-134a	-	0,9	2,0	18,1	42,5	33,3	19,9	18,5
--------	---	-----	-----	------	------	------	------	------

Herstellungsemissionen [t]

R-134a	0,0	14,1	15,9	16,4	17,9	-	-	-
Emissionen [t]	-	1052,0	1868,1	2231,2	2485,6	1863,2	1548,8	1447,5
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	1367,7	2428,5	2900,5	3231,3	2422,2	2013,4	1881,7

*Nutzfahrzeuge*

Bestandsemissionen [t]

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
R-134a	-	41,2	85,4	133,3	203,2	307,1	365,0	382,9
Entsorgungsemissionen [t]								
R-134a	-	-	-	0,1	0,4	0,6	0,5	0,5
Herstellungsemissionen [t]								
R-134a	-	0,6	1,0	1,0	2,0	1,6	1,7	1,7
Emissionen [t]	-	41,8	86,4	134,4	205,5	309,3	367,2	385,1
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	54,4	112,3	174,7	267,2	402,1	477,4	500,6
<i>Busse</i>								
Bestands- und Herstellungsemissionen [t]								
R-134a	-	45,1	69,9	84,5	100,2	107,8	126,2	129,2
Entsorgungsemissionen [t]								
R-134a	-	-	-	-	-	0,02	0,02	0,02
Emissionen [t]	-	45,1	69,9	84,5	100,2	107,8	126,3	129,2
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	58,6	90,8	109,9	130,3	140,2	164,1	167,9
<i>Landmaschinen</i>								
Bestandsemissionen [t]								
R-134a	-	22,2	44,1	61,2	76,5	77,1	73,3	71,8
Entsorgungsemissionen [t]								
R-134a	-	-	4,0	7,2	12,1	12,9	16,4	15,6
Herstellungsemissionen [t]								
R-134a	-	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,2
Emissionen [t]	-	22,4	48,4	68,7	88,9	90,35	90,10	87,66
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	29,1	62,9	89,3	115,5	117,4	117,1	114,0
<i>Schienefahrzeuge</i>								
Bestandsemissionen [t]								

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
R-134a	-	6,4	12,0	14,7	18,1	22,6	25,0	25,5
Entsorgungsemissionen [t]								
R-134a	-	-	-	-	-	1,6	3,2	2,6
Herstellungsemissionen [t]								
R-134a	-	0,1	0,08	0,04	0,07	0,06	0,05	0,05
Emissionen [t]	-	6,5	12,1	14,7	18,2	24,2	28,2	28,2
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	8,4	15,7	19,2	23,7	31,5	36,6	36,7
<i>Schiffe</i>								
Bestandsemissionen [t]								
R-134a	-	5,6	14,7	23,4	19,2	22,8	24,0	24,9
Entsorgungsemissionen [t]								
R-134a	-	-	-	-	-	-	-	-
Herstellungsemissionen [t]								
R-134a	-	0,1	0,2	0,2	0,1	0,08	0,07	0,08
Emissionen [t]	-	5,7	14,9	23,6	19,3	22,9	24,1	25,0
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	7,5	19,4	30,7	25,1	29,7	31,4	32,4
<i>Flugzeuge</i>								
Bestandsemissionen [t]								
R-134a	-	0,2	0,2	0,2	0,21	0,21	0,20	0,20
Emissionen [t]	-	0,2	0,2	0,2	0,21	0,21	0,20	0,20
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	0,3	0,3	0,3	0,27	0,27	0,26	0,26
Summe Mobile Klimaanlage (2.F.1.e)								
Emissionen [t]	-	1.173,8	2.099,9	2.557,4	2.918,0	2.421,0	2.184,9	2.102,8
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	1.525,9	2.729,9	3.324,6	3.793,4	3.147,3	2.840,4	2.733,6
<b>Stationäre Klimaanlage (2.F.1.f)</b>								

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
Kaltwassersätze, Raumklimageräte, Wärmepumpen, WP-Wäschetrockner, Spülmaschinen								
<i>Kaltwassersätze</i>								
Bestandsemissionen [t]								
R-134a	-	66,8	84,0	101,4	92,4	71,6	62,3	59,5
R-407C	-	9,0	43,8	74,2	79,7	52,3	35,9	31,6
R-410A	-	0,0	1,8	18,3	40,3	51,2	51,5	50,0
R-513A	-	-	-	-	-	5,9	20,2	24,4
R-515B	-	-	-	-	-	-	0,5	1,8
R-454B	-	-	-	-	-	-	0,8	2,4
R-32	-	-	-	-	-	-	1,1	1,9
Entsorgungsemissionen [t]								
R-134a	-	-	4,0	8,0	30,9	24,6	30,4	29,8
R-407C	-	-	-	-	9,1	28,1	37,6	38,0
R-410A	-	-	-	-	-	2,1	12,8	17,5
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	0,1
R-513A	-	-	-	-	-	0,1	0,3	0,3
R-515B	-	-	-	-	-	-	-	-
R-454B	-	-	-	-	-	-	-	-
R-32	-	-	-	-	-	-	-	-
Emissionen [t]	-	76,2	134,1	202,4	253,2	236,3	253,6	257,4
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	102,0	189,7	298,7	383,3	362,3	376,9	376,4

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
<i>Raumklimageräte</i>								
Bestandsemissionen [t]								
R-407C	-	1,9	46,4	111,7	98,8	31,7	16,6	12,0
R-410A	-	0,0	8,0	44,1	114,8	176,8	189,1	192,9
R-32	-	-	-	-	-	27,6	70,5	86,1
Entsorgungsemissionen [t]								
R-407C	-	0,0	0,0	9,7	101,1	62,8	37,4	34,2
R-410A	-	-	-	-	18,6	53,1	78,2	91,0
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	1,2	1,2
R-32	-	-	-	-	-	1,1	1,0	1,4
Emissionen [t]	-	1,9	55,1	166,8	334,8	354,6	394,0	419,1
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	3,1	92,0	284,3	584,0	598,7	604,3	624,1

*WP-Wäschetrockner*

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

*Wärmepumpen*

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
<b>Bestandsemissionen [t]</b>								
R-134a	-	0,8	1,6	3,6	2,6	3,6	5,0	5,3
R-404A	-	0,2	0,8	3,2	2,1	2,3	2,1	1,9
R-407C	-	1,0	4,1	17,3	19,3	22,3	20,1	18,6
R-410A	-	-	0,3	4,1	8,5	20,3	39,6	41,9
R-32					0,6	3,6	12,3	14,9
R-454C					0,0	0,0	0,9	1,4
<b>Entsorgungsemissionen [t]</b>								
R-134a	-	-	-	0,5	1,6	1,7	5,1	3,6
R-404A	-	-	-	0,3	0,6	1,5	4,0	3,1
R-407C	-	-	-	0,3	4,9	9,6	29,4	24,1
R-410A	-	-	-	-	0,0	1,7	9,1	8,7
R-32					0,0	0,0	0,0	0,0
R-454C					0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Herstellungsemissionen [t]</b>								
R-134a	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	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	0,3	0,1
R-410A	-	-	0,1	0,4	0,6	1,9	2,1	0,8
R-32					0,1	0,5	1,1	0,6
R-454C					0,0	0,0	0,2	0,1
Emissionen [t]	-	1,9	6,7	21,7	41,7	69,8	131,6	125,4
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	3,3	12,2	39,7	74,8	123,9	225,6	210,8
<b>Spülmaschinen mit Wärmepumpenfunktion</b>								
<b>Bestands- und Herstellungsemissionen [t]</b>								
R-134a	-	-	0,003	0,009	0,015	0,013	0,010	0,008
R-513A	-	-	-	-	-	0,0019	0,0046	0,0055

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
R-450A	-	-	-	-	-	0,0001	0,0003	0,0004
Entsorgungsemissionen [t]								
R-134a	-	-	-	-	-	0,072	0,060	0,060
R-513A	-	-	-	-	-	-	-	-
R-450A	-	-	-	-	-	-	-	-
Emissionen [t]	-	-	0,002	0,01	0,01	0,09	0,07	0,07
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	-	0,002	0,01	0,02	0,11	0,09	0,09

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

Emissionen [t]	-	80,0	195,9	391,6	633,3	668,1	787,4	810,1
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	108,4	293,9	623,7	1.047,1	1.094,8	1.217,8	1.222,3

Summe Kälte- und Klimaanlage (2.F.1)

<b>Zwischensumme Emissionen [t]</b>	-	<b>2.118</b>	<b>3.484</b>	<b>4.338</b>	<b>4.933</b>	<b>4.119</b>	<b>3.851</b>	<b>3.759</b>
<b>Zwischensumme Emissionen [kt CO<sub>2</sub>-Äq.]</b>	-	<b>3.954</b>	<b>6.553</b>	<b>8.106</b>	<b>8.920</b>	<b>6.819</b>	<b>6.138</b>	<b>5.964</b>

Schaumherstellung (2.F.2)

*PU Hart- und Integralschaum*

Herstellungs- und Anwendungsemissionen [t]								
HFKW-134a	-	94,9	80,9	45,9	31,6	14,5	7,9	7,9
HFKW-365mfc/245fa	-	0,0	97,9	175,9	346,2	220,9	33,4	33,4
HFKW-227ea	-	0,0	3,8	8,9	14,7	3,0	2,0	2,1
HFKW-41	-	-	-	-	0,2	-	-	-
Emissionen [t]	-	94,9	182,7	230,7	392,7	238,5	43,3	43,3
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	123,4	213,8	262,1	431,8	244,3	44,7	44,8

*XPS-Schaum*

Herstellungs- und Anwendungsemissionen [t]								
HFKW-134a	-	-	353,0	339,3	287,7	24,5	24,5	24,5

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
HFKW-152a	-	-	683,5	323,1	222,1	112,0	-	-
Emissionen [t]	-	-	1036,5	662,4	509,9	136,5	24,5	24,5
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	-	553,2	485,7	404,7	47,2	31,8	31,8

*PU Montageschaum*

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

**Summe Schaumherstellung (2.F.2)**

<b>Zwischensumme Emissionen [t]</b>	-	<b>1569,9</b>	<b>1688,2</b>	<b>1019,2</b>	<b>981,8</b>	<b>434,0</b>	<b>76,4</b>	<b>70,1</b>
<b>Zwischensumme Emissionen [kt CO<sub>2</sub>-Äq.]</b>	-	<b>1205,7</b>	<b>1287,2</b>	<b>871,3</b>	<b>893,5</b>	<b>314,0</b>	<b>76,5</b>	<b>76,6</b>

**Feuerlöschmittel (2.F.3)**

Bestandsemissionen [t]

HFKW-227ea	-	0,5	1,8	9,4	15,2	16,6	13,6	13,2
HFKW-236fa	-	-	0,1	0,4	0,7	0,4	0,5	0,4
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	-	-
HFKW-23	-	-	-	-	-	-	-	-

Entsorgungsemissionen [t]

HFKW-227ea	-	-	-	-	-	7,22	1,77	1,54
HFKW-236fa	-	-	-	-	-	-	0,08	0,11
HFKW-23	-	-	-	-	-	-	-	0,01

**Summe Feuerlöschmittel (2.F.3)**

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
<b>Zwischensumme Emissionen [t]</b>	-	0,6	1,9	10,0	16,2	24,5	16,2	15,5
<b>Zwischensumme Emissionen [kt CO<sub>2</sub>-Äq.]</b>	-	2,0	6,6	35,8	59,4	62,0	52,0	50,5
<b>Aerosole (2.F.4)</b>								
<i>Asthmasprays (MDIs)</i>								
Anwendungsemissionen [t]								
HFKW-227ea	-	36,8	26,4	16,0	15,1	15,3	12,9	12,9
Herstellungs- und Anwendungsemissionen [t]								
HFKW-134a	-	46,9	177,4	202,5	217,0	243,3	314,1	314,1
Emissionen [t]	-	83,7	203,7	218,4	232,1	258,6	327,0	327,0
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	184,2	318,9	316,7	332,7	367,6	451,6	451,6
<i>Andere Aerosole</i>								
Anwendungsemissionen [t]								
HFKW-134a	-	160,0	235,7	174,0	190,7	-	4,5	8,0
HFKW-152a	-	10,0	13,3	25,9	7,1	-	-	-
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	200,8	0,0	4,5	8,1
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	212,5	311,4	233,1	252,6	0,1	5,9	10,5
<b>Summe Aerosole (2.F.4)</b>								
<b>Zwischensumme Emissionen [t]</b>	-	<b>256,2</b>	<b>455,3</b>	<b>421,3</b>	<b>432,9</b>	<b>258,7</b>	<b>331,5</b>	<b>335,1</b>
<b>Zwischensumme Emissionen [kt CO<sub>2</sub>-Äq.]</b>	-	<b>396,7</b>	<b>630,3</b>	<b>549,8</b>	<b>585,3</b>	<b>367,6</b>	<b>457,5</b>	<b>462,1</b>
<b>Summe Emissionen Anwendung als ODS-Ersatzstoff [t]</b>	-	<b>3.945</b>	<b>5.630</b>	<b>5.791</b>	<b>6.366</b>	<b>4.837</b>	<b>4.286</b>	<b>4.191</b>

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
<b>Summe Emissionen Anwendung als ODS- Ersatzstoff [kt CO<sub>2</sub>-Äq.]</b>	-	5.560	8.480	9.567	10.461	7.565	6,740	6,568

#### A.4 Sonstige Produktherstellung und -verwendung (2.G)

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
--	------	------	------	------	------	------	------	------

##### ORC-Anlagen (2.G.4)

###### Herstellungs- und Bestandsemissionen [t]

HFKW-245fa	-	-	-	-	8,59	11,19	19,43	25,11
HFKW-365mfc	-	-	-	-	0,85	0,89	0,89	0,89
HFKW-134a	-	-	-	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14

###### Entsorgungsemissionen [t]

HFKW-245fa	-	-	-	-	-	-	-	-
HFKW-365mfc	-	-	-	-	-	-	-	-
HFKW-134a	-	-	-	-	-	-	-	-

###### Emissionen [t]

Emissionen [t]	-	-	-	0,15	9,57	12,21	20,45	26,13
Emissionen [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	-	-	0,19	8,23	10,49	17,56	22,43

###### Emissionen C<sub>5</sub>F<sub>12</sub> [t]

Emissionen C <sub>5</sub> F <sub>12</sub> [t]	-	-	0,02	0,09	-	-	-	-
Emissionen C <sub>5</sub> F <sub>12</sub> [kt CO <sub>2</sub> -Äq.]	-	-	0,16	0,82	-	-	-	-

##### Summe ORC-Anlagen (2.G.4)

<b>Zwischensumme Emissionen [t]</b>	-	-	<b>0,02</b>	<b>0,23</b>	<b>9,57</b>	<b>12,21</b>	<b>20,45</b>	<b>26,13</b>
<b>Zwischensumme Emissionen [kt CO<sub>2</sub>- Äq.]</b>	-	-	<b>0,16</b>	<b>1,01</b>	<b>8,23</b>	<b>10,49</b>	<b>17,56</b>	<b>22,43</b>

### A.5 Vertrauliche Daten von HFKW, FKW und SF<sub>6</sub> (2.H.3)

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
<b>Chemische Produktion (2.B.9), Photovoltaik (2.E.3), Wärmeüberträger (2.E.4), Lösemittel (2.F.5), Flugzeugradaranlagen, Sportschuhsohlen, optische Glasfasern, Schweißen und Medizin- und Kosmetikprodukte (2.G.2)</b>								
<b>Summe Emissionen Vertrauliche Daten [t]</b>	395,3	161,6	98,0	44,0	34,0	21,1	11,8	12,6
<b>Summe Emissionen Vertrauliche Daten [kt CO<sub>2</sub>-Äq.]</b>	4.959,6	1.995,8	958,5	437,3	225,5	127,7	87,4	116,3

### A.6 Fluorierte Treibhausgase für die freiwillige Berichterstattung

	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
<b>Gesamtemissionen [t] je Anwendung</b>								
uHFKW (1234yf, 1234ze, 1336mzz), uHFCKW (1233zd, 1224yd)	-	-	-	77,1	416,5	1051,9	1444,3	1587,2
Industrielle HFE (offen und geschlossen)	-	5,1	43,0	57,7	57,9	57,1	79,4	79,5
HFE für Anästhesie	16,1	80,5	162,9	176,0	180,8	146,9	121,2	116,9
PFPE	11,2	16,6	22,5	22,3	22,1	22,1	22,1	22,1
Weitere (N-haltige) FKW	-	0,3	3,3	5,6	5,9	6,4	6,5	6,5
SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	-	-	-	47,5	48,2	205,0	91,4	91,4
<b>Summe Emissionen F-Gase für die freiwillige Berichterstattung [t]</b>	<b>27,3</b>	<b>102,5</b>	<b>231,7</b>	<b>386,2</b>	<b>731,4</b>	<b>1489,4</b>	<b>1764,9</b>	<b>1903,6</b>

### A.7 Gesamtemissionen

<b>Gesamtemissionen [t]</b>	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
HFKW	386	4.074	5.708	5.830	6.416	4.871	4.312	4.190
FKW	388	106	96	42	32	28	20	30
Freiwillig berichtete Treibhausgase	103	170	279	385	711	1.316	1.579	1.668

Gesamtemissionen [t]	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
<b>Summe [t]</b>	<b>877</b>	<b>4350</b>	<b>6083</b>	<b>6257</b>	<b>7159</b>	<b>6215</b>	<b>5911</b>	<b>5.888</b>

Gesamtemissionen [Mt CO <sub>2</sub> -Äq.]	1990	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
HFKW	4,71	6,85	9,03	9,77	10,57	7,65	6,79	6,97
FKW	2,76	0,83	0,75	0,33	0,25	0,22	0,16	0,23
Freiwillig berichtete Treibhausgase	0,0000 1	0,25	0,36	0,48	0,50	0,44	0,38	0,37
<b>Summe [Mt CO<sub>2</sub>-Äq.]</b>	<b>7,5</b>	<b>7,9</b>	<b>10,1</b>	<b>10,6</b>	<b>11,3</b>	<b>8,3</b>	<b>7,3</b>	<b>7,6</b>