

CLIMATE CHANGE

49/2026

Abschlussbericht

Praxisnahe Rückgewinnungsfaktoren für UNFCCC F-Gas Inventare

**Bestimmung praxisnaher Rückgewinnungsfaktoren für
fluorierte Arbeitsmittel aus Wärmepumpen, Kälte- und
Klimaanlagen und elektrischen Betriebsmitteln zur
Verbesserung von UNFCCC F-Gas Inventaren**

von:

Barbara Gschrey, David Behringer, Kristina Warncke
Öko-Recherche GmbH, Frankfurt am Main

Herausgeber:

Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 49/2026

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3721 41 302 0

Abschlussbericht

Praxisnahe Rückgewinnungsfaktoren für UNFCCC F-Gas Inventare

Bestimmung praxisnaher Rückgewinnungsfaktoren für
fluorierte Arbeitsmittel aus Wärmepumpen, Kälte- und
Klimaanlagen und elektrischen Betriebsmitteln zur
Verbesserung von UNFCCC F-Gas Inventaren

von

Barbara Gschrey, David Behringer, Kristina Warncke
Öko-Recherche GmbH, Frankfurt am Main

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

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

Durchführung der Studie:

Öko-Recherche. Büro für Umweltforschung und -beratung GmbH
Münchener Str. 23a
60329 Frankfurt

Abschlussdatum:

November 2025

Redaktion:

Fachgebiet III 1.4 Stoffbezogene Produktfragen
Kerstin Martens

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8244>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, September 2026

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

Kurzbeschreibung: Praxisnahe Rückgewinnungsfaktoren für UNFCCC F-Gas Inventare

Der Bericht behandelt verschiedene Aspekte der Rückgewinnung, Wiederaufbereitung und Zerstörung von F-Gasen in Deutschland und konzentriert sich dabei auf die Anwendung von F-Gasen als Kältemittel in der Kälte-, Klima- und Wärmepumpentechnik sowie die Verwendung von SF₆ in elektrischen Betriebsmitteln. Zielsetzung des Vorhabens war die Überprüfung und Aktualisierung der bisher genutzten Rückgewinnungsfaktoren im deutschen F-Gas-Modell.

Hierfür wurden Literatur- und Onlinerecherchen durchgeführt, mehrere Datensätze ausgewertet, Interviews mit relevanten Fachleuten aus der Industrie geführt sowie zwei sektorspezifische Workshops organisiert.

Es zeigte sich, dass Daten zu Rücknahme, Recycling und Wiederaufbereitung von F-Gasen nur grob geschätzt werden können, da keine umfassenden Daten hierzu vorliegen bzw. von den beteiligten Unternehmen nur zum Teil zur Verfügung gestellt wurden.

Basierend auf den ausgewerteten Daten konnten einige Annahmen im deutschen F-Gas-Modell angepasst bzw. bestätigt werden. Insgesamt waren nur sehr wenige Anpassungen notwendig und bisherige Annahmen stellten sich als vertrauenswürdig heraus.

Abstract: Practical recovery factors for UNFCCC F-gas inventories

The report deals with various aspects of the recovery, reprocessing and destruction of F-gases in Germany, focussing on the use of F-gases as refrigerants in refrigeration, air conditioning and heat pump technology and the use of SF₆ in electrical equipment. The aim of the project was to review and update the previously used recovery factors in the German F-gas model.

To this end, literature and online research was carried out, several data sets were evaluated, interviews were conducted with relevant experts from industry and two sector-specific workshops were organised.

It was found that data on the recovery, recycling and reprocessing of F-gases can only be roughly estimated, as no comprehensive data is available or was only partially provided by the companies involved.

Based on the analysed data, some assumptions in the German F-gas model could be adjusted or confirmed. Overall, only very few adjustments were necessary and previous assumptions turned out to be reliable.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis.....	11
Abkürzungsverzeichnis.....	14
Zusammenfassung.....	17
Summary	26
1 Hintergrund und Problemstellung.....	35
2 Ziel und Gegenstand des Forschungsprojekts.....	36
3 Gesetzliche Grundlagen für Rückgewinnung, Wiederaufbereitung und Entsorgung von F-Gasen sowie für die Berichterstattung von F-Gasen.....	37
3.1 Internationale Abkommen.....	37
3.2 Gesetzliche Grundlagen auf EU-Ebene	38
3.2.1 F-Gas-Verordnung, ODS-Verordnung und MAC-Richtlinie	38
3.2.1.1 EU F-Gas-Verordnung (EU) 2024/573.....	38
3.2.1.2 EU ODS-Verordnung	43
3.2.1.3 Fahrzeugklimaanlagen-Richtlinie (MAC-Richtlinie)	47
3.2.2 Altfahrzeugrichtlinie	47
3.2.3 WEEE-Richtlinie.....	48
3.2.4 Abfallrahmenrichtlinie	49
3.2.5 Abfallverzeichnis-Verordnung	49
3.2.6 Governance-Verordnung	50
3.3 Deutschland	50
3.3.1 Chemikalien-Klimaschutzverordnung (ChemKlimaschutzV).....	50
3.3.2 Chemikalien-Ozonschichtverordnung (ChemOzonSchichtV).....	50
3.3.3 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)	51
3.3.4 Altfahrzeug-Verordnung (AltfahrzeugV).....	51
3.3.5 Umweltstatistikgesetz (UStatG).....	53
3.3.6 Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG)	53
3.3.7 Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft)	53
4 Technische Prozesse für Rücknahme, Aufarbeitung und Zerstörung von F-Gasen	55
4.1 Rückgewinnung, Recycling, Aufbereitung.....	55
4.2 Zerstörung von F-Gasen.....	57
5 Bisherige Modellannahmen und Einordnung.....	58
5.1 Wärmepumpen, Kälte- und Klimaanlagen (2.F.1).....	58
5.2 Elektrische Betriebsmittel (2.G.1)	61
6 Problemstellung und Herangehensweise/Methode.....	67
6.1 Literatursauswertung	67
6.1.1 Rückgewinnungsraten aus der Literatur.....	67

6.1.2	Gemeldete Daten zu Rückgewinnung, Aufbereitung und Zerstörung von F-Gasen.....	72
6.2	Befragungen und Daten von Unternehmen	74
6.2.1	Stationäre Kälte-Klima- und Wärmepumpenanwendungen, mobile Klimatisierung	74
6.2.2	SF ₆ in elektrischen Betriebsmitteln	74
6.3	Datensatz des VDKF	74
6.4	Datensatz aus Polen.....	76
6.5	Fachgespräche und Workshops	76
7	Datenauswertung.....	77
7.1	Entsorgungspraxis in Deutschland	77
7.1.1	Kältemittel aus Kühlgeräten	77
7.1.2	Kältemittel aus größeren stationären Anlagen.....	78
7.1.2.1	Gewerbekälte (2.F.1.a)	78
7.1.2.2	Industriekälte (2.F.1.c)	79
7.1.2.3	Stationäre Klimaanlage (2.F.1.f)	80
7.1.3	Kältemittel aus Transportkälteanlagen (2.F.1.d)	81
7.1.4	Kältemittel aus mobilen Klimaanlage (2.F.1.e).....	82
7.1.5	SF ₆ aus elektrischen Betriebsmitteln	84
7.1.5.1	Entsorgungspraxis.....	84
7.1.5.2	Recycling und Aufarbeitung von SF ₆	87
7.1.5.3	Emissionsfaktoren.....	89
7.2	VDKF-LEC Datensatz.....	91
7.2.1	Anzahl stillgelegter Anlagen.....	91
7.2.2	Rückgewonnene Kältemittelmengen.....	95
7.2.3	Betriebsjahre stillgelegter Anlagen.....	100
7.2.4	Erstfüllmenge stillgelegter Anlagen	106
7.2.5	Rückgewinnungsraten	112
7.2.6	Vergleich mit UNFCCC-Daten und Daten aus dem tschechischen Phoenix-Modell	118
7.3	CRO-Datensatz aus Polen.....	123
7.4	Rückgenommene Kältemittelmengen über Gasehändler in Deutschland	129
7.5	Rücknahme, Wiederaufbereitung und Entsorgung von F-Gas-Kältemitteln in Deutschland	131
8	Ableitung neuer Modellannahmen für Kälte- und Klimaanlage (2.F.1)	134
8.1	Gewerbekälte.....	136
8.2	Haushaltskühlgeräte	136
8.3	Industriekälte	136
8.4	Raumklimaanlagen.....	137
8.5	Wärmepumpen	137
8.6	Übersicht.....	138

9	Ableitung neuer Modellannahmen für elektrische Betriebsmittel (2.G.1)	139
9.1	Verbesserungspotenziale des Monitorings der Rückgewinnung von SF ₆	139
9.2	Verbesserungspotenziale zur Entsorgung/Rückgewinnung von SF ₆	139
9.3	Modellannahmen.....	140
10	Ausblick	141
	Quellenverzeichnis	143
	Anhang	149
A.1	Angaben zum VDKF-LEC-Datensatz.....	149

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Nach Selbstverpflichtung gemeldete Entsorgungsemissionen von SF ₆ aus elektrischen Betriebsmitteln 2012-2022.....	65
Abbildung 2:	Aufarbeitung von fluorierten Treibhausgasen und HFKW sowie durchschnittliches GWP der aufgearbeiteten Gase aus der EU F-Gas-Berichterstattung	73
Abbildung 3:	Fließbild zum Ablauf der Entsorgung eines elektrischen Betriebsmittels	86
Abbildung 4:	Rückgewonnene Kältemittelmenge aus Altanlagen im VDKF-LEC Datensatz nach relevanten Kältemitteln	96
Abbildung 5:	Rückgewonnene Kältemittelmenge aus Altanlagen im VDKF-LEC Datensatz in den verschiedenen Sektoren	98
Abbildung 6:	Rückgewonnene Kältemittelmengen aus den verschiedenen Sektoren und Teilsektoren mit Verbleib im VDKF-LEC Datensatz	99
Abbildung 7:	Mittlere Anzahl der Betriebsjahre von stillgelegten RAC-Anlagen in der VDKF-LEC Datenbank nach Kältemittel	101
Abbildung 8:	Mittlere Anzahl der Betriebsjahre von stillgelegten RAC-Anlagen im VDKF-LEC Datensatz nach Sektor	102
Abbildung 9:	Mittlere Anzahl der Betriebsjahre von stillgelegten Gewerbe-, Industrie- und Sonderanlagen im VDKF-LEC Datensatz über die Jahre 2017 bis 2021 nach Kältemittel und Sektor/Teilsektor	103
Abbildung 10:	Mittlere Anzahl der Betriebsjahre von stillgelegten stationären Klimaanlageanlagen in der VDKF-LEC Datenbank über die Jahre 2017 bis 2021 nach Teilsektor und Kältemittel	106
Abbildung 11:	Mittlere Erstfüllmenge stillgelegter RAC-Anlagen im VDKF-LEC Datensatz nach Jahr der Außerbetriebnahme und Kältemittel	107
Abbildung 12:	Mittlere Erstfüllmenge stillgelegter RAC-Anlagen [kg] im VDKF-LEC Datensatz nach Jahr der Außerbetriebnahme und Sektor	108
Abbildung 13:	Mittlere Erstfüllmenge stillgelegter RAC-Anlagen im VDKF-LEC Datensatz nach Sektor und Kältemittel	109
Abbildung 14:	Mediane der Erstfüllmengen von außer Betrieb genommenen Anlagen im VDKF-LEC Datensatz	111
Abbildung 15:	Mittlere Rückgewinnungsrate von Kältemitteln aus stillgelegten RAC-Anlagen nach Kältemittel im VDKF-LEC Datensatz	113
Abbildung 16:	Mittlere Rückgewinnungsrate von Kältemitteln aus stillgelegten RAC-Anlagen nach Sektor im VDKF-LEC Datensatz	114

Abbildung 17:	Mittlere Rückgewinnungsraten über alle Jahre von Kältemitteln aus stillgelegten RAC-Anlagen nach Sektor im VDKF-LEC Datensatz.....	117
Abbildung 18:	Mediane der Anteile der rückgewonnenen HFKW-Mengen aus dem VDKF-LEC Datensatz an den berichteten Mengen unter UNFCCC nach Jahr (%)	121
Abbildung 19:	Mittlerer Anteil der rückgewonnenen HFKW-Mengen aus dem VDKF-LEC Datensatz mit den berichteten Mengen unter UNFCCC nach Sektor (%)	122
Abbildung 20:	Rückgewonnene Mengen an F-Gasen für verschiedene Sektoren in der polnischen Datenbank	124
Abbildung 21:	Rückgewonnene Mengen an F-Gasen nach Kältemittel in der polnischen Datenbank.....	125
Abbildung 22:	Anteil der einzelnen Kältemittel an der gesamten jeweiligen rückgenommenen Kältemittelmenge aus der polnischen (CRO) und deutschen (VDKF-LEC) Datenbank	126
Abbildung 23:	Anteil der gesamten rückgewonnenen Kältemittelmenge über alle Jahre nach Erstfüllmenge der jeweiligen Anlagen in der polnischen Datenbank.....	127
Abbildung 24:	Anteil der gesamten rückgewonnenen Kältemittelmenge über alle Jahre nach Erstfüllmenge der jeweiligen Anlagen im deutschen VDKF-LEC Datensatz.....	128
Abbildung 25:	Geschätzte rückgenommene F-Gasmenge vier größerer Gasehändler in Deutschland.....	130
Abbildung 26:	Sankey-Diagramm des möglichen Verbleibs von HFKW aus außer Betrieb genommenen stationären Kälte- und Klimaanlage in Deutschland im Jahr 2021.....	132

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der Vorgaben der EU-Altfahrzeugrichtlinie	47
Tabelle 2:	Kategorien der WEEE-Richtlinie	49
Tabelle 3:	Mindestzielvorgaben der WEEE-Richtlinie je Kategorie ab 15.08.2018.....	49
Tabelle 4:	Übersicht relevanter Regelungen der deutschen Altfahrzeug- Verordnung.....	52
Tabelle 5:	Default-Werte der IPCC-Guidelines für Füllmenge, Lebensdauer, Rückgewinnungsrate und Restfüllmenge für Kälte- und Klimaanlage.....	59
Tabelle 6:	Mittlere Rückgewinnungsraten in den verschiedenen F-Gas- Sektoren für Deutschland in den Jahren 2010 bis 2021 (%).....	60
Tabelle 7:	Summen der in entsorgten Anlagen verbleibenden F-Gase in metrischen Tonnen in den verschiedenen Sektoren für Deutschland 2010-2021.....	61
Tabelle 8:	Emissionsfaktoren für den Sektor 2.G.1 Elektrische Betriebsmittel in Deutschland.....	63
Tabelle 9:	Default-Emissionsfaktoren gemäß den 2006 IPCC-Guidelines.	63
Tabelle 10:	Rückgewinnungsraten und Restfüllstände aus verschiedenen Quellen in Prozent	67
Tabelle 11:	Rückgewinnungsraten von F-Gasen in der „Emission Factor Database“ (EFDB)	68
Tabelle 12:	Rückgewinnungsraten für Tschechien.....	70
Tabelle 13:	Rückgewinnungsraten für Frankreich.....	71
Tabelle 14:	Parameter des deutschen Modells zur Berechnung von Entsorgungsemissionen in der Haushaltskälte und Kältemittel im Bestand.....	77
Tabelle 15:	Parameter des deutschen Modells zur Berechnung von Entstehungsemissionen in der Gewerbekälte und Kältemittel im Bestand.....	78
Tabelle 16:	Parameter des deutschen Modells zur Berechnung von Entsorgungsemissionen in der Industriekälte und Kältemittel im Bestand.....	79
Tabelle 17:	Parameter des deutschen Modells zur Berechnung von Entsorgungsemissionen in der stationären Klimatisierung und Kältemittel im Bestand	81
Tabelle 18:	Parameter des deutschen Modells zur Berechnung von Entsorgungsemissionen in der Transportkälte und Kältemittel im Bestand.....	81
Tabelle 19:	Parameter des deutschen Modells zur Berechnung von Entsorgungsemissionen in der mobilen Klimatisierung und Kältemittel im Bestand	83
Tabelle 20:	Abfallschlüssel für SF ₆	85

Tabelle 21:	SF ₆ -Normen.....	87
Tabelle 22:	Ursachen und Stoffe der Verunreinigung von SF ₆	87
Tabelle 23:	Qualitätslevel von SF ₆ beispielhaft für die DILO GmbH.....	88
Tabelle 24:	Vergleich der SF ₆ -Emissionsfaktoren für Herstellung, Betrieb und Entsorgungsverluste von Schaltanlagen im Jahr 2021 in ausgewählten Ländern (%)	89
Tabelle 25:	Anzahl der stillgelegten Kälte- und Klimaanlageanlagen im VDKF-LEC Datensatz für die verschiedenen Sektoren und Teilsektoren nach Kältemittel und Jahr.....	91
Tabelle 26:	Relevante Kältemittel und Gemische in entsorgten Anlagen ..	94
Tabelle 27:	Summen der rückgewonnenen Kältemittelmengen aus Altanlagen in Tonnen im VDKF-LEC Datensatz	95
Tabelle 28:	Rückgewonnene Kältemittelmenge aus Altanlagen in Tonnen im VDKF-LEC Datensatz für Deutschland nach relevanten Kältemitteln	97
Tabelle 29:	Rückgewonnene Kältemittelmenge aus Altanlagen in Tonnen im VDKF-LEC Datensatz für Deutschland nach Sektor.....	98
Tabelle 30:	Verbleib der zurückgewonnenen Kältemittel aus stillgelegten RAC-Anlagen in Tonnen im VDKF-LEC Datensatz	99
Tabelle 31:	Statistische Parameter zu Betriebsjahren von Altanlagen im VDKF-LEC Datensatz	103
Tabelle 32:	Statistische Parameter zu Erstfüllmengen in kg von Altanlagen im VDKF-LEC Datensatz	109
Tabelle 33:	Füllmengenparameter der Anlagen im VDKF-LEC Datensatz ..	112
Tabelle 34:	Statistische Parameter zu Rückgewinnungsraten von Kältemitteln aus Altanlagen im VDKF-LEC Datensatz	114
Tabelle 35:	Mittlere Rückgewinnungsraten über alle Kältemittel und Jahre im VDKF-LEC Datensatz nach Sektor und Teilsektor	117
Tabelle 36:	Vergleich der HFKW-Mengen in der VDKF-LEC Datenbank und den berichteten Mengen unter UNFCCC.....	120
Tabelle 37:	Vergleich der durchschnittlichen Rückgewinnungsraten und Betriebsjahre aus verschiedenen Quellen.....	123
Tabelle 38:	Rückgewonnene Mengen an F-Gasen in Tonnen für verschiedene Sektoren mit Information zur Füllmenge des entsprechenden Equipments in der polnischen Datenbank für verschiedene Jahre	124
Tabelle 39:	Anteile der Anlagen mit Füllmengen im vollen VDKF-LEC Datensatz entsprechend der Einteilung in der polnischen CRO- Datenbank und Füllmengen aus der CRO-Datenbank.....	128
Tabelle 40:	Geschätzte rückgenommene F-Gasmenge vier größerer Gasehändler in Deutschland.....	130

Tabelle 41:	Möglicher Verbleib von HFKW aus außer Betrieb genommenen stationären Kälte- und Klimaanlageanlagen in Deutschland im Jahr 2021	133
Tabelle 42:	Vergleich der bisherigen Modellannahmen (D) mit den Daten aus der VDKF-LEC Datenbank (VDKF) sowie den tschechischen (CZ), französischen (F) und US-amerikanischen (USA) Modellannahmen	134
Tabelle 43:	Übersicht der Modelländerungen für Kälte- und Klimaanlageanlagen inkl. Wärmepumpen.....	138

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
AFCE	Alliance Froid Climatisation Environnement (Allianz Kälte Klima Umwelt)
AHRI	Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute
AK	Arbeitskreis
AltfahrzeugV	Altfahrzeug-Verordnung
AS	Abfallschlüssel
AVV	Abfallverzeichnis-Verordnung
BLAC	Bund-Länder-Arbeitskreis Chemikaliensicherheit
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BWP	Bundesverband Wärmepumpe e.V.
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Électriques (Internationaler Rat für große elektrische Netze)
CRF	Common Reporting Format (Gemeinsames Berichterstattungsformat des UNFCCC)
CRO	Polnische Datenbank mit dem Namen „Central Registry of Operators“
dt.	deutsch
EAG	Elektro- und Elektronik-Altgeräte
EFDB	Emission Factor Database (Emissionsfaktoren Datenbank des IPCC)
EG	Europäische Gemeinschaft
ElektroG	Elektro- und Elektronikgerätegesetz
EPEE	European Partnership for Energy and the Environment
EU	Europäische Union
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
F-Gase	fluorierte Treibhausgase
F-Gas-Verordnung	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, ABI. L 150/195
FKW	vollfluorierte Kohlenwasserstoffe
FNN	Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE
Gew.-%	Gewichtsprozent (prozentualer Anteil der Masse eines Stoffes an der Gesamtstoffmasse)

Abkürzung	Erläuterung
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
HFKW	teilfluorierte Kohlenwasserstoffe
HS	Hochspannung
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)
KI	Konfidenzintervall
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
Lkw	Lastkraftwagen
MAC-Richtlinie	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
MS	Mittelspannung
NDCs	Nationally Determined Contributions (national festgelegte Beiträge nach UNFCCC)
Nfz	Nutzfahrzeug
NIR	National Inventory Report (Nationaler Inventarbericht nach UNFCCC)
ORC	Organic Rankine Cycle
Pkw	Personenkraftwagen
RAC	Refrigeration and air conditioning (Kälte- und Klimatechnik)
RACHP	Refrigeration, air conditioning and heat pumps (Kältetechnik, Klimatisierung und Wärmepumpen)
RLT	Raumluftechnik
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
T&D	Transmission and Distribution (Übertragung und Verteilung von Energie)
T&D Europe	European Association of the Electricity Transmission and Distribution Equipment and Services Industry
UBA	Umweltbundesamt
uHFKW	Ungesättigte teilfluorierte Kohlenwasserstoffe
UNFCCC	United Nations Framework Convention for Climate Change (Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen)
UStatG	Umweltstatistikgesetz
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
VDKF	Verband Deutscher Kälte-Klima-Fachbetriebe e.V.

Abkürzung	Erläuterung
VDKF-LEC	Branchensoftware des VDKF
VDN	Verband der Netzbetreiber e.V.
Vol.-%	Volumenprozent (prozentualer Anteil des Volumens eines Stoffes am Gesamtstoffvolumen)
WEEE	Waste of Electrical and Electronic Equipment (Elektro- und Elektronik-Altgeräte)
ZSE	Zentrales System Emissionen (Datenbank des Umweltbundesamtes)
ZVEI	Verband der Elektro- und Digitalindustrie e.V. (vormals Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie)

Zusammenfassung

Zur Erfüllung der Berichtspflichten im Rahmen der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (United Nations Framework Convention for Climate Change – UNFCCC) werden in Deutschland jährlich Emissionen von Treibhausgasen abgeschätzt und an das Klimasekretariat übermittelt. Die Vorgehensweise hierfür ist in den UNFCCC Reporting Guidelines festgelegt, die sich auf die Methoden des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) beziehen, nämlich die „2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories“ und den Bericht „Refinement of the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories“ aus dem Jahr 2019.

Auch fluoridierte Treibhausgase, die sogenannten F-Gase (d.h. teil- und vollfluoridierte Kohlenwasserstoffe (HFKW und FKW), Schwefelhexafluorid (SF₆), Stickstofftrifluorid (NF₃) und einige weitere F-Gase) sind in die nationale Emissionsberichterstattung einbezogen. Dabei werden Abschätzungen für die beiden Emissionstypen Befüllungs- und Bestandsemissionen indirekt über Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren vorgenommen. Entsorgungsemissionen hingegen werden über die Restfüllmenge zum Zeitpunkt der Entsorgung und die Rückgewinnungsrate am Lebensende der Anlagen ermittelt. Die Werte für Emissionsfaktoren, durchschnittliche Lebensdauern, Restfüllstände und Rückgewinnungsraten werden wegen fehlender empirischer Daten häufig über mehrere Jahre als konstant angenommen oder sukzessive, auf Grundlage von länderspezifischen Modellannahmen aus den Jahren 2011/2012 (Schwarz et al. 2013), geändert. Die IPCC-Guidelines geben zwar Default-Werte für viele Faktoren vor, die angegebenen Spannen sind aber in der Regel sehr groß und daher nicht unmittelbar auf nationale Verhältnisse anwendbar. Tabelle Z 1 fasst die Default-Werte für Füllmengen, durchschnittliche Lebensdauern, Rückgewinnungsraten und Restfüllmengen für Kälte- und Klimaanlage (Quellgruppe 2.F.1) gemäß den IPCC-Guidelines zusammen.

Daher wurden im Rahmen dieses Vorhabens die bisher verwendeten Faktoren zur Abschätzung der Entsorgungsemissionen in den Unterquellgruppen 2.F.1 Kälte- und Klimaanlage und 2.G.1 Elektrische Betriebsmittel überprüft und angepasst. Auch neue Vorgaben, die sich durch die überarbeitete EU F-Gas-Verordnung sowie weitere gesetzlichen Grundlagen ergeben, wurden einbezogen. Neben einer Literaturrecherche konnten neue Erkenntnisse über Entsorgungsmengen und -praktiken durch Interviews mit Fachleuten aus relevanten Branchen sowie zwei Fachgespräche für die betroffenen Sektoren gewonnen werden.

Zunächst gibt dieser Bericht einen Überblick der relevanten Gesetzesgrundlagen (Kapitel 3), der mit internationalen Regelungen beginnt. Diese umfassen neben der Klimarahmenkonvention (UNFCCC) auch das Montrealer Protokoll mit dem Beschluss von Kigali und sowie das Basler Übereinkommen über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung. Auf EU-Ebene werden die EU F-Gas-Verordnung in der überarbeiteten Fassung (EU) 2024/573, die EU-Verordnung über Ozonschicht schädigende Stoffe in der überarbeiteten Fassung (EU) 2024/590, die Richtlinie 2006/40/EG über Emissionen aus Klimaanlage in Kraftfahrzeugen sowie die EU-Altfahrzeugrichtlinie, die EU-Richtlinie zur Behandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten (Waste Electric and Electronic Equipment; WEEE), die Abfallrahmenrichtlinie, die Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis und die so genannte „Governance-Verordnung“ zur Einhaltung von Klima- und Energiezielen betrachtet. Die relevanten nationalen gesetzlichen Grundlagen für Deutschland, die im Bericht dargestellt werden, sind die Chemikalien-Klimaschutzverordnung (ChemKlimaschutzV), die Chemikalien-Ozonschichtverordnung (ChemOzonschV), das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), die Altfahrzeug-Verordnung (AltfahrzeugV), das

Umweltstatistikgesetz (UstatG), das Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) sowie die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft).

Tabelle Z 1: Default-Werte der IPCC-Guidelines für Kälte- und Klimaanlage

Sektor	Füllmenge (kg)	Lebensdauer (Jahre)	Rückgewinnungsrate (%)	Restfüllmenge (%)
Kategorie	M	d	$\eta_{rec,d}$	p
Haushaltskälte	$0,05 \leq M \leq 0,5$	$12 \leq d \leq 20$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$0 < p < 80$
Steckerfertige Geräte	$0,2 \leq M \leq 6$	$10 \leq d \leq 15$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$0 < p < 80$
Mittlere und große gewerbliche Kühlung	$50 \leq M \leq 2.000$	$7 \leq d \leq 15$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$50 < p < 100$
Transportkühlung	$3 \leq M \leq 8$	$6 \leq d \leq 9$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$0 < p < 50$
Industrielle Kältetechnik	$10 \leq M \leq 10.000$	$15 \leq d \leq 30$	$0 < \eta_{rec,d} < 90$	$50 < p < 100$
Flüssigkeitskühlsätze	$10 \leq M \leq 2.000$	$15 \leq d \leq 30$	$0 < \eta_{rec,d} < 95$	$80 < p < 100$
Klimaanlagen einschl. Wärmepumpen	$0,5 \leq M \leq 100$	$10 \leq d \leq 20$	$0 < \eta_{rec,d} < 80$	$0 < p < 80$
Mobile Klimaanlage	Seeverkehr: $5 \leq M \leq 6.500$ Zugverkehr: $10 \leq M \leq 30$ Bus: $4 \leq M \leq 18$ Weitere: $0,5 \leq M \leq 2$	$9 \leq d \leq 16$	$0 < \eta_{rec,d} < 50$	$0 < p < 50$

Danach sind im Kapitel 4 technische Prozesse für Rücknahme, Aufarbeitung und Recycling sowie für die Zerstörung von F-Gasen beschrieben. Hervorzuheben ist, dass sich derzeit mehrere Forschungsvorhaben mit Methoden zur Aufbereitung von Kältemittelgemischen befassen, etwa Destillation und Membrantechnologien.

Das Kapitel 5 stellt die bisherigen Modellannahmen für Rückgewinnung und Entsorgung in Deutschland dar und ordnet diese ein. Die folgende Tabelle Z 2 fasst die bisherigen Annahmen zusammen.

Tabelle Z 2: Rückgewinnungsraten und Restfüllstände für Kälte- und Klimaanlage aus dem aktuellen deutschen Modell, 2021

Art der Anlage	Restfüllstand (% der Erstfüllmenge)	Rückgewinnungsrate (% der Restmenge in Altanlagen)
Supermärkte-Zentralanlagen	87,5	80
Verflüssigungssätze	85	80
Hermetische Anlagen in der Gewerbe- und Industriekälte	90	60
Haushaltskühlgeräte	95,5	73,3
Speiseeismaschinen	95,5	65
Nahrungsmittelindustrie	85	80
Sonstige Industrieprozesse	85	80
Bewegliche Raumklimageräte	75	40
Single-Split-Raumklimageräte < 5 kW	87,5	60
Single-Split-Raumklimageräte > 5 kW	87,5	60
Rooftop (Multi-Split-Raumklimageräte)	87,5	80
VRF-Raumklimageräte	87,5	80
Chiller (Verdrängungsverdichter)	90	80
Zentrifugal-Chiller	90	80
Wärmepumpen	75	65
Spülmaschinen mit Wärmepumpenfunktion	95,5	85
Wärmepumpenwäschetrockner	95,5	65
Mobile Klimaanlage (Pkw und Nfz)	34	50
Mobile Klimaanlage (Bus)	34	38
Mobile Klimaanlage (Landmaschinen)	34	11,7
Mobile Klimaanlage (Schiffe)	87,5	80
Mobile Klimaanlage (Schienenfahrzeuge)	87,5	80
Kühlfahrzeuge	87,5	65,7
Kühlschiffe/Container	87,5	65,7

Für elektrische Betriebsmittel bestehen folgende Werte:

Tabelle Z 3: Emissionsfaktoren für den Sektor 2.G.1 Elektrische Betriebsmittel in Deutschland

Anwendung	Produktion	Bestand	Entsorgung
Hochspannung	<1,5 %	<0,6 %	ReUse: 0,5 %
Mittelspannung	<1,5 %	<0,1 %	Zerstörung: 10 % Außerbetriebnahme: 1,5 %
Andere	2022: 3 %	0,28 %	

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Kapitel 6 erläutert die Problemstellung und Herangehensweisen: Im Rahmen der Literatursauswertung wurden Publikationen aus mehreren Ländern zu Emissionsfaktoren und Rückgewinnungsraten in verschiedenen Unterquellgruppen der nationalen Emissionsinventare geprüft. Diese basieren zumeist nicht auf empirischen Daten, sondern auf Schätzungen durch Fachexperten.

Daneben wurden Veröffentlichungen der Europäischen Umweltagentur (European Environment Agency, EEA) ausgewertet, die sich mit den von Unternehmen auf EU-Ebene gemeldeten Mengen zu Aufbereitung und Zerstörung von F-Gasen und Ozonschicht abbauenden Stoffen befassen. Anzumerken ist, dass Datenlücken hinsichtlich der bisher gemäß EU F-Gas-Verordnung gemeldeten Mengen an F-Gasen für die Aufbereitung im Rahmen der Evaluierung der früheren Verordnung 517/2014 festgestellt worden waren. Weiterhin ist relevant, dass für Unternehmen keine Berichtspflicht für F-Gas-Mengen bestehen, die dem Recycling unterliegen.

Außerdem wurden eine Reihe von Unternehmensbefragungen durchgeführt sowie zwei Fachgespräche im Mai und Juni 2023 zur Entsorgung von elektrischen Betriebsmitteln und Kältemitteln.

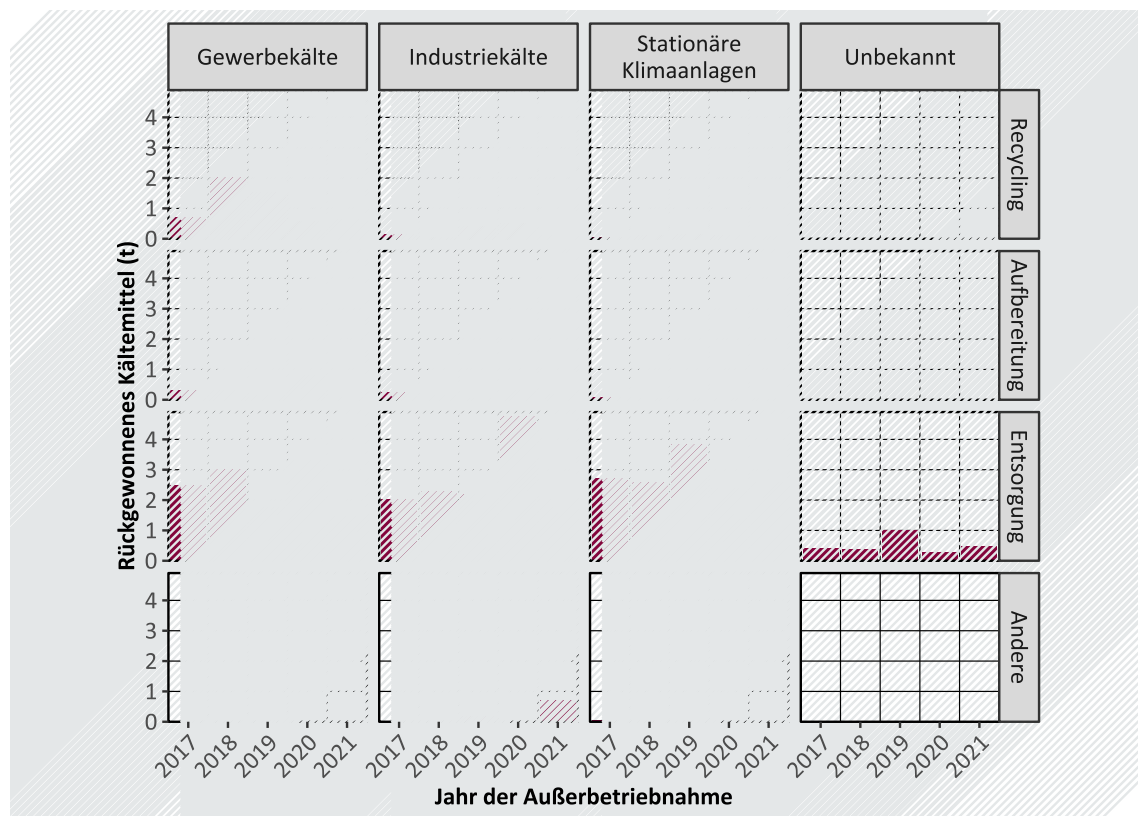
Des Weiteren standen für dieses Vorhaben zwei Datensätze zur Verfügung: Ein Auszug aus dem System „VDKF-LEC“, das als freiwilliges Instrument für anlagenbezogene Logbucheinträge den Mitgliedsunternehmen des Vereins Deutscher Kälte-Klimafachbetriebe e.V. (VDKF) in Deutschland angeboten wird, sowie ein Auszug aus dem verpflichtenden nationalen Anlagenregister Polens. Für Tschechien konnte die Fachpublikation von Müllerová et al. (2020) herangezogen werden, die Angaben zu den Annahmen des Phoenix Modells zur Berechnung der tschechischen UNFCCC-Emissionsdaten enthält.

Die Datenauswertung in Kapitel 7 bezieht sich vor allem auf die Befragungen von Unternehmen, Erkenntnisse aus den Fachgesprächen sowie auf den genannten Datensätzen.

Zuerst erfolgte die qualitative Auswertung der Entsorgungspraktiken für Kühlgeräte, größere stationäre Anlagen, Mobilklimaanlagen sowie elektrische Betriebsmittel.

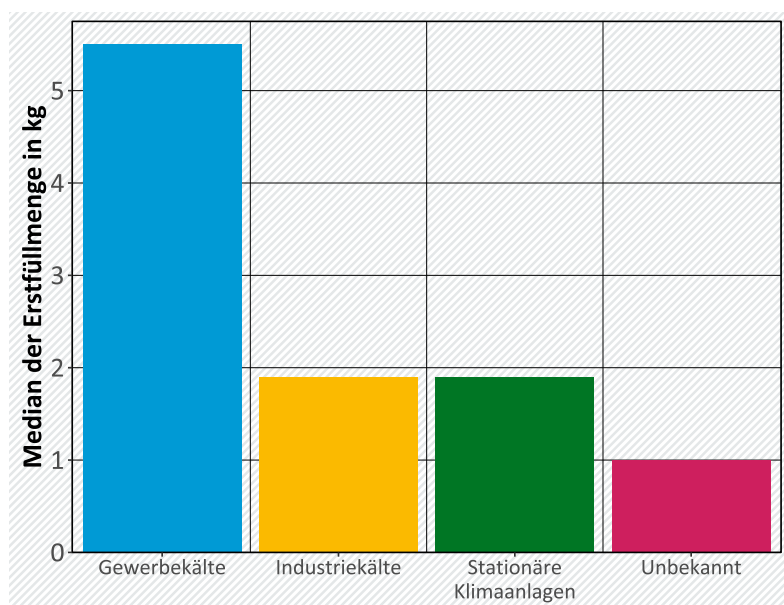
Anschließend erfolgte die Auswertung des Auszugs aus dem VDKF-LEC-System. Grundsätzlich muss festgestellt werden, dass der Restfüllstand von Anlagen bei Außerbetriebnahme im VDKF-LEC nicht erfasst wird, so dass nur die Erstfüllmenge bekannt ist.

Der VDKF-LEC Datensatz enthielt Informationen zu rückgewonnenen Kältemittelmengen aus einigen außer Betrieb genommenen Kälte- und Klimaanlagen. Zu beachten ist hierbei, dass die Daten von den Anlagenbetreibern elektronisch eingetragen werden. Der größte Teil der rückgewonnenen Kältemittelmengen entstammte der Gewerbekälte, Industriekälte und stationären Klimatisierung und ging in die „Entsorgung“ (Abbildung Z 1), wobei unklar war, was diese Kategorie genau beschreibt. So wurden die rückgewonnenen Kältemittelmengen zur „Entsorgung“ mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht vollständig der Zerstörung zugeführt.

Abbildung Z 1: Rückgewonnene Kältemittelmengen aus den verschiedenen Sektoren mit Verbleib im VDKF-LEC Datensatz

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Zahlen aus VDKF (2023)

Eine Analyse der Füllmengen der Anlagen im VDKF-LEC Datensatz ergab generell sehr kleine Füllmengen (Abbildung Z 2). Insbesondere der Sektor der Industriekälte wies überproportional viele Anlagen mit sehr kleinen Füllmengen auf. Weiterhin enthielt dieser Sektor auch diverse Anlagen mit klassischen Klimakältemitteln (z.B. R-410A und R-407C). Insgesamt kann der Sektor nicht als repräsentativ für Deutschland angesehen werden. Die Analyse der polnischen CRO-Datenbank bestätigte diese Annahme, da hier mehr als die Hälfte der Industriekälteanlagen eine Füllmenge von mehr als 300 kg aufwiesen.

Abbildung Z 2: Mediane der Erstfüllmengen von außer Betrieb genommenen Anlagen im VDKF-LEC Datensatz

Quelle: Eigene Abbildung basierend auf Daten aus VDKF (2023)

Anmerkung: Haushaltskühlgeräte nicht dargestellt

Tabelle Z 4 fasst die aus dem Datensatz des VDKF-LEC errechneten Werte für Rückgewinnungsraten zusammen und stellt sie den bisher genutzten Annahmen des deutschen Modells sowie dem tschechischen Phoenix Modell gegenüber. Zur Ergänzung sind die Angaben der 2006 IPCC-Guidelines ebenfalls aufgeführt.

Tabelle Z 4: Vergleich der durchschnittlichen Rückgewinnungsraten ($\eta_{\text{rec,d}} * p$) und durchschnittlichen Betriebsjahre der Anlagen (d) aus verschiedenen Quellen

Sektor	VDKF-LEC		Deutsches F-Gas Modell		Tschechisches Phoenix Modell		2006 IPCC-Guidelines	
	$\eta_{\text{rec,d}} * p$ (%)	d (a)	$\eta_{\text{rec,d}} * p$ (%)	d (a)	$\eta_{\text{rec,d}} * p$ (%)	d (a)	$\eta_{\text{rec,d}} * p$ (%)	d (a)
2.F.1.a Gewerbekälte	74,3	15,7	73,5	11,5	38,5	10,5	<63 ¹	7-15
2.F.1.c Industriekälte	75,0	14,8	66,3	15,8	38,5	17,0	<92 ²	15-30
2.F.1.f Stationäre Klimaanlage	81,6	11,6	70,7	14,3	38,5	13,5	<64 ³	10-20

¹ Mittelwert von 80 % * 70 % für steckerfertige Geräte und 70 % * 100 % für mittlere und große Geräte.

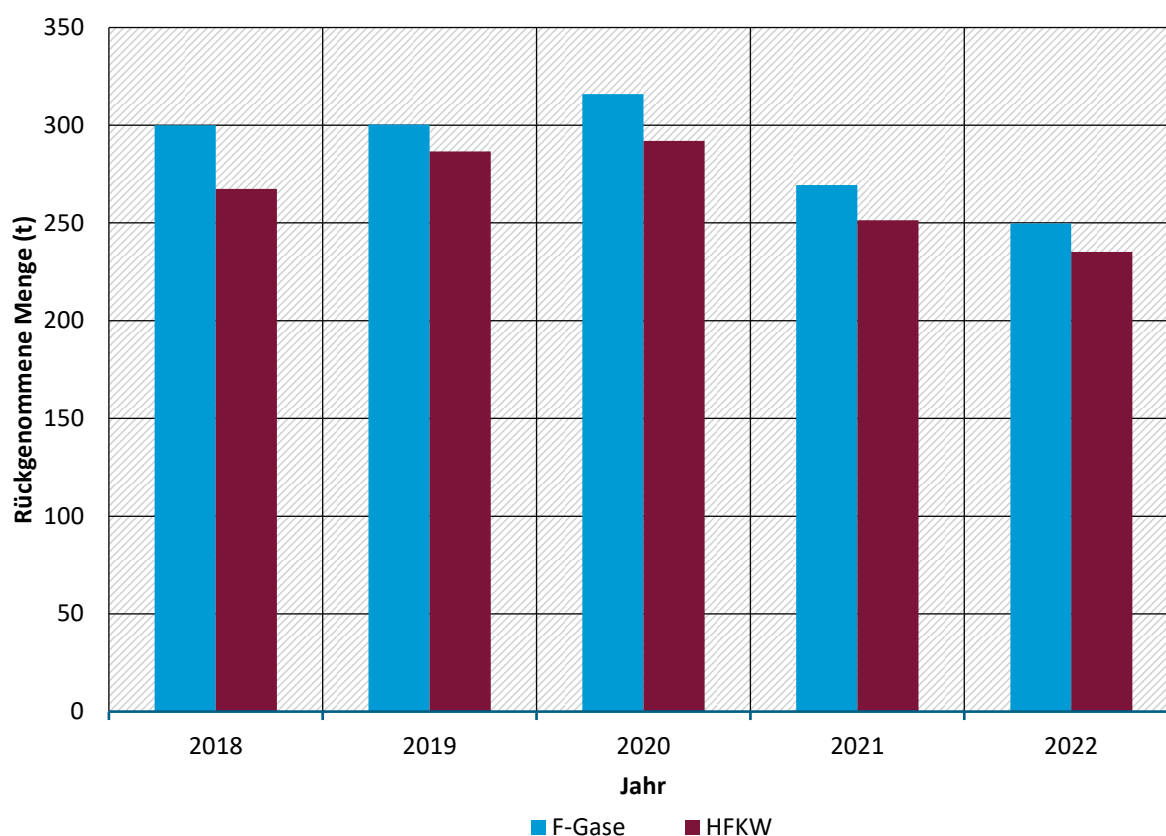
² Mittelwert von 90 % * 100 % für industrielle Kälte einschließlich Anlagen zur Lebensmittelverarbeitung und Kühlagerung und 95 % * 100 % für Kaltwassersätze.

³ 80 % * 80 % für private und gewerbliche Klimaanlage einschließlich Wärmepumpen.

Anmerkungen: Rückgewinnungsraten bezogen auf die Erstbefüllung mit F-Gasen ($\eta_{\text{rec,d}} * p$) und die durchschnittlichen Betriebsjahre der Anlagen (d) im VDKF-LEC Datensatz (Durchschnittswerte für die Jahre 2017-2021), dem deutschen F-Gas Modell (Annahmen für 2020 (UNFCCC 2023a)), dem tschechischen Phoenix Modell (Annahmen für 2018 (Müllerová et al. 2020)) und den IPCC-Guidelines von 2006 (IPCC 2006) auf Sektorebene.

Weiterhin wurden Daten zu rückgenommenen Kältemittelmengen ausgewertet, die im Rahmen von Unternehmensbefragungen erhoben werden konnten. Zu beachten ist, dass einige größere Unternehmen, die im Gasehandel bzw. Kältetechnikfachhandel tätig sind, keine quantitativen Angaben beitrugen wollten. So konnten nur Daten von vier größeren Gasehändlern in Deutschland analysiert werden. Folgende Abbildung Z 3 fasst diese rückgenommenen Mengen an Kältemitteln zusammen. Der Anteil von HFKW and der Gesamtmenge war mit 89 bis 95 % am höchsten. Die verbleibenden Mengen waren FCKW, HFCKW und uHFKW. Es zeigte sich ein rückläufiger Trend in den Jahren zwischen 2020 und 2022. Dies könnte durch vermehrtes Recycling von Kältemitteln durch Kältefachbetriebe oder zunehmende Einlagerung von rückgewonnenen Kältemitteln bedingt sein.

Abbildung Z 3: Rückgenommene F-Gasmenge vier größerer Gasehändler in Deutschland



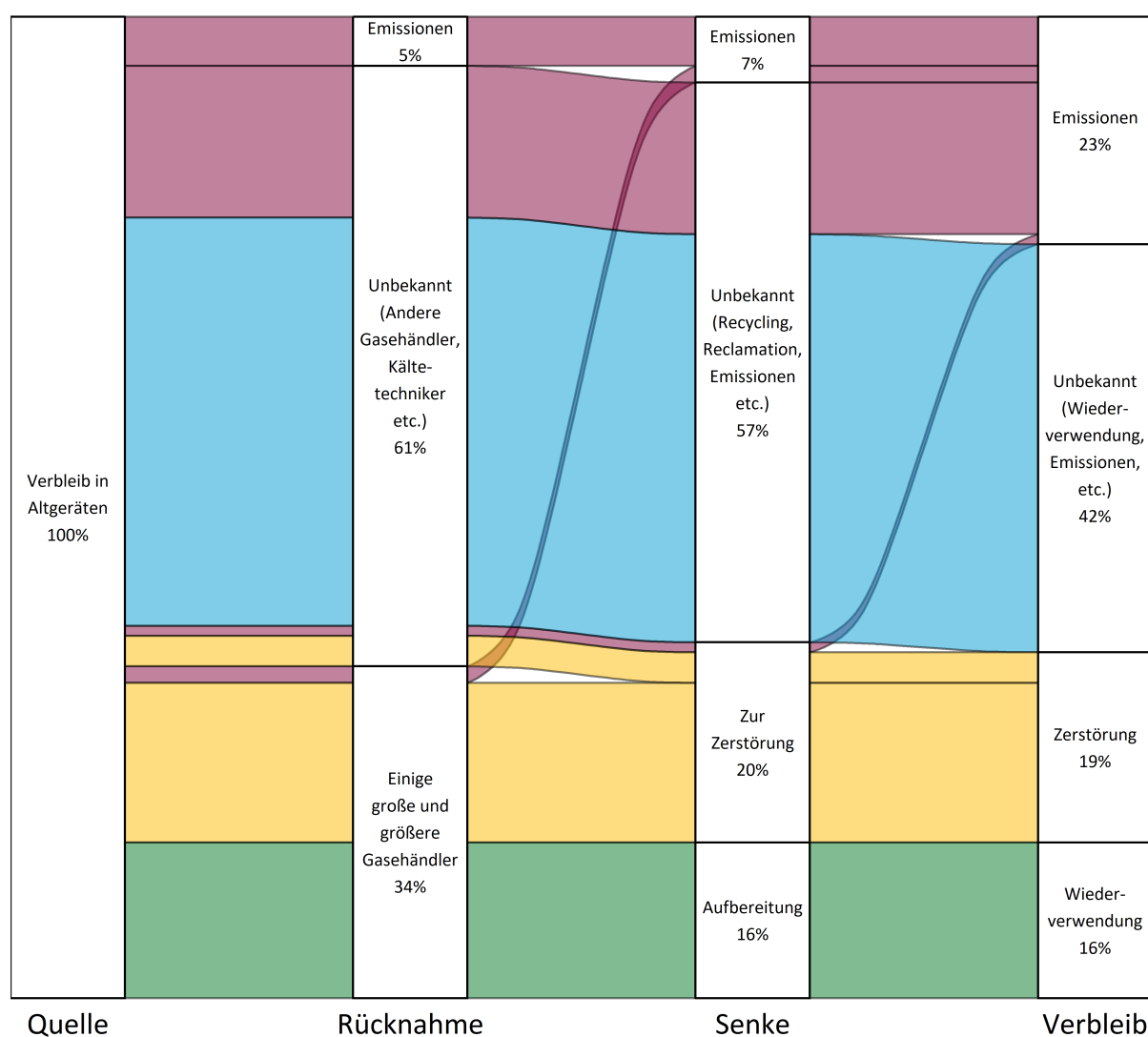
Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Daten von vier größeren Unternehmen, Öko-Recherche

Anmerkung: Für die Jahre 2018 und 2022 sowie für den HFKW-Anteil an der gesamten F-Gasmenge wurden Daten teilweise geschätzt.

Eine Mengenbilanz zu Rücknahme, Aufbereitung und Zerstörung von F-Gasen in Deutschland wurde ebenfalls auf Basis von Unternehmensdaten sowie den unter der Klimarahmenkonvention (UNFCCC) berichteten anfallenden Restmengen in Altanlagen am Lebensende und daraus entstehenden Emissionen erstellt. Die folgende Abbildung Z 4 fasst den Verbleib der HFKW-Mengen aus stillgelegten Kälte- und Klimaanlageanlagen in Deutschland im Jahr 2021 zusammen, wobei auf mehrere Annahmen zurückgegriffen werden musste. Laut UNFCCC-berichteten Daten verblieben in Kälte- und Klimaanlageanlagen an deren Lebensende ca. 1.788 t HFKW und 415 t emittierten. Davon wurden ca. 605 t (34 % der Gesamtmenge) von Gasehandelsunternehmen zurückgenommen und entweder aufbereitet oder der Zerstörung zugeführt. Auf Basis von Angaben zur Zerstörung einiger Unternehmen in Deutschland, wurde

angenommen, dass 291 t der Zerstörung zugeführt wurden und 283 t wiederaufbereitet wurden. Die verbliebenen 30 t (5 %) wurden den Emissionen als geschätzte Handhabungsverluste zugeschrieben. Die verbliebenen 61 % der Restmenge laut UNFCCC (1.094 t) konnten nicht zugeordnet werden. Lediglich die ausstehenden 20 % der zerstörten HFKW-Menge (74 t) wurde der Zerstörung zugeordnet. Insgesamt wurden 16 % der rückgenommenen HFKW aufbereitet und damit wiederverwendet, 19 % wurden zerstört, 23 % emittierten und 42 % konnten nicht weiter zugeordnet werden. Diese unbekannte Fraktion enthielt mit hoher Sicherheit größere recycelte Mengen, möglicherweise zusätzliche wiederaufbereitete Mengen sowie möglicherweise weitere Emissionen.

Abbildung Z 4: Sankey-Diagramm der möglichen Verwertung von HFKW aus außer Betrieb genommenen stationären Kälte- und Klimaanlage in Deutschland im Jahr 2021



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Kapitel 8 enthält die Ableitung neuer Modellannahmen für das deutsche Modell im Bereich der Kälte- und Klimaanlage, die sich aus den Ergebnissen der Recherche ergeben haben. Generell lässt sich feststellen, dass die meisten der bisher im deutschen Modell getroffenen Annahmen zu Restfüllständen, Rückgewinnungsraten und der Lebensdauer durch das Projekt bestätigt werden konnten. Die Datenlage lässt nicht auf höhere Rückgewinnungsraten bzw. geringere oder höhere Entsorgungsemissionen schließen. Die bisherigen Annahmen behalten daher ihre

Gültigkeit und werden zunächst für mindestens 10 Jahre Bestand haben. Einzelne Anpassungen in Subsektoren sind allerdings fallweise möglich, falls festgestellt werden sollte, dass die Lücke zwischen Modell und Realität zu groß wird.

Die Änderungen im Modell beziehen sich ausschließlich auf die Lebensdauer in verschiedenen Subsektoren. Die Lebensdauer von Kälteanlagen in Discountern wird von 10 auf 12 Jahre angehoben; die Lebensdauer von großen Anlagen in der Industriekälte wird von 30 auf 25 Jahre verkürzt; die Lebensdauer von Multi-Split- und VRF-Anlagen wird von 13 auf 10 Jahre verkürzt.

Kapitel 9 beschreibt die Ergebnisse für den Bereich elektrische Betriebsmittel. Da die Datenerhebung in diesem Sektor nicht durch Öko-Recherche erfolgt, sondern die Daten des Monitorings der Selbstverpflichtung genutzt werden, enthält das Kapitel keine direkten Ableitungen, sondern Verbesserungspotenziale zum einen des Monitorings und zum anderen der Entsorgung/Rückgewinnung von SF₆ aus elektrischen Betriebsmitteln selbst. Für das Monitoring werden drei Verbesserungspotenziale beschrieben: die Erfassung von Havarien im Fragebogen, die Erfassung von Daten der Entsorgungsbetriebe, die bisher nicht Teil des Monitorings sind sowie die Nutzung der Daten, die durch Abfallbilanzen entstehen, um ein besseres Bild aller Entsorgungsströme zu erhalten. Im Bereich der Entsorgung wäre anzudenken, ein öffentliches Register von Entsorgungsbetrieben zu erstellen, um die Hürden einer ordnungsgemäßen Entsorgung zu verringern, an sich die Zahl der Entsorger selbst zu erhöhen, durch gezieltes Zugehen auf Betriebe, die bisher „nur“ die anderen Rohstoffe der Betriebsmittel entsorgen und zuletzt eine Informationsaktion mit der Zielgruppe der Windkraftanlagen-Betreiber durchzuführen, da das Bewusstsein um SF₆ in diesem Bereich noch ausbaufähig ist.

In Kapitel 10 werden auf Basis der Ergebnisse Schlussfolgerungen formuliert. Insgesamt ist in Deutschland von Rückgewinnung, Aufarbeitung und geregelter Entsorgung in relevantem, aber nicht vollständigem Umfang auszugehen.

Weitere Maßnahmen von politischer Seite, aber auch durch Industrie und Verbände sind wünschenswert, um die Rückgewinnung bzw. Rücknahme von F-Gasen sowie die Wiederaufbereitung bzw. Zuführung zur geregelten Zerstörung zu fördern.

Diese könnten folgende Punkte beinhalten:

- ▶ Informationskampagne zu den gesetzlichen Verpflichtungen zur Rückgewinnung und Rücknahme von F-Gasen sowie praktische Empfehlungen für Unternehmen.
- ▶ Auswertung von vorliegenden Daten auf Ebene der Bundesländer und Kreise zur Rücknahme von gebrauchten Kältemitteln, Zuführung zur Wiederaufbereitung und Zerstörung. Eine solche Auswertung könnte vom BLAC (Bund-Länder-Arbeitskreis Chemikaliensicherheit) in Zusammenarbeit mit der Servicestelle Marktüberwachung (SMÜ) durchgeführt werden.
- ▶ Daneben könnte eine erneute Erhebung von Seiten der Industrie und/oder Verbände zu detaillierteren Informationen in einzelnen Sektoren führen.
- ▶ Verbesserte Zusammenarbeit zwischen Abfallbehörden und Institutionen zum Vollzug der ChemKlimaschutzV, um die Problematik bestehender Andienungspflichten an Sonderabfallverbrennungsanlagen in manchen Bundesländern aufzulösen. Die gebrauchten F-Gase sollten nicht zwangsläufig der thermischen Verwertung zugeführt werden, sofern die Möglichkeit zur Aufbereitung besteht.

Summary

To fulfill the reporting obligations under the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), emissions of greenhouse gases in Germany are estimated annually and submitted to the Climate Secretariat. The procedure for this is set out in the UNFCCC Reporting Guidelines, which refer to the methods of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), namely the “2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories” and the report “Refinement of the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse gas inventories” from 2019.

The F-gases (i.e. HFCs, PFCs, SF₆, NF₃ and some other F-gases) are also included in the national emissions reporting. Estimates for the two emission types, filling emissions and emissions from stock, are made indirectly via activity rates and emission factors. Disposal emissions, on the other hand, are estimated based on the remaining filling volume at the time of disposal and the recovery rate at the end of the system's life. Due to a lack of empirical data, the values for emission factors, lifespans, residual filling levels and recovery rates are often assumed to be constant over several years or are successively changed based on country-specific model assumptions from 2011/2012 (Schwarz et al. 2013). Although the IPCC guidelines specify default values for many factors, the ranges given are usually very large and therefore not directly applicable to national conditions. The following Table S 1 summarizes the default values for filling quantities, service life, recovery rate and remaining filling quantity for refrigeration and air conditioning systems (2.F.1) in accordance with the IPCC guidelines.

Table S 1: Default values of the IPCC Guidelines for refrigeration and air-conditioning systems

Sector	Refrigerant charge (kg)	Lifetime (years)	Recovery rate (%)	Remaining charge (%)
Category	M	D	$\eta_{rec,d}$	p
Domestic refrigeration	$0.05 \leq M \leq 0.5$	$12 \leq d \leq 20$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$0 < p < 80$
Plug-in units	$0.2 \leq M \leq 6$	$10 \leq d \leq 15$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$0 < p < 80$
Medium and large commercial refrigeration	$50 \leq M \leq 2,000$	$7 \leq d \leq 15$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$50 < p < 100$
Transport refrigeration	$3 \leq M \leq 8$	$6 \leq d \leq 9$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$0 < p < 50$
Industrial refrigeration	$10 \leq M \leq 10,000$	$15 \leq d \leq 30$	$0 < \eta_{rec,d} < 90$	$50 < p < 100$
Chillers	$10 \leq M \leq 2,000$	$15 \leq d \leq 30$	$0 < \eta_{rec,d} < 95$	$80 < p < 100$
Air-conditioning units incl. heat pumps	$0.5 \leq M \leq 100$	$10 \leq d \leq 20$	$0 < \eta_{rec,d} < 80$	$0 < p < 80$
Mobile air-conditioning	Ships: $5 \leq M \leq 6,500$ Trains: $10 \leq M \leq 30$ Busses: $4 \leq M \leq 18$ Other: $0.5 \leq M \leq 2$	$9 \leq d \leq 16$	$0 < \eta_{rec,d} < 50$	$0 < p < 50$

Therefore, as part of this project, the factors previously used to estimate disposal emissions in the sub-categories 2.F.1 Refrigeration and air conditioning systems and 2.G.1 Electrical equipment will be checked and adjusted. New requirements resulting from the revised EU F-Gas Regulation and other legal bases are also included. In addition to a literature search, new insights into disposal volumes and practices were gained through interviews with experts from relevant industries and two technical workshops for the affected sectors.

First, an overview of the relevant legal bases is given in this report (Chapter 3), which begins with international regulations. In addition to the Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), these also include the Montreal Protocol with the Kigali Amendment and the Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal. At EU level, the following are considered: the EU F-Gas Regulation in the revised version (EU) 2024/573, the EU Regulation on substances that deplete the ozone layer in the revised version (EU) 2024/590, the Directive 2006/40/EC on emissions from air conditioning systems in motor vehicles as well as the EU End-of-Life Vehicles Directive, the EU Waste Electric and Electronic Equipment (WEEE) Directive, the Waste Framework Directive, the Regulation on the European Waste Catalogue and the so-called “Governance Regulation” for compliance with climate and energy targets. The relevant national legal bases for Germany, which are presented in the report, are the Chemicals Climate Protection Ordinance (ChemKlimaschutzV), the Chemicals Ozone Layer Ordinance (ChemOzonschV), the Circular Economy Act (KrwG), the End-of-Life Vehicles Ordinance (AltfahrzeugV), the Environmental Statistics Act (UstatG), the Electrical and Electronic Equipment Act (ElektroG) and the Technical Instructions for Keeping Air Clean (TA Luft).

Chapter 4 subsequently describes technical processes for take back, recycling, reclaim as well as for destruction of F-gases. It should be emphasized that several research projects are currently dealing with methods for the processing of refrigerant mixtures, such as distillation and membrane technologies.

Chapter 5 presents and classifies the previous model assumptions for recovery and disposal in Germany. The following Table S 2 summarizes the previous assumptions.

Table S 2: Recovery rates and residual charge from the current model, 2021

Type of system	Residual charge (% of first fill)	Recovery rate (% of residual charge)
Centralised supermarket systems	87,5	80
Condensing units	85	80
Hermetic systems in commercial and industrial refrigeration	90	60
Domestic refrigeration	95,5	73,3
Ice cream makers	95,5	65
Food industry	85	80
Other industrial processes	85	80
Plug-in (moveable) room air-conditioning systems	75	40
Split air-conditioning systems < 5 kW	87,5	60

Type of system	Residual charge (% of first fill)	Recovery rate (% of residual charge)
Split air-conditioning systems > 5 kW	87,5	60
Rooftop (multi-split air-conditioning systems)	87,5	80
VRF room air-conditioning systems	87,5	80
Chillers (displacement compressor)	90	80
Centrifugal chillers	90	80
Heat pumps	75	65
Dish washers with heat pump function	95.5	85
Heat pump tumble dryer	95,5	65
Mobile air-conditioning systems (cars und commercial vehicles)	34	50
Mobile air-conditioning systems (busses)	34	38
Mobile air-conditioning systems (agricultural machinery)	34	11.7
Mobile air-conditioning systems (ships)	87.5	80
Mobile air-conditioning systems (trains)	87.5	80
Refrigerated vehicles	87.5	65.7
Refrigerated ships/containers	87.5	65.7

The following values are used for electrical equipment:

Table S 3: Emission factors for the sector 2.G.1 Electrical equipment in Germany

Sector	Manufacturing	Stock	Disposal
High voltage	<1.5 %	<0.6 %	ReUse: 0.5 %
Medium voltage	<1.5 %	<0.1 %	Destruction: 10 %
Other	2022: 3 %	0.28 %	Decommissioning: 1.5 %

Source: Own illustration, Öko-Recherche

Chapter 6 explains the problem and approaches: As part of the literature evaluation, publications from several countries on emission factors and recovery rates in various sub-source groups of the national emissions inventories were examined. These are usually not based on empirical data, but on estimates by technical experts.

In addition, publications from the European Environment Agency (EEA) were analyzed that deal with the amounts reported by companies at EU level for reclaim and destruction of F-gases and substances that deplete the ozone layer. It should be noted that data gaps regarding the quantities of F-gases for reclamation previously reported under the EU F-Gas Regulation were

identified as part of the evaluation of the previous Regulation 517/2014. Furthermore, it is relevant that companies are not required to report F-gas quantities that are subject to recycling.

Moreover, a series of interviews with companies were carried out as well as two technical workshops in May and June 2023 on the disposal of electrical equipment and refrigerants.

Furthermore, two data sets were available for this project: an excerpt from the mandatory national system register in Poland and an excerpt from the “VDKF-LEC” database, which is a voluntary instrument for system-related logbook entries available to member companies of the Association of German Refrigeration and Air Conditioning Companies e.V. (VDKF) in Germany. For the Czech Republic, the publication by Müllerová et al. (2020) could be used, which contains information on the assumptions of the Phoenix model for calculating the Czech UNFCCC emission data.

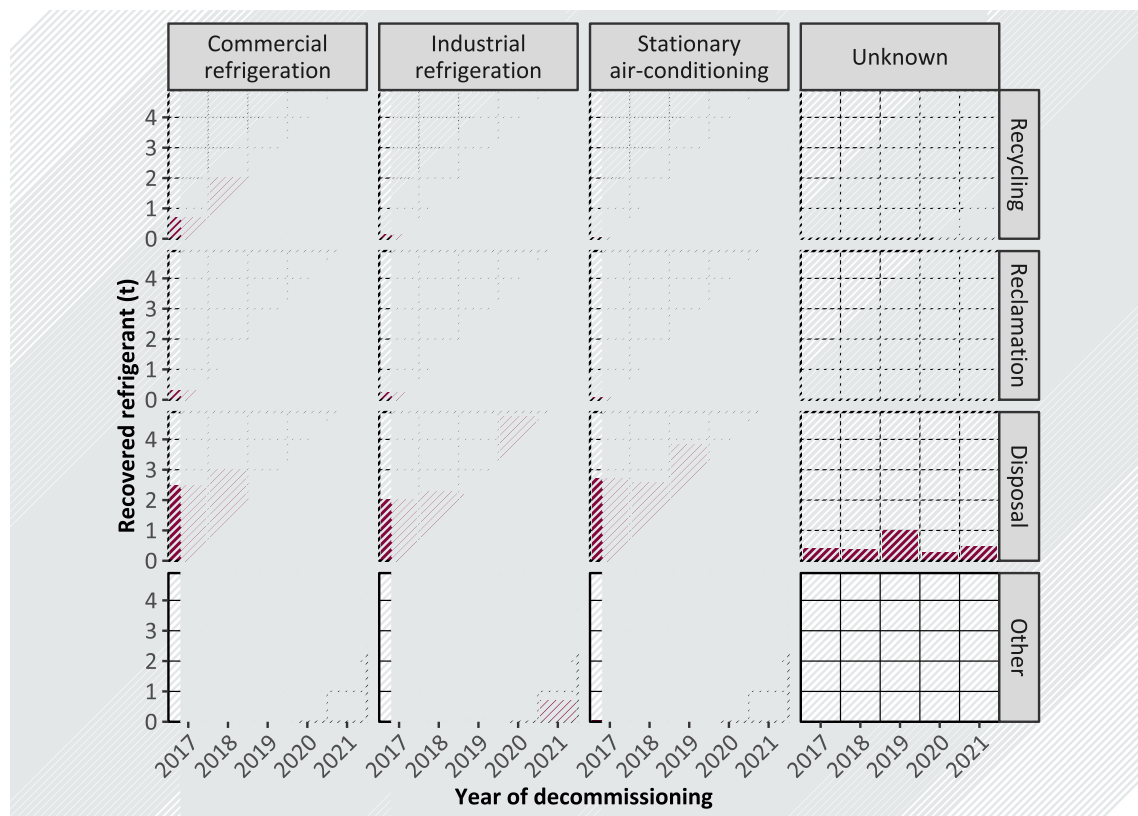
The following data analysis in Chapter 7 refers primarily to information from the interviews with companies, findings from the technical workshops and the data sets mentioned.

First, the qualitative evaluation of the disposal practices for refrigerators, larger stationary systems, mobile air conditioning systems and electrical equipment is carried out.

The extract from the VDKF-LEC system is then evaluated. Basically, it must be noted that the remaining filling level of systems when decommissioned is not recorded in the VDKF-LEC, so that only the initial filling quantity is available.

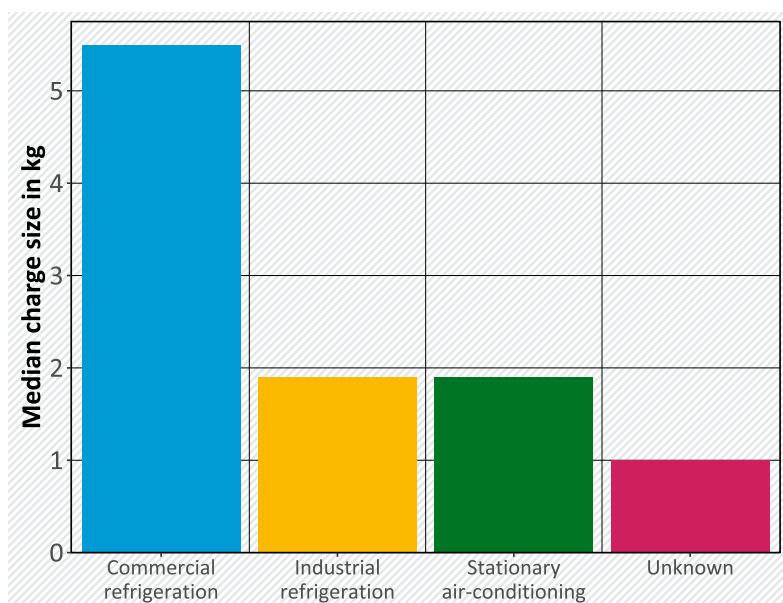
The VDKF-LEC dataset contained information on refrigerants recovered from decommissioned refrigeration and air-conditioning equipment. The data was entered into the database by technicians electronically. The largest share of recovered refrigerant came from the sector of commercial and industrial refrigeration, and stationary air-conditioning equipment, and was destined for “disposal” (Figure S 1). It was unclear what “disposal” specifically referred to and it can be assumed with high confidence that these quantities were not all sent for destruction.

Figure S 1: Recovered refrigerant quantities from decommissioned equipment in different sectors and subsectors with destination in the VDKF-LEC dataset



Source: Own illustration based on VDKF (2023)

An analysis of the charge sizes of the equipment in the VDKF-LEC dataset revealed overall very low charges (Figure S 2). Especially the sector of industrial refrigeration had a very large share of units with very small charge sizes and also contained systems with refrigerants that are usually only used in stationary air-conditioning equipment (e.g. R-410A and R-407C). Overall, the sector was not representative for Germany. An analysis of charge sizes from the Polish CRO database confirmed this assessment, since over half of all Polish industrial refrigeration systems had charge sizes over 300 kg.

Figure S 2: Median charge size of decommissioned equipment in the VDKF-LEC dataset

Source: Own illustration based on VDKF (2023)

Note: Domestic refrigeration not shown

Table S 4 summarises the calculated recovery rates based on the VDKF-LEC dataset and compares it to current assumptions from the German F-gas model and the Czech model. Additionally, the specifications from the 2006 IPCC Guidelines are also listed.

Table S 4: Comparison of average recovery rates from different sources

Sector	VDKF-LEC		German F-gas model		Czech Phoenix model		2006 IPCC Guidelines	
	$\eta_{rec,d} * p$ (%)	d (a)	$\eta_{rec,d} * p$ (%)	d (a)	$\eta_{rec,d} * p$ (%)	d (a)	$\eta_{rec,d} * p$ (%)	d (a)
2.F.1.a Commercial refrigeration	74.3	15.7	73.5	11.5	38.5	10.5	<63 ¹	7-15
2.F.1.c Industrial refrigeration	75.0	14.8	66.3	15.8	38.5	17.0	<92 ²	15-30
2.F.1.f Stationary air-conditioning	81.6	11.6	70.7	14.3	38.5	13.5	<64 ³	10-20

¹ Mean of 80 % * 70 % for plug-in units and 70 % * 100 % for medium and large systems.

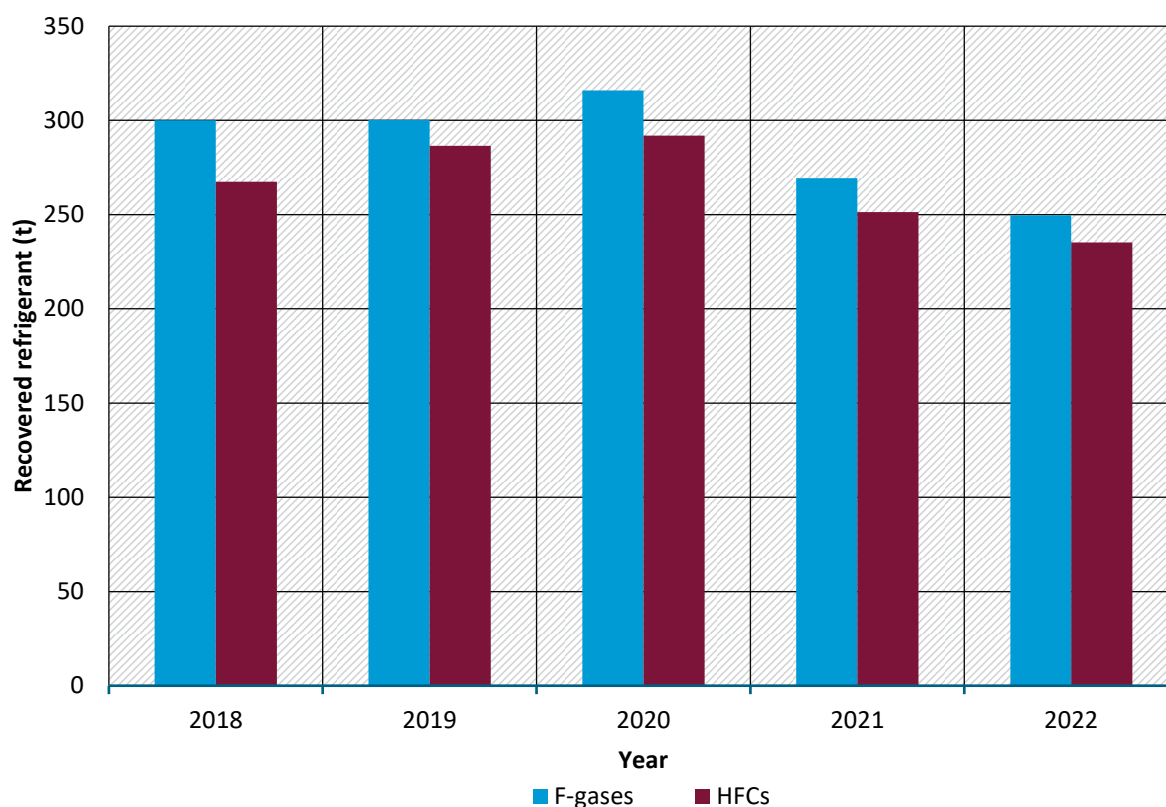
² Mean of 90 % * 100 % for industrial refrigeration including units for food processing and cold storage, and 95 % * 100 % for chillers.

³ 80 % * 80 % for private and commercial air-conditioning including heat pumps.

Note: Recovery rates relative to the first fill with F-gases ($\eta_{rec,d} * p$) and the average operating years of equipment (d) in the VDKF-LEC dataset (averages for the years 2017-2021), the German F-gas model (assumptions for 2020 (UNFCCC 2023a)), the Czech Phoenix model (assumptions for 2018 (Müllerová et al. 2020)) and the IPCC Guidelines from 2006 (IPCC 2006) on a sector basis.

Furthermore, data on the quantities of recovered refrigerants that could be collected in the course of company surveys was analyzed. It should be noted that some larger companies operating in the gas trade or specialized refrigeration trade did not wish to contribute any quantitative data. It was therefore only possible to analyze data from four larger gas distributors. Figure S 3 below summarizes these recovered quantities of refrigerants. The proportion of HFCs in the total quantity was the highest at 89 to 95 %. The remaining quantities were CFCs, HCFCs and unsaturated HFCs. There was a downward trend in the years between 2020 and 2022, which could be due to increased recycling of refrigerants by specialized refrigeration companies or increasing storage of recovered refrigerants.

Figure S 3: Recovered F-gas quantities from four larger gas dealers in Germany



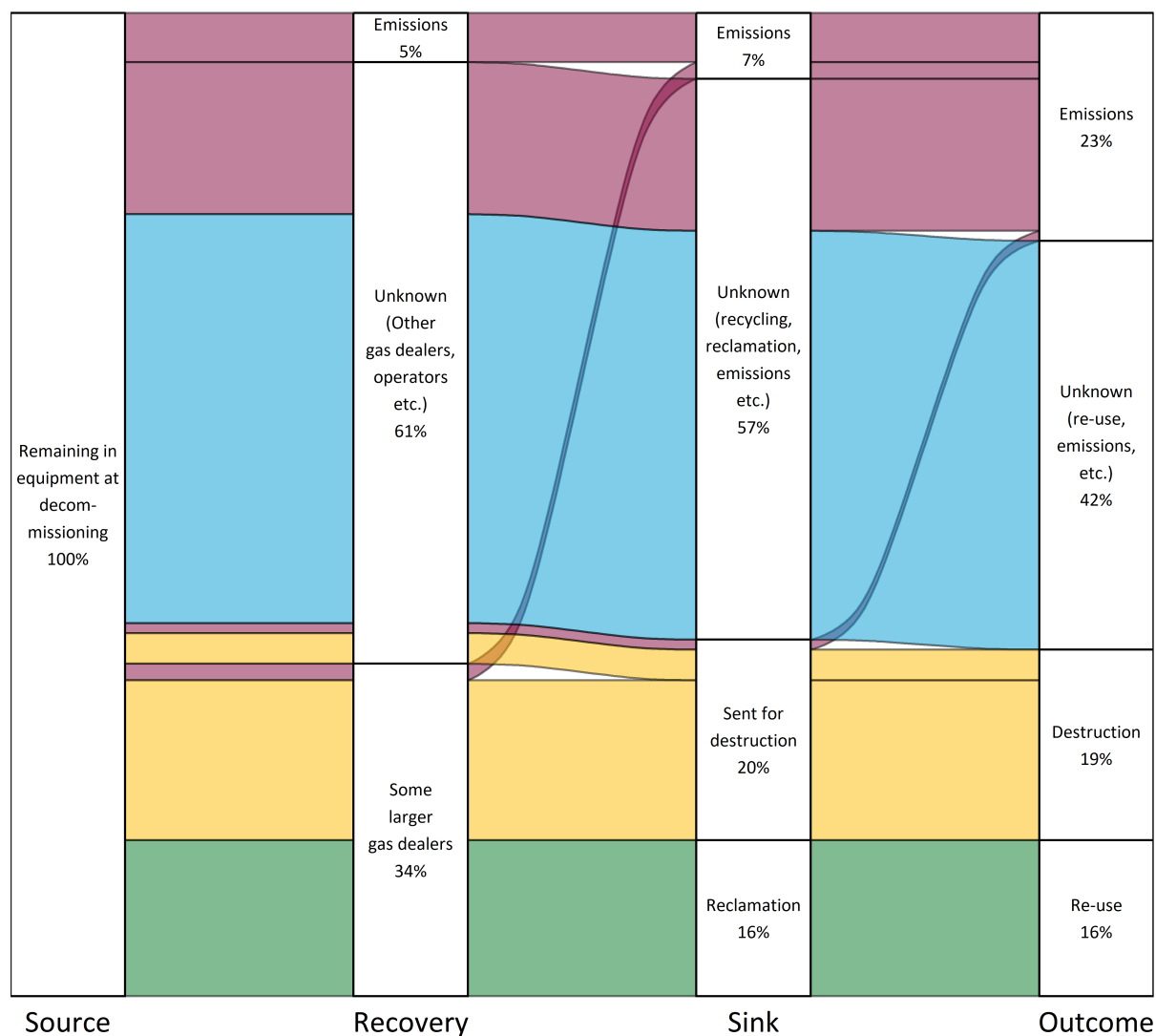
Source: Own illustration based on data obtained from four larger companies, Öko-Recherche

Note: Data for 2018 and 2022 and for the HFC share of the total F-gas quantities were partially estimated

A quantity balance on the return, processing and destruction of F-gases in Germany was also prepared based on company data and the residual quantities in old systems at the end of their life and the resulting emissions reported under the UN Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). The following Figure S 4 summarizes the outcome of the HFC quantities from decommissioned refrigeration and air-conditioning systems in Germany in 2021, whereby several assumptions had to be made. According to data reported to the UNFCCC, around 1,788 t of HFCs remained in refrigeration and air-conditioning systems at the end of their life and 415 t were emitted. Of these, around 605 t (34 % of the total) were taken back by gas trading companies and either processed or destroyed. Based on information on destruction from some companies in Germany, it was assumed that 291 t were destroyed and 283 t were reprocessed. The remaining 30 t (5 %) were attributed to emissions as estimated handling losses. The remaining 61 % of the residual amount according to the UNFCCC (1,094 t) could not be attributed. Only the remaining 20% of the destroyed HFC amount (74 t) was attributed to

destruction. In total, 16 % of the collected HFCs were reprocessed and thus reused, 19 % were destroyed, 23 % were emitted and 42 % could not be further attributed. This unknown fraction almost certainly contained larger recycled amounts, possibly additional reprocessed amounts and possibly further emissions.

Figure S 4: Sankey diagram of the possible utilisation of HFCs from decommissioned stationary refrigeration and air-conditioning systems in Germany in 2021



Source: Own illustration, Öko-Recherche

Chapter 8 contains the derivation of new model assumptions for the German model in the area of refrigeration and air conditioning systems, which resulted from the research. In general, it can be stated that most of the assumptions in the German model regarding residual filling levels, recovery rates and lifetime were confirmed by the project. The data does not suggest higher recovery rates or lower or higher disposal emissions. The previous assumptions therefore remain valid and will initially last for at least 10 years. However, individual adjustments in sub-sectors are possible on a case-by-case basis if it is determined that the gap between model and reality is becoming too large.

The changes in the model relate only to lifetime adjustments in different subsectors. The lifetime of refrigeration systems in discount stores will be increased from 10 to 12 years; the lifespan of

large industrial refrigeration systems is shortened from 30 to 25 years; the lifespan of multi-split and VRF systems is shortened from 13 to 10 years.

Chapter 9 describes the results for the sector of electrical equipment. Since the data collection in this sector is not carried out through Öko-Recherche, but the data from the monitoring of the voluntary commitment is used, the chapter does not contain any direct derivations, but rather potential for improvement in the monitoring and the disposal/recovery of SF₆ from electrical equipment itself. Three areas of potential for improvement are described for the monitoring: the recording of accidents, as in the loss of the whole fill of the electrical equipment, in the questionnaire, the recording of data from waste disposal companies that have not yet been part of the monitoring, and the use of the data provided by waste balances in order to get a better picture of all disposal flows. In the area of waste disposal, it should be considered to create a public register of waste disposal companies in order to reduce the hurdles to proper disposal, and to increase the number of waste disposal companies themselves by specifically approaching companies that have so far "only" disposed other raw materials and finally to carry out an information campaign with the target group of windmill operators, as awareness of SF₆ in this area can still be improved.

In Chapter 10, conclusions are formulated based on the results. Overall, recovery, processing and regulated disposal can be assumed to a relevant but not complete extent in Germany. Further measures from the political side, but also from industry and associations are desirable in order to promote the recovery or return of F-gases as well as reprocessing or delivery for regulated destruction. These could include the following points:

- ▶ Information campaign on the legal obligations to recover and return F-gases and practical recommendations for companies.
- ▶ Evaluation of available data at the state and district level on the return of used refrigerants, delivery for reprocessing and destruction. Such an evaluation could be carried out by BLAC (Bund-Länder-Arbeitskreis Chemikaliensicherheit) in cooperation with the Market Surveillance Service Center (SMÜ).
- ▶ In addition, a new survey by industry and/or associations could lead to more detailed information in individual sectors.
- ▶ Improved cooperation between waste management authorities and institutions responsible for enforcing the Chemical Climate Protection Ordinance in order to resolve the problem of obligations to transfer hazardous waste to incineration plants in some federal states. The used F-gases should not necessarily be sent for thermal destruction if there is the possibility of reprocessing.

1 Hintergrund und Problemstellung

Deutschland hat sich als Vertragsstaat der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (United Nations Framework Convention for Climate Change – UNFCCC) verpflichtet, jährlich Emissionen von Treibhausgasen zu berichten. Die Anforderungen an die Berichterstattung von Annex I-Ländern, zu denen die Bundesrepublik Deutschland gehört, sind in den UNFCCC Annex I Reporting Guidelines festgelegt, die sich wiederum auf methodische Ansätze der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines beziehen. Die Emissionsberichterstattung muss Qualitätskriterien erfüllen, die den 2006 IPCC „Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories“ und dem 2019 „Refinement of the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories“ entnommen werden können. Die Grundprinzipien der Berichterstattung sind: Transparenz, Konsistenz, Vergleichbarkeit, Vollständigkeit und Genauigkeit.

Im Rahmen der Emissionsabschätzungen für die F-Gase werden für die beiden Emissionstypen Befüllungs- und Bestandsemissionen indirekt über die Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren berechnet. Entsorgungsemissionen werden hingegen über die Restfüllmenge zum Zeitpunkt der Entsorgung und die Rückgewinnungsrate am Lebensende der Anlagen geschätzt.

Für die nationale Berichterstattung wird hierzu eine Vielzahl von Herangehensweisen zur Datengewinnung genutzt. Zum einen beruht die Abschätzung auf Marktdaten und Verkaufsstatistiken, zum anderen ersetzen Modelle fehlende Daten. Dabei fließen auch in diese eine Vielzahl von Parametern ein, um die Emissionsabschätzung möglichst realitätsnah zu gestalten. Dabei müssen die Parameter, wie erwähnt, den Qualitätskriterien der IPCC-Guidelines genügen. Diese geben für fast alle Sektoren sogenannte Default-Faktoren zur Emissionsermittlung an, das heißt es werden Spannweiten angegeben, die durch glaubwürdige Quellen belegt sind. Den berichtenden Ländern steht es aber frei, diese zu nutzen, und sie können auch darauf verzichten, wenn ihnen selbst genauere Daten zur Verfügung stehen.

Die Modelle für die Berichterstattung können nicht jedes Jahr aktualisiert werden, daher werden über mehrere Jahre dieselben Faktoren als konstant angenommen oder nur einzelne Teilbereiche aktualisiert. Aus diesem Grund ist es notwendig, regelmäßig eine umfassende Überprüfung der bisherigen Parameter durchzuführen, diese gegebenenfalls anzupassen und auch für die kommenden Jahre zu gestalten.

2 Ziel und Gegenstand des Forschungsprojekts

Für die meisten Einsatzbereiche von F-Gasen müssen die Emissionen indirekt durch Kombination von Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren zur Berechnung von Befüllungs- und Bestandsemissionen bzw. von Aktivitätsraten, durchschnittlicher Lebensdauer, Rückgewinnungsraten und Restfüllständen zur Berechnung von Entsorgungsemissionen ermittelt werden (s. Abschnitt 5.1).

Emissionsfaktoren, Lebensdauern, Restfüllstände und Rückgewinnungsraten für die nationale Emissionsberechnung von F-Gasen werden wegen fehlender empirischer Daten häufig über mehrere Jahre als konstant angenommen oder sukzessive, basierend auf länderspezifischen Modellannahmen aus den Jahren 2011/2012 (Schwarz et al. 2013), geändert. Die IPCC-Guidelines geben zwar Default-Werte für viele Faktoren vor, die angegebenen Spannen sind aber in der Regel sehr groß und daher nicht unmittelbar auf nationale Verhältnisse anwendbar. Beispielsweise wird für die Rückgewinnungsrate von steckerfertigen Geräten der Gewerbekälte eine Spannbreite zwischen Null und 70 Prozent angegeben, das deutsche Modell rechnet mit Werten zwischen 33 % im Jahr 2003 und 60 % im Jahr 2020 (Schwarz et al. 2013).

Aufgrund der vorliegenden Informationen zur nationalen Entsorgungspraxis in der Kälte- und Klimatechnik ist es möglich, dass zwischen den aktuell genutzten und den tatsächlichen Faktoren zur Berechnung der Entsorgungsemissionen erhebliche Diskrepanzen bestehen. So gibt es z.B. Hinweise, dass nur wenige Single-Split-Raumklimageräte von Fachfirmen deinstalliert werden, was auf eine Rückgewinnungsrate von nur ca. 10 % hinweist; im deutschen THG-Inventar werden aktuell Werte zwischen 38 % (2008) bis 60 % (2020) genutzt. Hinweise auf höhere Entsorgungsemissionen und veraltete Berechnungsmodelle gibt es auch bei mobilen Klimaanlageanlagen von Fahrzeugen, insbesondere bei Pkw, und bei elektrischen Betriebsmitteln.

Aus diesen Gründen wurden die in Deutschland verwendeten Faktoren zur Berechnung der Entsorgungsemissionen in den Unterquellgruppen 2.F.1 Kälte- und Klimaanlageanlagen und 2.G.1 Elektrische Betriebsmittel einem Realitätscheck unterworfen, im Hinblick auf neue Erkenntnisse und aktuelle Datenverfügbarkeit geprüft und dem Stand der Technik angepasst. Sich ändernde gesetzliche Vorgaben, die zu Emissionsminderungen führen könnten, wurden ebenfalls berücksichtigt.

Neben der Sichtung einschlägiger Literatur wurden zur Informationsbeschaffung Fachgespräche und Interviews mit Fachleuten sowie zwei Workshops durchgeführt.

Ein Teil der Ergebnisse wurde in der Fachzeitschrift *Atmosphere* im Januar 2024 veröffentlicht (Behringer et al. 2024).

3 Gesetzliche Grundlagen für Rückgewinnung, Wiederaufbereitung und Entsorgung von F-Gasen sowie für die Berichterstattung von F-Gasen

3.1 Internationale Abkommen

Auf internationaler Ebene werden F-Gase sowohl durch die Klimarahmenkonvention (UNFCCC) als auch das Montrealer Protokoll adressiert.

Die Klimarahmenkonvention verpflichtet Annex I-Länder zur jährlichen Berichterstattung ihrer Treibhausgasemissionen an das Klimasekretariat. Dabei sind eine Reihe methodischer Vorgaben einzuhalten, um die Emissionsabschätzungen möglichst genau, konsistent, vergleichbar und transparent durchzuführen. Zu den berichtspflichtigen fluorierten Treibhausgasen (F-Gasen) zählen die vollfluorierten Kohlenwasserstoffe (FKW), die teilfluorierten Kohlenwasserstoffe (HFKW), Schwefelhexafluorid (SF₆) und Stickstofftrifluorid (NF₃), die alle hohe Treibhauspotenziale (global warming potentials; GWP) aufweisen.

Die Vertragsstaaten der Klimarahmenkonvention schlossen 1997 das Kyoto-Protokoll, mit dem für Industrieländer erstmals rechtsverbindliche Ziele für die Verringerung der Treibhausgasemissionen eingeführt wurden. Das Kyoto-Protokoll ist 2020 ausgelaufen. Mit dem Abkommen von Paris, das 2015 geschlossen wurde, haben die Länder ihr Engagement für den Klimaschutz erneuert und sich auf neue Ziele geeinigt, um die Bemühungen zur Begrenzung der Erderwärmung zu beschleunigen. Der im Pariser Abkommen enthaltene Aktionsplan zur Begrenzung der Erderwärmung sieht unter anderem vor, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen und einen Anstieg von weniger als 1,5 °C anzustreben. Die Länder haben hierfür nationale Klimaaktionspläne zur Verringerung ihrer Emissionen erarbeitet (die sog. „national festgelegten Beiträge“; nationally determined contributions“, NDCs). Alle 5 Jahre werden neue nationale Aktionspläne mit jeweils ehrgeizigeren Zielen vorgelegt. Im Sinne der Transparenz erfolgt die Berichterstattung über die Fortschritte bei der Erreichung der Klimaziele durch alle Länder. F-Gase werden aufgrund ihrer hohen Treibhauswirksamkeit bereits von vielen Ländern durch verschiedene Maßnahmen zur Emissionsminderung adressiert. Beispiele hierfür sind Spanien und Dänemark, die unter anderem eine F-Gas-Steuer eingeführt haben, sowie Kalifornien, wo, ebenso neben anderen Maßnahmen, bis 2030 eine 40-prozentige Reduktion der HFKW-Emissionen des Niveaus von 2013 erreicht werden soll.

Das Montrealer Protokoll (zum Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht) ist ein globales Abkommen, das bereits 1987 geschlossen wurde und 1989 in Kraft trat. Es trägt zum Schutz der Ozonschicht bei, indem es Verbrauch und Produktion von ozonabbauenden Stoffen weltweit regelt. Zu den ozonschichtzerstörenden Stoffen zählen Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe (HFKW), Halone und andere halogenierte Stoffe, die auch sehr wirksame Treibhausgase sind. Mit dem Beschluss von Kigali im Oktober 2016 zur weltweiten Minderung des Verbrauchs klimaschädlicher teilfluorierter Kohlenwasserstoffe (HFKW) wurde das Montrealer Protokoll auf eine neue Stoffgruppe ausgeweitet. Der Beschluss von Kigali sieht den schrittweisen Verzicht auf HFKW vor, was zeitversetzt auch zu einer Verringerung der HFKW-Emissionen führen wird. Damit trägt das Montrealer Protokoll zu den Zielsetzungen des Pariser Klimaschutzabkommens bei.

Im Jahr 2024 wurden eine Reihe von konkreten Schritten zur Umsetzung des Kigali-Beschlusses in Ländern außerhalb Europas eingeleitet, die jedoch auf die Marktsituation in Europa und Deutschland Einfluss nehmen werden. Hierzu zählen folgende Punkte:

- ▶ Der HFKW-Phase-down in Industrieländern außerhalb Europas (z.B. USA, Kanada) erreicht 2024 die nächste Reduktionsstufe auf 60 % des Ausgangswertes.
- ▶ Der HFKW-Phase-down im so genannten Globalen Süden (Artikel 5-Länder gemäß Montrealer Protokoll) startet 2024 mit der ersten Reduktionsstufe, bei der die verfügbaren HFKW-Mengen (in CO₂-Äquivalenten) auf die Menge der Basisjahre gedeckelt werden (100%). Dies trifft auch auf unmittelbare Nachbarländer der EU zu, nämlich Albanien, Bosnien-Herzegowina, Serbien, Montenegro, Nordmazedonien, Belarus und die Ukraine.

Daneben spielt bei der Entsorgung von F-Gasen und Geräten, die F-Gase enthalten, das Basler Übereinkommen über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung eine Rolle, dem Deutschland 1995 beigetreten ist. Mit der Konvention wurden erstmals weltweit geltende Regelungen über Zulässigkeit und Kontrolle von Exporten gefährlicher Abfälle getroffen. Grenzüberschreitende Abfallverbringungen benötigen die Zustimmung des Ausfuhrlandes, sämtlicher Durchfuhrländer sowie des Einfuhrlandes. Insbesondere sollen hierdurch Staaten geschützt werden, die nicht über die notwendigen technischen Voraussetzungen für den Umgang mit gefährlichen Abfällen verfügen.

3.2 Gesetzliche Grundlagen auf EU-Ebene

3.2.1 F-Gas-Verordnung, ODS-Verordnung und MAC-Richtlinie

Auf europäischer Ebene sind das Inverkehrbringen und die Verwendung fluorierter Treibhausgase in der Verordnung (EU) 2024/573 (F-Gas-Verordnung) geregelt. Mittlerweile von geringerer praktischer Bedeutung in den Sektoren, auf die sich dieses Vorhaben konzentriert, ist die EU-Verordnung über Ozonschicht schädigende Stoffe (EU) 2024/590 (ODS-Verordnung), die auch unlängst überarbeitet wurde und hier der Vollständigkeit halber mitbetrachtet wird. Daneben ist die Fahrzeugklimaanlagen-Richtlinie für die mobile Klimatisierung in Pkw (MAC-Richtlinie) von Bedeutung.

3.2.1.1 EU F-Gas-Verordnung (EU) 2024/573

Die neueste Version der EU F-Gas-Verordnung gilt seit dem 11.03.2024 und ersetzt die frühere Verordnung (EG) 517/2014. Als Kernmaßnahme der Verordnung gilt die schrittweise Verringerung der Gesamtmenge an HFKW in der EU seit 2015, was in den letzten Jahren unter anderem zur Verknappung und Preissteigerungen von HFKW-Kältemitteln geführt hat. Bereits auf dem Markt befindliche HFKW-Mengen, die aus Anlagen rückgewonnen werden, unterliegen keinen Mengenbeschränkungen.

Nachfolgend sind die Regelungen der neuen EU F-Gas-Verordnung aufgelistet, die im Zusammenhang mit Rücknahme, Entsorgung und Aufbereitung als relevant erachtet werden:

3.2.1.1.1 Anwendungsbereich (Artikel 2)

Diejenigen F-Gase, die dem Geltungsbereich der Verordnung unterliegen, sind in den Anhängen I, II und III aufgeführt. Besonders relevant ist hierbei Anhang I, der HFKW, FKW sowie SF₆ und Heptafluoroisobutyronitril (Iso-C₃F₇CN) umfasst. Im Hinblick auf Rückgewinnung beziehen sich relevante Maßnahmen des Artikel 8 (siehe unten) auch auf Anhang II Gruppe 1, welche ungesättigte teil(chlor)fluorierte Kohlenwasserstoffe (uHF(C)KW) beinhaltet.

3.2.1.1.2 Begriffsbestimmungen (Artikel 3, Punkte 11 bis 15)

- ▶ „Rückgewinnung“ bezeichnet die Entnahme und Lagerung fluorierter Treibhausgase aus Behältern, Erzeugnissen und Einrichtungen bei der Instandhaltung oder Wartung oder vor der Entsorgung der Behälter, Erzeugnisse oder Einrichtungen;
- ▶ „Recycling“ bezeichnet die Wiederverwendung eines rückgewonnenen fluorierten Treibhausgases im Anschluss an ein grundlegendes Reinigungsverfahren, einschließlich Filterung und Trocknung;
- ▶ „Aufarbeitung“ bezeichnet die Behandlung eines rückgewonnenen fluorierten Treibhausgases, durch die es unter Berücksichtigung seiner Verwendungen Eigenschaften erreicht, die denen eines ungebrauchten Stoffes gleichwertig sind, in zugelassenen Aufbereitungseinrichtungen, die über für die Aufarbeitung dieser Gase geeignete Anlagen und Abläufe verfügen und die die erforderliche Qualität bewerten und bescheinigen können;
- ▶ „Zerstörung“ bezeichnet das Verfahren der dauerhaften und möglichst vollständigen Umwandlung oder der dauerhaften und möglichst vollständigen Zerlegung eines fluorierten Treibhausgases in einen oder mehrere stabile Stoffe, die keine fluorierten Treibhausgase sind;
- ▶ „Außerbetriebnahme“ bezeichnet die dauerhafte Einstellung des Betriebes oder der Nutzung eines Erzeugnisses oder einer Einrichtung, das bzw. die fluorierte Treibhausgase enthält, einschließlich der endgültigen Stilllegung einer Anlage.

Die Definitionen von „Recycling“ und „Aufbereitung“ wurden gegenüber der früheren EU F-Gas-Verordnung konkretisiert.

3.2.1.1.3 Aufzeichnungspflichten (Artikel 7 Absatz 1)

- ▶ „Die Betreiber von Einrichtungen, für die gemäß Artikel 5 Absatz 1 eine Dichtheitskontrolle vorgeschrieben ist, müssen für jede einzelne dieser Einrichtungen Aufzeichnungen führen, die unter anderem Angaben zur Menge der rückgewonnenen Gase enthalten sowie zu Maßnahmen zur Rückgewinnung und Entsorgung der Gase, falls die Einrichtung außer Betrieb genommen wurde.
- ▶ Diese Aufzeichnungen sind der zuständigen Behörde des betreffenden Mitgliedstaats oder der Kommission auf Verlangen zur Verfügung zu stellen.“

3.2.1.1.4 Rückgewinnung und Zerstörung (Artikel 8)

Betreiber von Einrichtungen, die fluorierte Treibhausgase enthalten, die nicht Bestandteil von Schäumen sind, müssen sicherstellen, dass diese Stoffe rückgewonnen und nach der Außerbetriebnahme der Einrichtungen recycelt, aufgearbeitet oder zerstört werden. Es ist dabei zu beachten, dass die Rückgewinnung der F-Gase durch natürliche Personen erfolgt, die zertifiziert sind (Artikel 10).

Betreiber folgender Anlagen und Einrichtungen sind zu Rückgewinnung und passender Folgemaßnahmen verpflichtet:

- ▶ Stationäre Anlagen (Absatz 2):
 - a) Kältekreisläufe von Kälteanlagen, Klimaanlage und Wärmepumpen;
 - b) Einrichtungen, die Lösungsmittel auf der Basis fluorierter Treibhausgase enthalten;

c) Brandschutzeinrichtungen;

d) elektrische Schaltanlagen.

► Mobile Einrichtungen (Absatz 3):

a) Kältekreisläufe von Kälteanlagen von Kühlkraftfahrzeugen und Kühlanhängern;

b) Kältekreisläufe von Kälteanlagen von leichten Kühlfahrzeugen und intermodalen Containern, einschließlich Kühlwagen, und Eisenbahnwaggons (ab 12.03.2027);

c) Kältekreisläufe von Klimaanlage und Wärmepumpen in schweren Nutzfahrzeugen, Lieferwagen, nicht für den Straßenverkehr bestimmten mobilen Maschinen und Geräten in der Landwirtschaft, im Bergbau und im Bauwesen, in Zügen, U-Bahnen, Straßenbahnen und Luftfahrzeugen (ab 12.03.2027).

Absatz 6 stellt klar, dass rückgewonnene F-Gase, die in Anhang I und Anhang II Gruppe 1 gelistet sind, nicht zum Befüllen oder Wiederbefüllen eingesetzt werden dürfen, sofern sie nicht recycelt oder aufgearbeitet wurden. Damit ist die direkte Weiterverwendung von rückgewonnenen F-Gasen, ohne Recycling oder Wiederaufbereitung, nicht erlaubt.

Gemäß Absatz 7 muss ein Unternehmen, das einen Behälter mit F-Gasen verwendet, die Rückgewinnung jeglicher Gasreste unmittelbar vor Entsorgung des Behälters durchführen (lassen), um sicherzustellen, dass sie recycelt, aufgearbeitet oder zerstört werden.

Darüber hinaus ist festgelegt, dass F-Gase auch aus allen anderen Produkten und Einrichtungen rückgewonnen werden müssen, „außer wenn dies nachweislich technisch nicht möglich ist oder mit unverhältnismäßigen Kosten verbunden wäre. Die Betreiber sorgen dafür, dass die Rückgewinnung von angemessen qualifizierten natürlichen Personen durchgeführt wird, damit die Gase recycelt, aufgearbeitet oder zerstört werden können, oder dass sie ohne vorherige Rückgewinnung zerstört werden“ (Absatz 10).

Hinsichtlich der Zerstörung von F-Gasen (Absatz 11) ist geregelt, dass für HFKW nur Zerstörungstechnologien angewendet werden dürfen, die von den Vertragsparteien des Protokolls zugelassen wurden. Andere F-Gase, für die die Zerstörungstechnologie nicht zugelassen wurde, werden nur mithilfe von solchen Zerstörungstechnologien zerstört, die mit dem Unionsrecht und dem Recht der Mitgliedstaaten über Abfälle im Einklang stehen, und nur dann, wenn die zusätzlichen Anforderungen dieses Rechts erfüllt sind.

Die Ausweitung der Pflichten zu Rückgewinnung, Recycling, Aufbereitung und Entsorgung für mobile Einrichtungen, wie angeführt, stellt eine deutliche Erweiterung der Regulierung im Vergleich zur früheren EU F-Gas-Verordnung dar.

3.2.1.1.5 Erweiterte Herstellerverantwortung (Artikel 9)

Die EU-Mitgliedstaaten müssen bis Ende des Jahres 2027 sicherstellen, dass die Finanzierungsverpflichtungen für Elektro- und Elektronik-Altgeräte gemäß WEEE-Richtlinie (siehe Abschnitt 3.2.3) die Finanzierung von Rückgewinnung, Recycling, Aufarbeitung und Zerstörung von F-Gasen bei solchen Geräten umfassen, die seit 11.03.2024 in Verkehr gebracht wurden und in den Geltungsbereich der EU F-Gas-Verordnung fallen.

3.2.1.1.6 Zertifizierung und Ausbildung (Artikel 10)

Natürliche Personen müssen für Aktivitäten im Zusammenhang mit F-Gasen und relevanten Alternativen, einschließlich natürlichen Kältemitteln, ausgebildet sein. Hierzu zählt auch die

Rückgewinnung von F-Gasen aus stationären und mobilen Einrichtungen gemäß Artikel 8 Absätze 2 und 3 (siehe oben).

3.2.1.1.7 Kennzeichnungspflichten (Artikel 12)

Besondere Kennzeichnungspflichten bestehen für Behälter, die F-Gase aus den Anhängen I und II enthalten, welche aufgearbeitet oder recycelt wurden (Absatz 7). Im Falle von aufgearbeiteten F-Gasen sind außerdem die Fertigungsnummer, der Name und die Anschrift der Aufarbeitungseinrichtung in der EU zu nennen.

Daneben bestehen Kennzeichnungspflichten für Behälter mit F-Gasen, die zur Zerstörung in den Verkehr gebracht, bereitgestellt oder geliefert werden. Es ist anzugeben, dass der Inhalt nur für die Zerstörung bestimmt ist.

3.2.1.1.8 Kontrolle der Verwendung (Artikel 13)

Für Kälteanlagen bestehen gemäß Absatz 3 Verwendungsverbote für F-Gase mit GWP ≥ 2500 zur Instandhaltung oder Wartung von Kälteanlagen mit einer Füllmenge von 40 t CO₂-Äquivalent oder mehr. Dieses Verbot wird ab Anfang des Jahres 2025 auf alle Kälteanlagen ausgeweitet. Jedoch gelten bis zum 01.01.2030 Ausnahmeregeln für aufgearbeitete F-Gase, die als solche gekennzeichnet sind, und für recycelte F-Gase, die aus bestehenden Kälteanlagen rückgewonnen wurden. Diese recycelten Gase dürfen nur von dem Unternehmen verwendet werden, das die Rückgewinnung im Rahmen der Instandhaltung oder Wartung durchgeführt hat, oder von dem Unternehmen, für das die Rückgewinnung als Teil der Instandhaltung oder Wartung durchgeführt wurde.

Darüber hinaus besteht ab 01.01.2032 ein analoges Verwendungsverbot für F-Gase mit GWP ≥ 750 für ortsfeste Kälteanlagen mit Ausnahme von Chillern.

Für Klimaanlage und Wärmepumpen bestehen nach Absatz 4 ab Anfang des Jahres 2026 Verwendungsverbote für F-Gase aus dem Anhang I mit einem GWP ≥ 2500 zur Instandhaltung oder Wartung. Bis zum 01.01.2032 gelten aber auch für diese Anwendungen Ausnahmen, nämlich für aufgearbeitete F-Gase mit GWP ≥ 2500 , sofern deren Behälter entsprechend gekennzeichnet sind, und für recycelte F-Gase mit GWP ≥ 2500 , sofern sie aus bestehenden Klimaanlage und Wärmepumpen zurückgewonnen wurden. Nur die Unternehmen, die die Rückgewinnung im Rahmen der Instandhaltung oder Wartung durchgeführt haben, oder diejenigen Unternehmen, für die die Rückgewinnung als Teil der Instandhaltung oder Wartung durchgeführt wurde, dürfen die Recyclinggase verwenden.

Für elektrische Schaltanlagen gilt ein Verwendungsverbot für SF₆ ab 01.01.2035 für Instandhaltung und Wartung, sofern es nicht aufgearbeitet oder recycelt wurde. Nachzuweisende Ausnahmen bestehen, wenn Alternativen aus technischen Gründen nicht verwendet werden können oder aufbereitetes oder recyceltes SF₆ im Falle einer Notfallreparatur nicht verfügbar ist. Der Nutzer muss den zuständigen Behörden entsprechende Nachweise der Verwendungsgründe vorlegen.

Die Verwendungsverbote gemäß Artikel 13 stellen Ausweitungen der Verwendungsverbote für Hoch-GWP-Kältemittel dar, die bereits in der früheren EU F-Gas-Verordnung eingeführt worden waren. Damit konkretisieren sie den fortschreitenden HFKW-Phase-down und regeln die Verwendung von rückgewonnenen F-Gasen in Bestandsanlagen während der nächsten Jahre.

3.2.1.1.9 F-Gas-Portal (Artikel 20) und Berichtspflichten (Artikel 26)

Die EU-Kommission stellt ein elektronisches Verwaltungsinstrument für die Vergabe von Quoten, Lizenzanforderungen für Importe und Exporte sowie Berichtspflichten in Bezug auf F-

Gase zur Verfügung. Unternehmen, die berichtspflichtige Tätigkeiten gemäß Artikel 26 (siehe unten) ausführen, müssen über eine gültige Registrierung verfügen, bevor sie diese Tätigkeiten leisten. Die Einzelheiten zur Registrierung im F-Gas-Portal sind in der Durchführungsverordnung (EU) 2024/2473 festgelegt.

Zu den berichtspflichtigen Tätigkeiten zählen ab 2025 und dann jährlich gemäß Artikel 26 neben Produktion, Einfuhr und Ausfuhr auch die Zerstörung von F-Gasen (Absatz 2) sowie die Aufarbeitung von F-Gasen (Absatz 6), sofern mehr als eine metrische Tonne bzw. 100 Tonnen CO₂-Äquivalent an anderen F-Gasen behandelt wurden. Darüber hinaus sind Verwender von F-Gasen, die von der Quote ausgenommen wurden, über diese Mengen berichtspflichtig.

Anhang IX konkretisiert die Berichtspflichten weiter. Im Hinblick auf Rückgewinnung, Recycling, Aufarbeitung und Zerstörung sind folgende Punkte relevant:

Für **Hersteller** laut Anhang IX gemäß Artikel 26 Absatz 1 Unterabsatz 1 umfassen die zu meldenden Angaben unter anderem „die Gesamtmenge jedes in den Anhängen I, II und III aufgeführten Stoffes, die er in der Union hergestellt hat, einschließlich der als Nebenprodukte erzeugten Mengen, wobei zwischen abgeschiedenen und nicht abgeschiedenen Mengen zu unterscheiden ist und anzugeben ist, welche Mengen der Produktion oder der als Nebenprodukte erzeugten Mengen, die nicht abgeschieden wurden, zerstört wurden, oder, wenn sie abgeschieden wurden, welche Menge vor dem Inverkehrbringen entweder in den Anlagen des Herstellers zerstört wurden oder an andere Unternehmen zur Zerstörung übergeben wurden, sowie welches Unternehmen die Zerstörung durchgeführt hat;“

Für **Einführer** laut Anhang IX gemäß Artikel 26 Absatz 1 Unterabsatz 1 beinhalten die zu meldenden Angaben unter anderem „die Gesamtmenge jedes in den Anhängen I, II und III aufgeführten Stoffes, die er in die Union eingeführt hat, unter Angabe der Hauptkategorien der Anwendungen, für die die Stoffe verwendet werden“, wobei unter anderem getrennt anzugeben sind

- ▶ „für die Zerstörung bestimmte Mengen mit Angabe des Unternehmens, das die Zerstörung durchführt;
- ▶ „die Mengen rückgewonnener, recycelter oder aufgearbeiteter teilfluorierter Kohlenwasserstoffe.“

Alle Unternehmen, die F-Gase zerstören (Anhang IX gemäß Artikel 26 Absatz 2), müssen folgende Angaben melden:

- ▶ „die Mengen jedes in den Anhängen I, II und III aufgeführten Stoffes, die zerstört wurden, einschließlich – in gesonderter Form – der in Erzeugnissen oder Einrichtungen enthaltenen Mengen dieser Stoffe;
- ▶ alle zu Beginn und am Ende des Berichterstattungszeitraums vorgehaltenen Bestände jedes in den Anhängen I, II und III aufgeführten Stoffes, die dazu bestimmt sind, zerstört zu werden, einschließlich – in gesonderter Form – der in Erzeugnissen oder Einrichtungen enthaltenen Mengen dieser Stoffe;
- ▶ die zur Zerstörung der in den Anhängen I, II und III aufgeführten Stoffe verwendete Technologie.“

Jedes Unternehmen, das von der Quotierung ausgenommene F-Gase verwendet (Anhang IX gemäß Artikel 26 Absatz 5, Artikel 16 Absatz 2), melde die Mengen jedes Stoffes, die es von Herstellern und Einführern erhalten hat, und zwar

- ▶ zur Zerstörung,
- ▶ für Verwendungen als Ausgangsstoff,
- ▶ für Direktausfuhren,
- ▶ zur Herstellung von Dosier-Aerosolen für die Verabreichung pharmazeutischer Inhaltsstoffe,
- ▶ zur Verwendung in Militärausrüstung und
- ▶ zur Verwendung zum Ätzen von Halbleitermaterial oder zur Reinigung von Kammern für die chemische Beschichtung aus der Gasphase in der Halbleiterindustrie.

Hersteller von Dosier-Aerosolen für die Verabreichung pharmazeutischer Inhaltsstoffe melden die Art der teilfluorierten Kohlenwasserstoffe und die verwendeten Mengen.

Alle Unternehmen, die F-Gase aufarbeiten (Artikel 26 Absatz 6), müssen folgende Angaben berichten:

- ▶ die Mengen jedes in den Anhängen I, II und III aufgeführten Stoffes, die sie aufgearbeitet haben;
- ▶ alle zu Beginn und am Ende des Berichterstattungszeitraums vorgehaltenen Bestände jedes in den Anhängen I, II und III aufgeführten Stoffes, die dazu bestimmt sind, aufgearbeitet zu werden.

In der Durchführungsverordnung (EU) 2024/2195 zum Format der Berichterstattung gemäß Artikel 26 vom 4. September 2024 sind die neuen Vorgaben zur F-Gas-Berichterstattung für Unternehmen festgelegt (Europäische Kommission 2024). Diese sind ab 1. Januar 2025 anzuwenden.

Die Berichtspflichten der neuen EU F-Gas-Verordnung wurden deutlich ausgebaut, gerade im Hinblick auf Rückgewinnung, Recycling, Aufarbeitung und Zerstörung von F-Gasen. Nach den Vorgaben der früheren Verordnung (EU) Nr. 517/2014 waren nur die als Hersteller, Einführer oder Ausführer berichtspflichtigen Unternehmen auch dazu verpflichtet, Recycling und Aufarbeitung zu melden. In der Evaluierung der früheren Verordnung wurde erkannt, dass dies zu lückenhaften Daten geführt hatte (Birchby et al. 2022). Der Berichtskreis wurde in der neuen Verordnung daher dahingehend ausgeweitet, dass alle Unternehmen, die Recycling und Aufarbeitung von F-Gasen betreiben, nun berichtspflichtig sind.

3.2.1.2 EU ODS-Verordnung

Die Verordnung (EU) 2024/590 über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen (ODS-Verordnung), implementiert das Montrealer Protokoll in der EU. Es gab bereits mehrere Versionen dieser Verordnung, die letzte Überarbeitung fand in den Jahren 2022 bis 2024 statt und endete mit der Annahme der neuesten Version (EU) 2024/590.

3.2.1.2.1 Anwendungsbereich (Artikel 2)

Der Anwendungsbereich umfasst ozonabbauende Stoffe und ihre Isomere, entweder allein oder in Gemischen, sowie Erzeugnisse und Einrichtungen, einschließlich ihrer Bestandteile, die ozonabbauende Stoffe enthalten oder zu ihrem Funktionieren benötigen.

3.2.1.2.2 Begriffsbestimmungen (Artikel 3, Absätze 1, 2, 8, 9, 10, 15 und 16)

Die Begriffsbestimmungen für „Rückgewinnung“, „Recycling“, „Aufarbeitung“, „Zerstörung“ und „Außerbetriebnahme“ gleichen den Definitionen in der EU F-Gas-Verordnung, beziehen sich

jedoch auf ozonabbauende Stoffe bzw. Erzeugnisse oder Einrichtungen, das bzw. die ozonabbauende Stoffe enthalten.

3.2.1.2.3 Verbote (Artikel 4 und 5)

Die Produktion, das Inverkehrbringen, die anschließende entgeltliche oder unentgeltliche Lieferung oder Überlassung an Dritte innerhalb der Union sowie die Verwendung der in Anhang I aufgeführten ozonabbauenden Stoffe sind verboten. Ebenso sind die Einfuhr und die Ausfuhr dieser Stoffe untersagt.

Zusätzlich sind das Inverkehrbringen sowie die anschließende entgeltliche oder unentgeltliche Lieferung oder Überlassung von Erzeugnissen oder Einrichtungen, die die in Anhang I aufgeführten ozonabbauenden Stoffe enthalten oder zu ihrem Funktionieren benötigen, an Dritte innerhalb der Union verboten. Auch die Einfuhr und Ausfuhr solcher Erzeugnisse und Einrichtungen sind verboten, mit Ausnahme persönlicher Gebrauchsgegenstände.

3.2.1.2.4 Zerstörung und Aufarbeitung (Artikel 12)

Abweichend von den Verboten für Produktion und Inverkehrbringen von ozonschichtzerstörenden Stoffen (Artikel 4 Absatz 1, Artikel 5 Absatz 1) dürfen ozonabbauende Stoffe sowie Erzeugnisse und Einrichtungen, die solche Stoffe enthalten oder für ihren Betrieb benötigen, zum Zweck ihrer Zerstörung in der Union in Verkehr gebracht und anschließend entgeltlich oder unentgeltlich an Dritte geliefert oder ihnen überlassen werden. Zudem dürfen die in Anhang I aufgeführten Stoffe auch zum Zweck der Aufarbeitung innerhalb der Union in Verkehr gebracht werden.

3.2.1.2.5 Rückgewinnung und Zerstörung bereits verwendeter ozonabbauender Stoffe (Artikel 20, Absätze 1, 6, 7 und 8)

Ozonabbauende Stoffe, die in Kälte- und Klimaanlageanlagen sowie Wärmepumpen, Lösungsmittel enthaltenden Einrichtungen oder Brandschutzeinrichtungen und Feuerlöschern enthalten sind, werden bei der Instandhaltung oder Wartung oder vor Abbau oder Entsorgung der Einrichtungen zwecks Zerstörung, Recycling oder Aufarbeitung zurückgewonnen, außer wenn eine solche Rückgewinnung in anderen Rechtsakten der Union geregelt ist.

Die in Anhang I aufgeführten ozonabbauenden Stoffe sowie diese Stoffe enthaltenden Erzeugnisse und Einrichtungen dürfen nur mithilfe von Zerstörungstechnologien behandelt werden, die von den Vertragsparteien des Montrealer Protokolls zugelassen wurden. Andere ozonabbauende Stoffe, für die die Zerstörungstechnologie nicht zugelassen wurde, werden nur mit Technologien zerstört, die im Einklang mit dem Unionsrecht und den nationalen Abfallgesetzen stehen und die zusätzlichen Anforderungen dieser Gesetze erfüllen.

Der Kommission wird die Befugnis übertragen, gemäß Artikel 29 delegierte Rechtsakte zu erlassen, um diese Verordnung durch die Erstellung einer Liste der Erzeugnisse und Einrichtungen zu ergänzen, bei denen die Rückgewinnung von ozonabbauenden Stoffen oder die Zerstörung von Erzeugnissen und Einrichtungen ohne vorherige Rückgewinnung als technisch und wirtschaftlich machbar gilt, wobei die zu verwendende Technologie angegeben wird, wenn dies angemessen ist.

Mitgliedstaaten müssen die Rückgewinnung, das Recycling, die Aufarbeitung und die Zerstörung der in Anhang I aufgeführten ozonabbauenden Stoffe fördern und legen Mindestanforderungen an die Qualifikationen des betreffenden Personals fest.

3.2.1.2.6 Berichterstattung der Unternehmen (Artikel 24 und Anhang 6)

Jedes Unternehmen muss bis zum 31. März 2025 und anschließend jährlich über ein elektronisches Berichtsinstrument der Kommission die Daten gemäß Anhang VI für jeden ozonabbauenden Stoff des vorangegangenen Kalenderjahres melden. Die Mitgliedstaaten haben ebenfalls Zugriff auf dieses Berichtsinstrument für Unternehmen, die in ihre Zuständigkeit fallen. Vor der Berichterstattung müssen sich die Unternehmen im Lizenzvergabesystem registrieren. Die zuständigen Behörden der Mitgliedstaaten und die Kommission ergreifen angemessene Maßnahmen, um die Vertraulichkeit der gemäß diesem Artikel übermittelten Daten zu gewährleisten. Die Kommission legt gegebenenfalls im Rahmen von Durchführungsrechtsakten die Form und die Mittel für die Berichterstattung gemäß Anhang VI fest. Diese Durchführungsrechtsakte werden im Prüfverfahren gemäß Artikel 28 Absatz 2 erlassen. Die Kommission ist befugt, gemäß Artikel 29 delegierte Rechtsakte zur Änderung von Anhang VI zu erlassen, falls dies aufgrund von Entscheidungen der Vertragsparteien des Protokolls erforderlich ist.

Für die Zwecke der Berichterstattung gemäß Artikel 24 bedeutet Produktion „die Menge der beabsichtigt oder unbeabsichtigt hergestellten ozonabbauenden Stoffe, einschließlich der als Nebenerzeugnis hergestellten Menge, es sei denn, dieses Nebenerzeugnis wird als Teil des Produktionsverfahrens oder nach einem dokumentierten Verfahren im Einklang mit dieser Verordnung und dem Unionsweiten und nationalen Abfallrecht zerstört, jedoch ausschließlich der rezyklierten oder aufgearbeiteten Mengen.“

Für **Hersteller** umfassen die zu meldenden Angaben gemäß Anhang 6 für jeden ozonabbauenden Stoff:

- ▶ die Gesamtproduktion,
- ▶ jede Produktionsmenge, die vom Hersteller in der Union in den Verkehr gebracht oder für den eigenen Bedarf verwendet wurde, mit separater Angabe je nach Verwendung als Ausgangsstoff, Verarbeitungshilfsstoff oder für andere Zwecke,
- ▶ jede Produktion, die für wesentliche Labor- und Analysezwecke in der Union oder einer anderen Vertragspartei des Protokolls bestimmt war,
- ▶ jede Menge an recycelten, aufgearbeiteten oder zerstörten Stoffen sowie die angewandte Zerstörungstechnik, einschließlich der Menge an Nebenerzeugnissen, die gemäß Nummer 1 produziert und zerstört wurden,
- ▶ alle Lagerbestände zu Beginn und am Ende des Berichterstattungszeitraums,
- ▶ alle Bezüge von anderen Unternehmen in der Union sowie alle Verkäufe an diese,
- ▶ sämtliche Emissionen, einschließlich solcher im Zusammenhang mit der Produktion, der Herstellung von Nebenerzeugnissen, der Lagerung und des Transports, einschließlich der Umfüllung von einem Behälter in einen anderen.

Für **Einführer** umfassen die zu meldenden Angaben für jeden ozonabbauenden Stoff gemäß Anhang 6:

- ▶ alle Mengen, die in den zollrechtlich freien Verkehr übergeführt wurden, mit separater Angabe der Einfuhren zur Verwendung als Ausgangsstoffe, Verarbeitungshilfsstoffe, zu wesentlichen Labor- und Analysezwecken und zur Zerstörung,

- ▶ bei zur Zerstörung eingeführten Stoffen: der tatsächliche endgültige Bestimmungsort bzw. Bestimmungsorte jedes Stoffs, für jeden Bestimmungsort die Menge jedes Stoffs sowie Name und Adresse der Zerstörungsanlage, an die der Stoff geliefert wurde,
- ▶ alle Mengen, die im Rahmen anderer Zollverfahren eingeführt wurden, wobei die Zollverfahren und die festgelegten Verwendungszwecke zusätzlich anzugeben sind,
- ▶ jede Menge bereits verwendeter Stoffe, die zu Recycling- oder Aufarbeitungszwecken eingeführt wurde,
- ▶ alle Arten von Lagerbeständen, die zu Beginn und am Ende des Berichterstattungszeitraums vorhanden waren,
- ▶ alle Bezüge von anderen Unternehmen in der Union sowie alle Verkäufe an sie,
- ▶ das Herkunftsland.

Alle **Ausführer** müssen für jeden ozonabbauenden Stoff gemäß Anhang 6 folgendes melden:

- ▶ alle Mengen ausgeführter Stoffe unter gesonderter Angabe der Ausfuhren nach Bestimmungsländern und Verwendungszweck der ausgeführten Mengen (als Ausgangsstoffe oder Verarbeitungshilfsstoffe, für wesentliche Labor- und Analysezwecke und für kritische Verwendungszwecke),
- ▶ alle Arten von Lagerbeständen, die zu Beginn und am Ende des Berichterstattungszeitraums vorhanden waren,
- ▶ alle Bezüge von anderen Unternehmen in der Union sowie alle Verkäufe an sie,
- ▶ das Bestimmungsland.

Unternehmen, die ozonabbauende Stoffe zerstören und nicht Nummer 2 Buchstabe e des Anhangs 26 unterliegen, müssen für alle Stoffe gesondert folgende Angaben berichten:

- ▶ alle Mengen zerstörter Stoffe, mit separater Angabe aller in Erzeugnissen und Einrichtungen enthaltenen Mengen sowie aller als Nebenerzeugnisse hergestellten und zerstörten Mengen (sofern vorhanden auf Grundlage von Informationen, die von Herstellern oder Einführern zur Verfügung gestellt wurden),
- ▶ alle zu zerstörenden Bestände, die zu Beginn und am Ende des Berichterstattungszeitraums gehalten wurden, einschließlich der Mengen in Erzeugnissen und Einrichtungen,
- ▶ die Zerstörungstechnik,
- ▶ alle Emissionen, auch die im Zusammenhang mit der Zerstörung, Beförderung und Lagerung (einschließlich Umfüllung von einem Behälter in einen anderen).

Alle **Unternehmen, die ozonabbauende Stoffe als Ausgangsstoffe oder Verarbeitungshilfsstoffe verwenden**, müssen folgendes gesondert mitteilen:

- ▶ alle als Ausgangsstoffe oder Verarbeitungshilfsstoffe verwendeten Mengen,
- ▶ alle Lagerbestände, die zu Beginn und am Ende des Berichterstattungszeitraums vorhanden waren,

- die Verwendungsarten als Ausgangsstoff sowie die Prozesse und alle Emissionen, einschließlich derjenigen, die mit der Beförderung und Lagerung verbunden sind, sowie das Umfüllen von einem Behälter in einen anderen.

Unternehmen, die in Anhang I aufgeführte und nicht der Nummer 2 Buchstabe e des Anhangs 26 unterliegende ozonabbauende Stoffe zerstören oder ozonabbauende Stoffe als Ausgangs- oder Verarbeitungshilfsstoffe verwenden, müssen außerdem Daten zu allen Bezügen von und Verkäufen an andere Unternehmen innerhalb der Union übermitteln.

3.2.1.3 Fahrzeugklimaanlagen-Richtlinie (MAC-Richtlinie)

In Fahrzeugklimaanlagen wurde bis vor wenigen Jahren weltweit HFKW-134a als Kältemittel eingesetzt. Die Richtlinie 2006/40/EG über Emissionen aus Klimaanlagen in Kraftfahrzeugen (MAC-Richtlinie) verbietet seit dem 1. Januar 2017 den Einsatz von Kältemittel mit einem Treibhauspotenzial über 150 in neuen Pkw und Pkw-ähnlichen Nutzfahrzeugen in der Europäischen Union. Als alternatives Kältemittel hat sich zunächst uHFKW-1234yf etabliert, in Elektrofahrzeugen und Nischensegmenten einiger Hersteller wird auch R-744 (CO₂) verwendet.

3.2.2 Altfahrzeugrichtlinie

Eine weitere relevante Richtlinie für dieses Vorhaben stellt die europäische Richtlinie 2000/53/EG über Altfahrzeuge (EU-Altfahrzeugrichtlinie) dar. Die nachfolgende Tabelle 1 soll einen Überblick über relevante Artikel und Anforderungen der Richtlinie darstellen.

Tabelle 1: Übersicht der Vorgaben der EU-Altfahrzeugrichtlinie

Bezeichnung	Inhalt
Artikel 1 – Ziele	„In dieser Richtlinie sind Maßnahmen festgelegt, die vorrangig auf die Vermeidung von Fahrzeugabfällen und darüber hinaus auf die Wiederverwendung, das Recycling und andere Formen der Verwertung von Altfahrzeugen und ihren Bauteilen zur Verringerung der Abfallbeseitigung sowie auf eine Verbesserung der Umweltschutzleistung aller in den Lebenskreislauf von Fahrzeugen einbezogenen Wirtschaftsbeteiligten und insbesondere der unmittelbar mit der Behandlung von Altfahrzeugen befassten Wirtschaftsbeteiligten abzielen.“
Artikel 2, Nr. 1, 2, 7 – Begriffsbestimmungen	„‘Fahrzeug’ Fahrzeuge der Klassen M1 oder N1 gemäß Anhang II Abschnitt A der Richtlinie 70/156/EWG sowie dreirädrige Kraftfahrzeuge gemäß der Richtlinie 92/61/EWG, jedoch unter Ausschluss von dreirädrigen Krafträdern“. „‘Altfahrzeug’ Fahrzeuge, die im Sinne von Artikel 1 Buchstabe a) der Richtlinie 75/442/EWG als Abfall gelten“. „‘Wiederverwendung’ Maßnahmen, bei denen Altfahrzeugbauteile zu dem gleichen Zweck verwendet werden, für den sie entworfen wurden“. „‘Recycling’ die in einem Produktionsprozess erfolgende Wiederaufarbeitung der Abfallmaterialien für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke, jedoch mit Ausnahme der energetischen Verwertung. Unter energetischer Verwertung ist die Verwendung von brennbarem Abfall zur Energieerzeugung durch direkte Verbrennung mit oder ohne Abfall anderer Art, aber mit Rückgewinnung der Wärme zu verstehen“.
Artikel 7, Abs. 1 – Wiederverwendung und Verwertung	„Die Mitgliedstaaten treffen die erforderlichen Maßnahmen, um darauf hinzuwirken, dass wiederverwendbare Bauteile wiederverwendet, nicht wiederverwendbare Bauteile verwertet und - sofern dies unter Umweltsichtspunkten vertretbar ist - vorzugsweise dem Recycling zugeführt werden, wobei die Anforderungen an die Sicherheit von Fahrzeugen

Bezeichnung	Inhalt
	sowie die Umweltaanforderungen, wie die Begrenzung von Emissionen in die Luft und Lärmemissionen, unberührt bleiben“.
Anhang I – Technische Mindestanforderungen für die Behandlung gemäß Artikel 6 Absätze 1 und 3	Die technischen Mindestanforderungen für Behandlungsstandorte betreffen unter anderem geeignete Lagertanks für die Flüssigkeiten aus Klimaanlage und sonstige Flüssigkeiten in Altfahrzeugen, außerdem müssen die Flüssigkeiten aus Klimaanlage entfernt sowie getrennt gesammelt und gelagert werden, es sei denn, sie sind für die Wiederverwendung der betreffenden Teile erforderlich.

3.2.3 WEEE-Richtlinie

Des Weiteren müssen für die Umsetzung dieses Vorhabens die Angaben aus der sogenannten WEEE-Richtlinie miteinbezogen werden. Die WEEE-Richtlinie 2012/19/EU legt Vorgaben für die Behandlung von Elektro- und Elektronikaltgeräten innerhalb der EU fest, wobei die Abkürzung „WEEE“ für „Waste of Electrical and Electronic Equipment“ steht. Wesentliche Elemente, welche durch die Richtlinie geregelt werden, sind u.a. Sammel- und Verwertungssysteme, die kostenfreie Abgabe von Altgeräten für private Haushalte sowie eine Erfassungs- und Kennzeichnungspflicht sämtlicher in den Verkehr gebrachter Elektrogeräte. Im Kern sollen durch die Richtlinie schädliche Auswirkungen von Elektro- und Elektronik-Altgeräten (EAG) vermieden oder verringert sowie zu einer besseren Wiederverwendung von Ressourcen beigetragen werden (Artikel 1). Mitgliedstaaten haben geeignete Maßnahmen zu erlassen, um insbesondere bei Wärmeüberträgern (Anhang III, Kategorie 1), welche ozonabbauende Stoffe und fluoriierte Treibhausgase enthalten, eine hohe Quote zu erreichen (Artikel 5). Speziell für Wärmeüberträger schreibt die Richtlinie daher gesonderte Mindestzielvorgaben vor (Anhang V, Teil III), wonach mindestens 85 % der in dieser Gerätekategorie aufgeführten EAG zu verwerten und zu 80 % zur Wiederverwendung vorzubereiten und zu rezyklieren sind.

Tabelle 2 zeigt die verschiedenen Kategorien der Richtlinie. Für den Bereich Kälte- und Klimaanlage sind Geräte der Kategorien 1 und 4 ausschlaggebend. Die Aufschlüsselung der zu Anhang III gehörenden Gerätetypen ist im Anhang IV aufgeführt. Die Kategorie umfasst „Kühlschränke, Gefriergeräte, Geräte zur automatischen Abgabe von Kaltprodukten, Klimageräte, Entfeuchter, Wärmepumpen, ölfüllte Radiatoren und andere Wärmeüberträger, bei denen andere Flüssigkeiten als Wasser für die Wärmeübertragung verwendet werden“ (Anhang IV, Nr. 1). Im Anhang VII wird die selektive Behandlung von Werkstoffen und Bauteilen von Elektro- und Elektronik-Altgeräten dargelegt. Unter die Stoffe und Gemische, welche aus getrennt gesammelten Geräten entfernt werden müssen, fallen FCKW, H-FCKW, HFKW und Kohlenwasserstoffe (Anhang VII, Nr. 1). Die Gase müssen gemäß der Verordnung (EG) Nr. 1005/2009 behandelt werden (Anhang VII, Nr. 2). Dabei darf die „umweltgerechte Vorbereitung zur Wiederverwendung und das umweltgerechte Recycling von Bauteilen oder ganzen Geräten nicht behindert werden“ (Anhang VII, Nr. 3).

Tabelle 2: Kategorien der WEEE-Richtlinie

Von der Richtlinie erfasste Kategorien von EAG		
Kategorie		Beispiele
1	Wärmeüberträger	Klimageräte, Entfeuchter
2	Bildschirme, Monitore und Geräte, die Bildschirme von einer Fläche von mehr als 100 cm ² enthalten	Monitore, Notebooks
3	Lampen	(Kompakt-) Leuchtstofflampen
4	Großgeräte	Waschmaschinen, Wäschetrockner
5	Kleingeräte	Staubsauger, Geräte zum Nähen
6	Kleine IT- und Telekommunikationsgeräte (keine der äußeren Abmessungen beträgt mehr als 50 cm)	Mobiltelefone, GPS-Geräte

Quelle: Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 04. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte

Dabei sind die in Tabelle 3 aufgeführten Mindestzielvorgaben zu erfüllen. Bei der Emissionsabschätzung sollte aber nicht pauschal auf die Umsetzung der Richtlinie vertraut werden, sondern zunächst eine umfassende Recherche stattfinden, inwiefern diese Zielvorgaben erreicht werden.

Tabelle 3: Mindestzielvorgaben der WEEE-Richtlinie je Kategorie ab 15.08.2018

Gerätekategorie	Anteil der Verwertung (%)	Anteil in % der zur Wiederverwendung vorzubereiten und zu recyceln ist
1 und 4	85	80
2	80	70
5 und 6	75	55
3	-	Nur Recycling: 80

Quelle: Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 04. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte

3.2.4 Abfallrahmenrichtlinie

Die europäische Abfallrahmenrichtlinie (Richtlinie 2008/98/EG) regelt den rechtlichen Rahmen für den Umgang mit Abfällen innerhalb der EU. Die Richtlinie definiert wesentliche Begriffe des Abfallrechts und ersetzt die bisher geltende, dreistufige Abfallhierarchie „Vermeiden, Verwerten, Beseitigen“ durch eine fünfstufige: "Vermeidung, Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling, sonstige Verwertung, Beseitigung". Weiterhin gilt nun zudem der Grundsatz der Produktverantwortlichkeit, bei der der Hersteller eines Produktes zur Rücknahme und Beseitigung dieses verpflichtet werden kann.

3.2.5 Abfallverzeichnis-Verordnung

Die Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung, 2001 AVV) ist die Umsetzung der Entscheidung der Kommission 2000/532/EG und dient der

Einstufung von Abfällen in Abfallarten und nach Gefährlichkeit. Dabei wird ein sechsstelliger Abfallschlüssel sowie eine Abfallbezeichnung vergeben. Gebrauchten fluorierten Kältemitteln, die zur Entsorgung vorgesehen sind, werden der Abfallschlüsselnummer 14 06 01* als gefährliche Abfälle zugeordnet.

3.2.6 Governance-Verordnung

Die EU-Verordnung 2018/1999 soll dazu beitragen, die Energie- und Klimaziele der EU für 2030 und darüber hinaus einzuhalten. Da die Klimaziele bereits durch den Emissionshandel sowie die Aufteilung auf Mitgliedstaatenebene vorgegeben sind, dient die Governance-Verordnung insbesondere der Einhaltung der Energieziele. Die Verordnung setzt einen Rahmen aus Kooperations-, Planungs- und Berichtspflichten für die Mitgliedstaaten, die von der EU-Kommission überwacht und bewertet werden müssen.

Die EU-Mitgliedstaaten müssen alle zehn Jahre Langfrist-Strategien erarbeiten, die mindestens 30 Jahre betreffen, wobei die ersten Strategien den Zeitraum von 2021 bis 2050 umfassen. In darauf abgestimmten nationalen Energie- und Klimapläne („national energy and climate plans“; NECP), die für zehn Jahre gelten, legen die Staaten ihre Ziele und Maßnahmen zur Dekarbonisierung, Energiesicherheit, Energieeffizienz, Energiebinnenmarkt und Erneuerbaren Energien dar. Die EU-Kommission prüft diese Pläne und kann Empfehlungen aussprechen.

3.3 Deutschland

3.3.1 Chemikalien-Klimaschutzverordnung (ChemKlimaschutzV)

Die deutsche Umsetzung der europäischen F-Gas-Verordnung erfolgt in der Chemikalien-Klimaschutzverordnung (ChemKlimaschutzV). Der darin enthaltene §4 Rückgewinnung und Rücknahme verwendeter Stoffe bildet eine der nationalen gesetzlichen Grundlagen für die Wiederaufbereitung und sachgerechte Entsorgung von F-Gasen. Absatz 1 bezieht sich auf die Betreiberpflicht gemäß EU F-Gas-Verordnung (Artikel 8), die Rückgewinnung von F-Gasen sowie nach Außerbetriebnahme von Anlagen deren Recycling, Aufarbeitung oder Zerstörung sicherzustellen. Absatz 2 legt fest, dass sowohl die Hersteller als auch Vertreiber von fluorierten Treibhausgasen dazu verpflichtet sind, „diese nach Gebrauch zurückzunehmen oder die Rücknahme durch einen von ihnen bestimmten Dritten sicherzustellen“. Dabei müssen die Zurücknehmenden sowie die Betreiber einer Entsorgungsanlage für fluorierte Treibhausgase über Art und Menge der zurückgenommen oder entsorgten Stoffe und Zubereitungen sowie den Verbleib Aufzeichnungen führen. Diese Aufzeichnungen sind gemäß der EU F-Gas-Verordnung fünf Jahre lang aufzubewahren und der zuständigen Behörde auf Anfrage vorzulegen (§4 Abs. 3 ChemKlimaschutzV 2008).

Der §5 Persönliche Voraussetzungen für bestimmte Tätigkeiten regelt darüber hinaus, welche Personen die Rückgewinnungsvorgänge vornehmen dürfen. So bedarf es unter anderem einer entsprechenden Sachkundebescheinigung sowie der erforderlichen technischen Ausstattung (§5 Abs. 1 ChemKlimaschutzV 2008).

3.3.2 Chemikalien-Ozonschichtverordnung (ChemOzonSchichtV)

Von zunehmend geringerer Bedeutung ist die deutsche Chemikalien-Ozonschichtverordnung (ChemOzonSchichtV), welche die Vorgaben des Montrealer Protokolls und der EU-ODS-Verordnung umsetzt.

Die enthaltenen Regelungen zur Rückgewinnung sind mit denen der Chemikalien-Klimaschutzverordnung prinzipiell identisch. Da die Verwendung von Ozonschicht zerstörenden

Stoffen bis auf wenige Ausnahmen nicht mehr erlaubt ist, gibt es keine Vorgaben für Wiederaufbereitung.

3.3.3 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)

Gemäß EU F-Gas-Verordnung ist es eine Verpflichtung der Anlagenbetreiber, festzulegen, wer verantwortlich für die gebrauchten Kältemittel ist und was mit ihnen weiter geschehen soll. Diese Regelung stellt die Grundlage für die eventuelle Anwendung des Abfallrechts dar, das in Deutschland in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle spielt.

Im Kontext der weiteren Behandlung von F-Gasen ist wichtig, ob die rückgewonnenen Stoffe dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) unterliegen oder nicht. Das KrWG setzt die EU-Abfallrahmenrichtlinie in nationales Recht um und enthält weitere nationale Maßnahmen. Rückgewonnene F-Gase fallen in den Geltungsbereich des KrWG, wenn sie als „Abfall“ bezeichnet werden müssen. Die Definition von „Abfall“ lautet (§3 Absatz 1): „Abfälle im Sinne dieses Gesetzes sind alle Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss. Abfälle zur Verwertung sind Abfälle, die verwertet werden; Abfälle, die nicht verwertet werden, sind Abfälle zur Beseitigung.“

„Entledigung“ bezeichnet „... wenn der Besitzer Stoffe oder Gegenstände einer Verwertung ... oder einer Beseitigung ... zuführt oder die tatsächliche Sachherrschaft über sie unter Wegfall jeder weiteren Zweckbestimmung aufgibt.“

Daneben sind weitere Definitionen im Zusammenhang mit der vorliegenden Thematik von Interesse. Der Begriff „Recycling“ wird folgendermaßen definiert (§3 Absatz 25): (25) „Recycling im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden“. Demnach meint „Recycling“ das Reinigungsverfahren selbst und nicht die Wiederverwendung. Gemäß Conrad (2017) wäre eine weitere Zweckbestimmung zum Beispiel, dass ein Altreifen als sogenannter Fender weiter benutzt wird. Dann ist es kein Reifen mehr, sondern ein Rammschutz für Boote an Kaimauern.

Es ist demzufolge also möglich, dass der Betreiber das rückgewonnene Kältemittel in eine andere seiner Anlagen einfüllt. Ist allerdings beim Betreiber ein Entledigungswille vorhanden, sind die gebrauchten F-Gase als Abfall definiert. Gemäß Europäischem Abfallverzeichnis (EU-Kommission 2014; siehe 3.2.5) sind die Stoffe dann als gefährliche Abfälle unter der Schlüsselnummer 14 06 01* gelistet, und an diese sind besondere Anforderungen gestellt, und zwar im Hinblick auf Verpackung, Kennzeichnung, Lagerung sowie Begleitdokumente und Anforderungen an die Transportfahrzeuge. Ebenso ergeben sich gesonderte Regelungen hinsichtlich der Arbeitssicherheit.

3.3.4 Altfahrzeug-Verordnung (AltfahrzeugV)

Die Altfahrzeug-Verordnung (AltfahrzeugV) stellt die deutsche Umsetzung der oben beschriebenen europäischen Altfahrzeugrichtlinie 2000/53/EG dar. Demnach müssen seit dem 1.1.2007 Fahrzeughersteller und Importeure Altfahrzeuge ihrer Marke zurückzunehmen, ohne dass dem Letzthalter dadurch Kosten entstehen. Ziel ist es, das Altfahrzeug zum Schutz der Umwelt und zur Rückgewinnung wichtiger Rohstoffe in einen geregelten Kreislauf zu übergeben.

Tabelle 4: Übersicht relevanter Regelungen der deutschen Altfahrzeug-Verordnung

Bezeichnung	Inhalt
§2 Begriffsbestimmungen Absatz 1, Nummer 1 und Nummer 2	Unter dem Begriff „Fahrzeug“ werden Fahrzeuge der Klassen M1 („Fahrzeuge zur Personenbeförderung mit höchstens acht Sitzplätzen außer dem Fahrersitz“) und N1 („Fahrzeuge zur Güterbeförderung mit einem Höchstgewicht bis zu 3,5 Tonnen“) sowie dreirädrige Kraftfahrzeuge verstanden. Mit dem Begriff „Altfahrzeug“ werden Fahrzeuge gemeint, die nach §3 Absatz 1 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes Abfall sind.
§3 Rücknahmepflicht Absatz 1 und Absatz 2	Die Hersteller von Fahrzeugen sind unter der Rücknahmepflicht dazu verpflichtet, „alle Altfahrzeuge ihrer Marke vom Letzthalter zurückzunehmen“.
§4 Überlassungspflichten Absatz 1	Die Person, die sich eines Fahrzeugs entledigen möchte oder muss, ist verpflichtet, diese zu einer anerkannten Annahmestelle, Rücknahmestelle oder Demontagebetrieb zu überlassen.
§5 Entsorgungspflichten Absatz 1, Nummer 1 und Nummer 2	Ab dem 01. Januar 2015 müssen folgende Zielvorgaben bezogen auf das durchschnittliche Fahrzeugleergewicht aller pro Jahr überlassenen Altfahrzeuge erreicht werden: a) „Wiederverwendung und Verwertung mindestens 95 Gewichtsprozent, b) Wiederverwendung und stoffliche Verwertung mindestens 85 Gewichtsprozent“.
Anhang Nummer 3.2.2.1; Nummer 3.2.2.2; Nummer 3.2.2.3	„Die Betreiber von Demontagebetrieben müssen vor der weiteren Behandlung folgende Betriebsflüssigkeiten und Betriebsmittel entfernen und getrennt sammeln: [...], Kältemittel aus Klimaanlage (FCKW u.a.)“. Die genannte Vorbehandlung muss nach dem Stand der Technik erfolgen. Dabei sind „für die Entnahme der Kraftstoffe [...] dem Stand der Technik entsprechende, für die Entnahme von Kältemitteln geschlossene Systeme zu verwenden“.
Anhang Nummer 3.2.4.1	Das Ziel ist, die gewonnenen Bauteile und Stoffe vorrangig einer Wiederverwendung oder Verwertung zuzuführen. Auch Kältemittel aus Klimaanlage sind, soweit technisch und wirtschaftlich möglich, einer Verwertung zuzuführen. Außerdem müssen Betreiber von Demontagebetrieben vor der Zerstörung der Restkarosse „Bauteile, Materialien und Betriebsflüssigkeiten mit einem Anteil von durchschnittlich mindestens 10 Gewichtsprozent im Jahresmittel bezogen auf die Summe der Fahrzeugleergewichte der angenommenen Altfahrzeuge ausbauen oder entfernen und der Wiederverwendung oder der stofflichen Verwertung zuführen und belegen, dass der entsprechende Anteil stofflich verwertet wurde“.
Anhang Nummer 3.3.1; Nummer 3.3.2; Nummer 3.3.3	„Betreiber von Demontagebetrieben haben [...] ein Betriebstagebuch über Erfassung, Trockenlegung, Demontage, Wiederverwendung, stoffliche und energetische Verwertung, thermische Behandlung und über den sonstigen Verbleib der Bauteile, der Materialien und Stoffe zu führen“. Darin sind sämtliche ein- und ausgehenden Mengenströme mit entsprechenden Nachweisen zu notieren. Dazu gehören unter anderem „Bestand und Verbleib der entnommenen Stoffe, Materialien und Teile nach Art und Menge, Bilanzierung der Abfälle zur Verwertung und zur Beseitigung sowie Angaben über zur Wiederverwendung abgegebene[n] Teile[n]“.

3.3.5 Umweltstatistikgesetz (UStatG)

Zusätzlich relevant für dieses Vorhaben ist das Umweltstatistikgesetz (UStatG), das „für Zwecke der Umweltpolitik und zur Erfüllung europa- und völkerrechtlicher Berichtspflichten jährliche Erhebungen als Bundesstatistik“ vorschreibt (§1 UStatG). Die Statistik umfasst Erhebungen der Abfallentsorgung (§3 UStatG), der Abfälle, über die Nachweise zu führen sind (§4 UStatG) und der Entsorgung bestimmter Abfälle (§5 UStatG). Dabei werden bei den Betreibern von zulassungsbedürftigen Entsorgungsanlagen jährlich die „Art, Menge, Beschaffenheit, Herkunft, Verbleib und Entsorgungsverfahren [...] der Abfälle“ (§3, Abs. 1, Nr. 1a UStatG) erhoben. Auch für die Erhebung der gefährlichen Abfälle, über die Nachweise zu führen sind, werden die „Art und Menge der vom Erzeuger abgegebenen oder in eigenen Anlagen oder anderweitig behandelten, gelagerten und abgelagerten Abfälle“ erhoben (§4, Nr. 1 UStatG). Die jährliche Erhebung der Art, Menge und Verbleib der Geräte bei Unternehmen, Einrichtungen und öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern für Elektro- und Elektronikaltgeräte nach dem Elektro- und Elektronikgerätegesetz vom 20. Oktober 2015 wird im §5 geregelt (§5, Abs. 3 UStatG). Die Auskunftspflicht (§14 UStatG) umfasst im Fall des §3, Abs. 1 die Inhabenden oder Leitungen genannter Anlagen, im Fall des §4, Nr. 1 die Behörden, die für die Nachweise gefährlicher Abfälle zuständig sind und im Fall des §5, Abs. 3 die Inhabenden der Unternehmen bzw. die Entsorgungsträger.

3.3.6 Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG)

Innerhalb Deutschlands wird die WEEE-Richtlinie 2012/19/EU durch das Elektro- und Elektronikgerätegesetz, kurz ElektroG, umgesetzt. Ziel ist die Vermeidung von Abfällen von Elektro- und Elektronikgeräten, sowie die Wiederverwendung, das Recycling und die Verwertung solcher Abfälle bzw. die Reduzierung der Abfallmenge und die Verbesserung der Ressourcennutzung (§1 ElektroG). Wesentliche Elemente sind die Pflichten beim Inverkehrbringen von Geräten (Abschnitt 2 ElektroG), Regelungen zur Sammlung und Rücknahme, die die kostenlose Entsorgung für Privathaushalte und die Rücknahmepflicht für die Hersteller sowie Vertreiber der Geräte enthält (Abschnitt 3 ElektroG) sowie Behandlungs- und Informationspflichten (Abschnitt 4 und 5 ElektroG). Der Anwendungsbereich umfasst sämtliche Elektro- und Elektronikgeräte, von denen insbesondere die erste Kategorie, Wärmeüberträger, für dieses Vorhaben von Relevanz sind (§2, Abs. 1, Nr. 1 ElektroG). Diese Kategorie umfasst Kühlschränke, Gefriergeräte, Geräte zur automatischen Abgabe von Kaltprodukten, Klimageräte, Entfeuchter, Wärmepumpen, Wärmepumpentrockner, ögefüllte Radiatoren, Boiler, Warmwasserspeicher und sonstige Wärmeüberträger, bei denen andere Flüssigkeiten als Wasser für die Wärmeübertragung verwendet werden (Anhang 1, Nr. 1 ElektroG). Die Altgeräte sind vor weiteren Verwertungs- oder Zerstörungsmaßnahmen einer Erstbehandlung zuzuführen. Diese hat nach dem Stand der Technik zu erfolgen und muss prüfen, ob das Gerät oder einzelne Bauteile wiederverwendet werden können (§20, Abs. 1 und 2 ElektroG). Entsprechend der WEEE-Richtlinie 2012/19/EU müssen 85 % des Altgerätes verwertet und 80 % der Vorbereitung zur Wiederverwendung und zum Recycling zugeführt werden (§22, Abs. 1, Nr. 1 ElektroG). Der Betreibende der Erstbehandlungsanlage ist verpflichtet, die Ein- und Ausfuhr der Geräte, Bauteile und Stoffe aufzuzeichnen (§22, Abs. 3 ElektroG). Die Anlage 5a beschreibt die Inhalte des Betriebstagebuchs, das die Betreiber der Erstbehandlungsanlage führen müssen.

3.3.7 Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft)

Die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft), stellt eine weitere gesetzliche Grundlage für die Wiederaufbereitung und Entsorgung von F-Gasen in Deutschland dar. Sie

dient dem Schutz und der Vorsorge vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen für die Gesellschaft im Allgemeinen (Abschnitt 1, TA Luft). Sie enthält Regelungen zu Einheiten, Größen und Begrenzungen von Immissionen und Emissionen, worunter auch Emissionen der Abfallentsorgung fallen. Unter Abschnitt 5.4.8.9.1 werden die baulichen und betrieblichen Anforderungen aufgeführt, die an Anlagen zur Behandlung von nicht gefährlichen metallischen Abfällen in Schredderanlagen gestellt werden. Demnach sind Restkarossen auf die ordnungsgemäße Vorbehandlung gemäß der AltfahrzeugV zu prüfen. Falls diese noch Betriebsflüssigkeiten wie Kältemittel enthalten, müssen sie zurückgewiesen werden (5.4.8.9.1b, TA Luft). Ebenso sind Kühlgeräte oder andere Wärmeübertrager aus Erstbehandlungsanlagen zurückzuweisen, sollten diese noch F-Gase oder (H-)FCKW enthalten und müssen einer ordnungsgemäßen Entsorgung nach ElektroG zugeführt werden. Dies gilt auch für diese Stoffe enthaltendes Isoliermaterial (5.4.8.9.1c, TA Luft). Unter 5.4.8.11c werden die Anforderungen aufgeführt, die für Anlagen zur Entsorgung von (H-)FCKW, F-Gasen oder ammoniakhaltigen Kältemitteln enthaltenden Kühlgeräten oder Wärmeüberträgern gelten. Die Anlagen sind so zu errichten und zu betreiben, dass Emissionen von Kälte- und Treibmitteln vermieden werden. Die in den Geräten enthaltenen Kältemittel müssen in der „sogenannten Stufe-1-Behandlung vollständig entfernt und verlustfrei zurückgewonnen werden (Trockenlegung)“ (5.4.8.11c, b, TA Luft). Auch das Isolationsmaterial muss getrennt werden und die Treibmittel aus dem Material entfernt und verlustfrei zurückgewonnen werden. Daher muss die Trockenlegung in einer gekapselten Anlage vorgenommen werden, um die Verluste von Treibmitteln zu vermeiden (5.4.8.11c, c, TA Luft). Die zurückgewonnenen (H-)FCKW und F-Gase müssen ordnungsgemäß entsorgt werden. Dies kann entweder am eigenen Anlagenstandort (on-site) oder an einem anderen Standort (off-side) erfolgen (5.4.8.11c, e, TA Luft). Die Zuverlässigkeit der Trockenlegung der Kältekreisläufe muss jährlich durch mindestens 100 Entnahmen aus FCKW- oder HFKW-haltigen Kühlgeräten geprüft werden (5.4.8.11c, j, TA Luft). Die Summe der gesammelten Gase darf 90 Masseprozent der Gesamtmenge der Angaben auf den Typenschildern der Geräte nicht unterschreiten. Desgleichen ist die Leistungsfähigkeit der Behandlung der trockengelegten Geräte zur Rückgewinnung der Treibmittel zu prüfen. In einem Test von 1.000 Geräten ist nachzuweisen, dass die Gesamtmenge der zurückgewonnenen Treibmittel 90 Masseprozent der Gesamtmenge beträgt (5.4.8.11c, j und k, TA Luft). Es sind Wochen- und Jahresbilanzen über die zurückgewonnenen Massen auf Basis des täglichen Monitorings der Trockenlegung (Stufe-1-Behandlung) und Behandlung der trockengelegten Geräte (Stufe-2-Behandlung) zu führen. Diese Dokumentation muss fünf Jahre aufbewahrt und der zuständigen Behörde auf Verlangen vorgezeigt werden (5.4.8.11c, l, TA Luft). Unter dem Abschnitt zu Kälte- und Treibmitteln (5.4.8.11c, m-r, TA Luft) werden Grenzwerte für verbleibendes Isolationsmaterial, Emissionsgrenzwerte für die Abgase der Anlage sowie eine Zerstörungseffizienz von (H-)FCKW und HFKW von 99,99 Prozent festgelegt. Auch bei der ausschließlichen Behandlung von Kohlenwasserstoff-haltigen Geräten müssen die Emissionen und der Restgehalt gemessen werden, um eine mögliche Fehlsortierung ausschließen zu können.

4 Technische Prozesse für Rücknahme, Aufarbeitung und Zerstörung von F-Gasen

4.1 Rückgewinnung, Recycling, Aufbereitung

Wie oben ausgeführt, ist die Rückgewinnung gebrauchter F-Gase gemäß EU F-Gas-Verordnung verpflichtend durchzuführen. Darüber hinaus besteht in Deutschland eine Rücknahmeverpflichtung für Import- und Handelsunternehmen in Bezug auf gebrauchte F-Gase, die in der Chemikalien-Klimaschutzverordnung festgelegt ist (siehe 3.3.1).

Grundsätzlich ist zwischen „Recycling“ und „Aufbereitung“ von F-Gasen zu unterscheiden (siehe auch Begriffsbestimmungen gemäß der EU F-Gas-Verordnung, Abschnitt 3.2.1.1). Beim Recycling handelt es sich um eine einfache Reinigung, bei der Öl, Wasser und feste Verschmutzungen entfernt werden, zum Beispiel durch Umfüllen über einen Filter in einen anderen Behälter, wie es häufig vor Ort geschieht. Recyclingprozesse unterliegen keinem standardisierten Verfahren und keiner Qualitätskontrolle, etwa einer Analyse der Zusammensetzung. Daher kann bei der folgenden Verwendung nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden, dass durch mangelnde Qualität des recycelten Gases die Anlage beschädigt werden könnte (Guallar-Herrero 2021).

Für die technische Durchführung der Aufbereitung von F-Gasen ist zunächst die ordnungsgemäße Rückgewinnung bei Demontage- oder Wartungsarbeiten erforderlich. Zur Entnahme werden üblicherweise Absauggeräte verwendet, die den Stoff gasförmig absaugen, verdichten, verflüssigen und ihn in Flaschen für „Abfall zur Verwertung“ drücken. Die Absauggeräte und deren Zubehör werden als „Füllanlagen“ bezeichnet (Westfalen 2019).

Alle Gasehandelsunternehmen in Deutschland stellen besondere Behälter für rückgewonnene F-Gase zur Verfügung, die als „R-Ware-Flaschen“ bezeichnet werden.

Unterschiedliche Behälter werden für brennbare und nicht-brennbare Kältemittel eingesetzt. Bei der Rückgewinnung sollten diese Behälter nicht überfüllt werden, und nach Möglichkeit sollten die Gase sortenrein gesammelt werden (Westfalen 2019).

Im Rahmen des Rücknahmeprozesses gebrauchter Kältemittel wird das rückgewonnene Kältemittel nach Abfüllung in die Recyclingflaschen und Abholung durch den Gasehandel einer Analyse im Labor unterzogen. Anschließend wird auf Basis der Laborergebnisse entschieden, welche weitere Behandlung erfolgt. Werden bestimmte Kriterien nicht erreicht (z. B. Wassergehalt, Zusammensetzung), werden diese Kältemittel zur Destillation oder thermischen Verwertung abgegeben. Sofern bestimmte Parameter erreicht werden, wird die Aufarbeitung des gebrauchten Kältemittels durchgeführt.

Anders als beim Recycling hat die Aufarbeitung von F-Gasen die Zielsetzung, dass die rückgewonnenen Gase ein gleichwertiges Qualitätsniveau wie Frischware erreichen. Dabei werden nicht nur Öl, Feuchtigkeit und feste Verunreinigungen entfernt, sondern auch nicht-kondensierbare Gase, die nach der Rückgewinnung enthalten sein können. Dies kann die Zusammensetzung des Gases beeinflussen, was folglich bei der Aufarbeitung von Gemischen einen weiteren Arbeitsschritt erfordert, nämlich die Wiederherstellung ihrer standardisierten Zusammensetzung. Diese Behandlung muss in einer speziell für die Aufarbeitung von Kältemitteln konzipierten Anlage durchgeführt werden. In Deutschland befinden sich solche Anlagen zum Beispiel im Industriepark Frankfurt-Höchst, betrieben von Daikin Chemicals Europe GmbH (Guallar-Herrero 2021), in Münster-Gelmer, betrieben von Westfalen GmbH (N.

Klostermann 2023, mündliche Mitteilung) oder bei Würzburg, betrieben von der TEGA GmbH (M. Langhirt 2023, mündliche Mitteilung).

Die aufgearbeiteten Kältemittel müssen die Normen für neu produzierte Gase erfüllen und ordnungsgemäß gekennzeichnet sein. Sie sind daher mit Frischware vergleichbar und können in derselben Anwendung eingesetzt werden. Die relevanten Standards sind die DIN 8960 (DIN 1998) und der internationale Standard AHRI 700 (AHRI 2019), welche die Anforderungen an Kältemittel definieren.

Verschiedene technische Verfahren zur Aufbereitung von F-Gasen stehen zur Verfügung. Grundsätzlich werden zunächst Destillationsprozesse durchgeführt, um Öl, Wasser und Feststoffpartikel abzuscheiden. Bei Kältemittelgemischen werden die unterschiedlichen Siedepunkte der Kältemittel-Komponenten genutzt, um die Einzelstoffe abzutrennen. Gemische müssen üblicherweise neu gemischt werden, da die einzelnen Komponenten zumeist nicht in den Spezifikationen entsprechenden Anteilen vorliegen.

Im Rahmen des EU-finanzierten Projektes „Life 4 Fgases“ wurde die Einführung von Membrantechnologie zur Aufbereitung gebrauchter Kältemittel untersucht. Zielsetzung war die Entwicklung einer Pilotanlage, die Membranfilterung und Adsorptionsprozesse in einem System integriert (Hybrid Adsorption and Membrane Systems; HAMSYS). Dabei wird ein Polymer-Membranmodul für die selektive Filterung von F-Gasen auf Basis ihrer Permeabilität verwendet. Daneben wird ein Adsorptionssystem mit Aktivkohle zur Herausfilterung eines Gases eingesetzt. Die Anlage sollte geeignet sein, mehr als 1 kg pro Stunde an gebrauchten F-Gas-Gemischen zu behandeln.

Folgende Initiativen sind im Zusammenhang mit der Rücknahme und Aufbereitung von Kältemitteln in den letzten Jahren entstanden:

Im Rahmen des „Daikin Loop-Systems“ (Daikin 2013a) werden rückgewonnene Kältemittel (derzeit nur R-410A) aufbereitet und im Werk mit Kältemittel-Frischware gemischt. Diese Mischware wird im Werk in alle in Europa hergestellten und verkauften VRV-Geräte eingefüllt.

Im Rahmen des EU-geförderten Forschungsprojektes „Life3R“ wurde die Online-Handels-Plattform „Retradeables“ (Daikin 2013b) entwickelt, um den Markt für rückgewonnene und aufgearbeitete Kältemittel über die Zusammenführung von Verkaufsinteressierten und Einkaufsinteressierten zu fördern. Das Projekt konzentriert sich auf stationäre Kälte- und Klimaanlageanlagen und den Gebäudesektor. Die Online-Plattform wurde im Mai 2021 gestartet (Barmparitsas et al. 2023). Bisher operiert diese Plattform in der Tschechischen Republik, der Slowakei und Ungarn. Partnerinstitutionen des Projektes waren Daikin Europe, die National Technical University of Athens (NTUA) und die Society for Materials and Energy Applications (MAT4NRG). Eine Erweiterung auf insgesamt 16 Länder ist bis 2029 geplant.

Anforderungen an SF₆ sind in der DIN EN 60480 (DIN 2020) über Spezifikationen für die Wiederverwendung von Schwefelhexafluorid (SF₆) und seinen Mischungen in elektrischen Betriebsmitteln aufgelistet. Diese internationale Norm stellt Kriterien für die Wiederverwendung von SF₆ und seinen Gemischen nach der Rückgewinnung und Aufbereitung aus elektrischen Betriebsmitteln zur Verfügung. Verfahren zur Rückgewinnung und Aufbereitung von gebrauchtem SF₆ und seinen Gemischen fallen in den Geltungsbereich der Norm IEC 62271-4.

Für SF₆ besteht seit Jahren das so genannte „ReUse-Konzept“ des Herstellers Solvay Fluor (ZVEI 2018). Das gebrauchte SF₆ wird in den Herstellungsprozess für neues SF₆ eingeführt und anschließend in elektrischen Betriebsmitteln wiederverwendet.

4.2 Zerstörung von F-Gasen

Die Zerstörung von F-Gasen erfolgt zumeist durch thermische Verwertung (d.h. Verbrennung) in Sonderabfallverbrennungsanlagen oder Verwertungsanlagen. Hierbei müssen Temperaturen von 1000 – 1200 °C erreicht werden, so dass sich nur spezielle Anlagen eignen (K.-H. Schneider 2023, mündliche Mitteilung). Gemäß den Angaben des Fachbetriebsregisters Entsorgungsfachbetriebe auf der Seite der Länderarbeitsgruppe Gemeinsame Abfall-DV-Systeme (LAG GADSYS) verfügen in Deutschland folgende Unternehmen über eine Zertifizierung als Entsorgungsfachbetrieb, die mindestens die Tätigkeit(en) Verwerten oder Beseitigen für den Abfallschlüssel 14 06 01* - Fluorchlorkohlenwasserstoffe, HFCKW, HFKW umfasst:

- ▶ GSB Bayern, Baar-Ebenhausen, Bayern
- ▶ HIM GmbH, Biebesheim, Hessen (Indaver)
- ▶ Infraserb GmbH & Co. Höchst KG, Hessen
- ▶ REMONDIS Industrie Service Entsorgungswerk Bramsche (Niedersachsen)
- ▶ REMONDIS SAVA GmbH Brunsbüttel (Schleswig-Holstein)
- ▶ RCN Chemie GmbH & Co. KG Goch (Nordrhein-Westfalen)

Daneben besteht in Deutschland die Möglichkeit der thermischen Spaltung von F-Gasen in der Spaltanlage in Frankfurt-Höchst (Daikin Refrigerants Frankfurt GmbH). Dabei werden diese in einer Knallgasflamme zu Fluss- und Salzsäure aufgespalten und anschließend in chemischen Herstellungsprozessen als Rohstoff wiederverwendet (Solvay 2003, Daikin 2021). Es entstehen keine Abfälle, die als Flüssigkeiten oder als Feststoffe deponiert werden müssen. Das Verfahren hat eine sehr hohe Leistungskapazität und Umwandlungsrate, die mit >99,99 % angegeben wird (UNEP TEAP 2018).

5 Bisherige Modellannahmen und Einordnung

Wie in den einleitenden Kapiteln ausgeführt, erfolgt die Abschätzung der Entsorgungsemissionen in Deutschland mit Hilfe von Modellen, die auf Annahmen für verschiedene Parameter beruhen. Im Zuge der Überprüfung der Modellannahmen für die Unterquellgruppen 2.F.1 Kälte- und Klimaanlage und 2.G.1 Elektrische Betriebsmittel wurden alle bisher zur Abschätzung der Entsorgungsemissionen verwendeten Modelle und Faktoren wie durchschnittliche Lebensdauern, Restfüllstände zum Zeitpunkt der Außerbetriebnahme und Rückgewinnungsraten sowie deren jeweiligen Unsicherheiten überprüft.

5.1 Wärmepumpen, Kälte- und Klimaanlage (2.F.1)

In der Studie „Modelle für die Inventarerhebung von F-Gasen“ aus dem Jahr 2013 (Schwarz et al. 2013) wurden die Parameter der Entsorgungsemissionen im Bereich Kälte- und Klimaanlage zuletzt vollständig überarbeitet. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse wurden für die deutsche Inventarerhebung umgesetzt und bestehen seither. Vor dieser Änderung wurde mangels empirischer Daten von einem Emissionsfaktor der Entsorgung von 30 % ausgegangen. Dabei wurde dieser Faktor auf die sogenannte nominale Entsorgungsmenge angewandt, das heißt den kompletten Neuzugang in Anlagen in dem Jahr des Inverkehrbringens. Auch die IPCC-Guidelines (IPCC 2006, Kapitel 7.5.2.1, Gleichung 7.14) haben schon den Restfüllstand einer Anlage am Ende der Lebensdauer in Ihre Vorgaben miteinbezogen, nach denen die Entsorgung wie folgt zu berechnen ist:

$$E_{\text{Lebensende},t} = M_{t-d} \cdot \frac{p}{100} \cdot \left(1 - \frac{\eta_{\text{rec},d}}{100}\right)$$

Dabei gilt:

$E_{\text{Lebensende},t}$ = Kältemittelmenge in kg, die am Ende der Lebensdauer im Jahr t emittiert

M_{t-d} = ursprünglich in die Anlage gefüllte Menge an Kältemittel in kg im Jahr t-d

d = Lebensdauer

p = verbleibende Menge an Kältemittel im zu entsorgenden Gerät im Verhältnis zur ursprünglichen Füllmenge in %

$\eta_{\text{rec},d}$ = Rückgewinnungsrate bei der Entsorgung in %

Dieser Weg zur Berechnung über einen Emissionsfaktor war ein „[...] abkürzender und rein rechnerischer Ausdruck, der der Einfachheit halber die Differenz zwischen Erst- und Restfüllung und die Höhe der Rückgewinnungsrate in einer einzigen Zahl zusammenfasst.“ (Schwarz et al. 2013, S. 86).

Die Studie hatte daher mithilfe von Befragungen von Branchenfachleuten realitätsnahe Restfüllstände entwickelt. Denn die in den 2006 IPCC-Guidelines angegebenen Spannweiten sind sehr groß, wie die folgende Tabelle 5 zeigt.

Für steckerfertige Geräte ist beispielsweise eine Spanne von 0-80 % für die Restfüllmenge angegeben. Das heißt, die Restfüllmenge kann noch bei 80 % liegen, aber auch bei 0 %, was einer leeren Anlage entspricht.

Tabelle 5: Default-Werte der IPCC-Guidelines für Füllmenge, Lebensdauer, Rückgewinnungsrate und Restfüllmenge für Kälte- und Klimaanlage

Sektor	Füllmenge (kg)	Lebensdauer (Jahre)	Rückgewinnungsrate (%)	Restfüllmenge (%)
Kategorie	M	d	$\eta_{rec,d}$	p
Haushaltskälte	$0,05 \leq M \leq 0,5$	$12 \leq d \leq 20$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$0 < p < 80$
Steckerfertige Geräte	$0,2 \leq M \leq 6$	$10 \leq d \leq 15$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$0 < p < 80$
Mittlere und große gewerbliche Kühlung	$50 \leq M \leq 2.000$	$7 \leq d \leq 15$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$50 < p < 100$
Transportkühlung	$3 \leq M \leq 8$	$6 \leq d \leq 9$	$0 < \eta_{rec,d} < 70$	$0 < p < 50$
Industrielle Kältetechnik	$10 \leq M \leq 10.000$	$15 \leq d \leq 30$	$0 < \eta_{rec,d} < 90$	$50 < p < 100$
Flüssigkeitskühlsätze	$10 \leq M \leq 2.000$	$15 \leq d \leq 30$	$0 < \eta_{rec,d} < 95$	$80 < p < 100$
Klimaanlagen einschl. Wärmepumpen	$0,5 \leq M \leq 100$	$10 \leq d \leq 20$	$0 < \eta_{rec,d} < 80$	$0 < p < 80$
Mobile Klimaanlage	Seeverkehr: $5 \leq M \leq 6.500$ Zugverkehr: $10 \leq M \leq 30$ Bus: $4 \leq M \leq 18$ Weitere: $0,5 \leq M \leq 2$	$9 \leq d \leq 16$	$0 < \eta_{rec,d} < 50$	$0 < p < 50$

Quelle: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 3: Industrial Processes and Product Use, 7.52 (IPCC 2006)

Diese Annahme wurde allein schon aus dem Grund verworfen, da eine leere Anlage keine Kälteleistung mehr erbringen kann. Jede Anlage hat eine bestimmte Grenzmenge, ab welcher sie nicht mehr funktionsfähig ist. Die Studie von 2013 schloss von dieser Annahme ausgehend je nach Anlagentyp auf einen gewissen technischen Mindestfüllstand bei der Entsorgung. Durch die Festlegung dieses Wertes in Zusammenhang mit dem jeweiligen Bestandsemissionsfaktor sowie der Lebensdauer ließ sich die maximale Anzahl der Jahre ohne Nachfüllung bestimmen. Da allerdings der Zeitpunkt der Entsorgung nicht genau bestimmt werden kann, da die Lebensdauer nur einen Durchschnittswert darstellt, braucht es einen weiteren Schritt, um auf eine annehmbare Schätzung zu kommen. „Die wirkliche Fehlmenge resultiert aus der Zeit zwischen der tatsächlich letzten Befüllung bei Anlagenbetrieb und der endgültigen Außerbetriebnahme der Anlage. Sie ergibt sich aus dem Durchschnittszeitraum zwischen den beiden Zeitpunkten.“ (Schwarz et al. 2013). Die bestehende Differenz zwischen Nominalfüllung und Mindestfüllstand wird also halbiert, was die sogenannte effektive Entsorgungsmenge ergibt. Ausgenommen von dieser Anpassung des Modells waren hermetisch geschlossene Anlagen, da diese aufgrund der niedrigen Bestandsemissionen nicht nachgefüllt werden.

Tabelle 6 fasst die bisher verwendeten mittleren Rückgewinnungsraten für die verschiedenen Unteranwendungen in Deutschland zusammen. In fast allen Unteranwendungen ist eine

Steigerung der Rate Im Laufe der Jahre zu erkennen. Dies ist durch Annahmen bedingt, welche in der genannten Studie getroffen worden sind, nämlich dass die Rate der Rückgewinnung im Laufe der Jahre steigt.

Tabelle 6: Mittlere Rückgewinnungsraten in den verschiedenen F-Gas-Sektoren für Deutschland in den Jahren 2010 bis 2021 (%)

Sektor	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Gewerbe- kälte	63	64	66	67	67	68	70	71	72	73	75	75
Haushalts- kälte	73	73	58	59	60	61	62	63	65	66	45	45
Industrie- kälte	72	72	73	74	74	75	76	76	77	78	79	79
Mobile Klimaanla- gen	32	33	35	37	38	38	39	42	44	45	46	46
Stationäre Klimaanla- gen	47	49	50	53	57	61	63	64	65	68	70	70

Quelle: UNFCCC (2023a)

Dabei ist zu beachten, dass die einzelnen Sektoren in Tabelle 6 aus weiteren Sub-Sektoren bestehen, und es sich bei den mittleren Rückgewinnungsraten um gemittelte Werte des gesamten Sektors handelt. Die betrachteten Sub-Sektoren sind:

- ▶ Gewerbekälte: Zentralanlagen Supermarkt und Discounter, steckerfertige Geräte und Verflüssigungssätze
- ▶ Haushaltskälte: Haushaltskühlgeräte, Speiseeismaschinen
- ▶ Industriekälte: Großkälte und steckerfertige Geräte
- ▶ Mobile Klimaanlage: Pkw, Nutzfahrzeuge, Busse, Schiffe, Schienenfahrzeuge, mittelgroße Flugzeuge und Hubschrauber
- ▶ Stationäre Klimaanlage: Raumklimageräte, Kaltwassersätze, Wärmepumpen, Wärmepumpen-Wäschetrockner und gewerbliche Spülmaschinen mit Wärmepumpenfunktion

Die getroffenen Annahmen sind mittlerweile in die Jahre gekommen und müssen aktualisiert werden. Dies ist zum einen erforderlich, weil viele der Annahmen auf Schätzungen bis zum Jahr 2020 beruhen und in den Folgejahren modellhaft fortgeschrieben wurden. Zum anderen aber ist es durch die Verringerung der Gesamtmenge an HFKW in der EU durch die F-Gas-Verordnung EU 517/2014 im Zuge des HFKW-Phase-down zu einer Verknappung von HFKW gekommen. Recycelte Mengen unterliegen nicht den Beschränkungen des HFKW-Phase-down, was in der Praxis zu einer Erhöhung der Rückgewinnungsraten geführt haben könnte (Tabelle 7).

Tabelle 7: Summen der in entsorgten Anlagen verbleibenden F-Gase in metrischen Tonnen in den verschiedenen Sektoren für Deutschland 2010-2021

Sektor	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Gewerbekälte	336	390	599	600	599	617	710	919	963	965	970	967
Haushalts-kälte	4	4	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Industriekälte	99	98	98	98	98	98	125	124	236	235	231	239
Mobile Klimaanlage	38	51	65	78	88	89	82	98	113	98	90	98
Stationäre Klimaanlage	43	81	147	224	319	449	549	584	575	570	704	785

Quelle: UNFCCC (2023a)

5.2 Elektrische Betriebsmittel (2.G.1)

In der Unterquellgruppe „2.G.1 Elektrische Betriebsmittel“ wird SF₆ als Lösch- und Isoliermittel in Schaltanlagen und Schaltgeräten der Hoch- und Mittelspannung sowie bei der Herstellung von Komponenten (Wandler, Durchführungen und HS-Freiluftwandler) eingesetzt.

Der Bereich unterscheidet zwischen elektrischen Schaltanlagen und elektrischen Bauteilen für die Energieübertragung (T&D Bauteile; engl. Transmission and Distribution). Hier handelt es sich um Zu- und Anbauten für Schaltanlagen wie Messwandler und Durchführungen, aber auch um Kondensatoren für Umrichter. Diese Bauteile werden seit 2005 getrennt von Schaltanlagen berichtet, um den Stand der Selbstverpflichtung, die sich nur auf Schaltanlagen im engeren Sinn bezieht, sichtbar zu machen. Diese Selbstverpflichtung wurde von Herstellern und Betreibern im Jahr 2005 ins Leben gerufen und enthielt u.a. Ziele zur Reduktion von Emissionen (VDN, VIK, ZVEI, Solvay 2005). Im Jahr 2001 betrugen die Emissionen bei der Herstellung elektrischer Bauteile 27 t und damit mehr als aus dem Betrieb der Schaltanlagen selbst. Die Industrie hat durch Wiederverwendung und Kreislaufführung des Gases den Verbrauch pro Produkt erheblich verringert, so dass im Jahr 2009 nur noch 8 t Emissionen entstanden. Im Jahr 2022 beliefen sich die Emissionen der sog. „Anderen“ auf 1,9 t.

Das SF₆ und elektrische Betriebsmittel durchlaufen dabei einen Lebenszyklus, der in ZVEI (2023) schematisch dargestellt wird und aus vier Phasen besteht: Herstellung, Betrieb, Außerbetriebnahme, und Re-Use. Die Phase der Herstellung umfasst mehrere Schritte, beginnend mit der Herstellung des SF₆, gefolgt von der Entwicklung und Prüfung des Betriebsmittels und schließlich der Produktion sowie Montage und Inbetriebnahme. Bei allen Schritten und Phasen dieses Prozesses können SF₆-Emissionen anfallen.

Während im Bereich der Kälte- und Klimaanlage eine Vielzahl von Stoffen zum Einsatz kommt, ist es im Bereich der elektrischen Betriebsmittel bis jetzt vor allem SF₆. Zwar gibt es seit einiger Zeit zwei fluorierte Ersatzstoffe mit deutlich niedrigerem GWP, das Fluorketon Novec 5110 (GWP < 1) und das Fluornitril Novec 4710 (GWP 2.100). Allerdings sind diese Stoffe bisher noch nicht in großem Umfang verbreitet. Zudem gab der vormals größte Anwender, die Firma ABB/Hitachi, die auf das Fluorketon (Novec 5110) gesetzt hatte, im Sommer 2023 bekannt, diese Alternative nicht mehr weiterzuverfolgen. Sie setzen nun stattdessen auf Novec 4710, dessen Zukunft allerdings ungewiss ist, da 3M die Produktion bis Ende 2025 einstellt, da es sich um ein PFAS handelt. Die Lieferkette wäre durch Unternehmen aus beispielweise China jedoch

aufrecht zu erhalten. Allerdings wird derzeit ein PFAS-Verbot durch die Europäische Chemikalienagentur (ECHA) vorangetrieben, weshalb die Zukunft von Novec 4710 ungewiss ist.

Weltweit ist die SF₆-Anwendung in Schaltgeräten und Schaltanlagen bei weitem die größte, und auch in Deutschland bildet sie den Sektor mit dem höchsten SF₆-Verbrauch. Seit 2016 ist allerdings ein deutlicher Abwärtstrend im Verbrauch von SF₆ zu beobachten; so sank der Verbrauch im Jahr 2022 auf etwa 496 t (2016: 1.000 t). Die große Mehrheit der in Deutschland produzierten Anlagen wird exportiert. Inländische Emissionen entstehen vor allem bei der Herstellung (Forschung und Tests) und im Betrieb, und bisher nur zu geringem Teil bei Außerbetriebnahme. Diese Tatsache ist vor allem darauf zurückzuführen, dass elektrische Schaltanlagen eine Lebensdauer von mindestens 40 Jahren haben. Zunächst wurde vonseiten der Hersteller von etwa 35 Jahren Lebensdauer ausgegangen, mittlerweile gehen sie von teilweise bis zu 50 Jahren aus. Zwar wird SF₆ bereits seit den 1960er-Jahren in Hochspannungsschaltanlagen eingesetzt, allerdings waren die Gesamtmengen damals noch nicht so groß. Diese stiegen mit den Jahren kontinuierlich an, vor allem, nachdem SF₆ seit den 1980er-Jahren auch in Mittelspannungsanlagen eingesetzt wurde. Zwar sind die Füllmengen von MS-Anlagen deutlich geringer, ihre Anzahl ist dafür höher. Dadurch ergibt sich aktuell eine 50/50 Verteilung in den Bestandsmengen zwischen Hoch- und Mittelspannung.

Eine Unterscheidung zwischen Hoch- und Mittelspannungsanlagen ist in Bezug auf die Emissionen von hoher Relevanz. Mittelspannungsanlagen der sekundären Verteilebene sind „sealed for life“, das heißt, Emissionen während der Laufzeit sind extrem gering und betragen bei neuen Anlagen unter 0,1 % pro Jahr. Für Hochspannungsanlagen gilt dies nicht, daher haben sie höhere Faktoren zwischen 0,5 % und 2,5 %. Eine Unterscheidung ergibt sich auch bei der Entsorgung der Anlagen. Hochspannungsanlagen werden ausschließlich von Netzbetreibern oder sehr großen Industrieunternehmen betrieben. Stehen hier Entsorgungen an, werden diese vom Betreiber durchgeführt, und die Anlagen gehen zurück an den Hersteller. Mittelspannungsanlagen hingegen können beispielsweise auch im Besitz eines Supermarktes sein. Sie werden entweder an den Hersteller der Anlagen zurückgegeben oder über Entsorgungsfachbetriebe entsorgt. Die ersten Mittelspannungsanlagen werden in den kommenden Jahren das Ende ihrer Lebensdauer erreichen. Ab diesem Zeitpunkt wird es eine kontinuierlich steigende zu entsorgende Menge an SF₆ geben. Aufsehen erregt hat in der Branche eine Studie von Heckmann, Valov und Reimann (2020) aus dem Jahr 2020, welche drei verschiedene Szenarien zu Entsorgungsemissionen aufzeigt. Die Autoren geben Schätzungen zu Leckagen während der Rückgewinnung und des Recyclings von 1,5 % (Best Practice), 10 % (Basisfall) und 40 % (Worst-Case-Szenario) der Bestandsmenge an.

Deutschland wendet für den Bereich der elektrischen Betriebsmittel den sog. „Tier 3 Hybrid Life-Cycle Approach“ an. Theoretisch ist der sog. Tier 3-Ansatz der präziseste der drei Ansätze, da er eine Massenbilanzierung enthält und sich somit nicht auf Schätzungen oder Default-Werte zu etwa Emissionsfaktoren stützt. Sind die Emissionen allerdings geringer als 3 % pro Jahr, wie es im Bereich elektrische Betriebsmittel teilweise der Fall ist, können diese über die Massenbilanzierung nicht mehr korrekt erfasst werden. In Deutschland wird daher ein Teil der Emissionen über Emissionsfaktoren und ein anderer über die Massenbilanzierung erhoben. Die genaue Beschreibung dieses Ansatzes findet sich in den 2006 IPCC-Guidelines (IPCC 2006: Vol. 3, Chapter 8.2.2).

Die aktuellen Emissionsfaktoren des deutschen Emissionsinventars sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Emissionsfaktoren für den Sektor 2.G.1 Elektrische Betriebsmittel in Deutschland

Anwendung	Produktion	Bestand	Entsorgung
Hochspannung	<1,5 %	<0,6 %	ReUse: 0,5 %
Mittelspannung	<1,5 %	<0,1 %	Zerstörung: 10 % Außerbetriebnahme: 1,5 %
Andere	2022: 3 %	0,28 %	

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Die Mindestangaben der Faktoren sind dabei der Freiwilligen Selbstverpflichtung entnommen. Die tatsächlichen Emissionsfaktoren liegen im Bereich der Produktionsemissionen seit fast zwanzig Jahren deutlich unter diesen Werten. Im Jahr 2022 lag der Faktor in der Hochspannung (HS) bei 0,29 % und in der Mittelspannung (MS) bei 0,07 %. Auch die Emissionen aus dem Bestand sind in der Hochspannung, wo sie jährlich schwanken, da sie auf Messungen beruhen, niedriger und lagen im Jahr 2022 bei 0,26 %.

Im Vergleich dazu bewegen sich die Default-Faktoren der 2006 IPCC-Guidelines auf deutlich höherem Niveau, wie die folgende Tabelle 9 zeigt.

Tabelle 9: Default-Emissionsfaktoren gemäß den 2006 IPCC-Guidelines

Mittelspannungsanlagen („sealed pressure“)				
Region	Produktion (Hersteller)	Bestand (Einschließlich Leckagen, Ausfällen, Wartungsverlusten) (Anteil pro Jahr an der Nennkapazität aller installierten Anlagen)	Entsorgung (Bruchteil der Nennleistung der entsorgten Anlagen)	
			Lebensdauer (Jahre)	Verbleibende Füllmenge ^a (%)
Europa	0,07	0,002	>35	0,93
Japan	0,29	0,007	Nicht gemeldet	0,95
Hochspannungsanlagen („closed pressure“)				
Europa	0,085 ^b	0,026	>35	0,95
Japan	0,29	0,007	Nicht gemeldet	0,95
U.S.	Kein länderspezifischer Wert	0,14 ^b	>35	In Bestandemissionen enthalten
Gasisolierte Transformatoren, die SF₆ enthalten: Standard-Emissionsfaktoren				
Japan	0,29	0,007	Nicht gemeldet	0,95

Quelle: IPCC Guidelines: Chapter 8, Other Product Manufacture and Use, p. 8.15-8.16 (IPCC 2006)

Anmerkungen:

^a Dies bezieht sich auf den Prozentsatz der ursprünglichen Füllmenge, die am Ende der Lebensdauer im Gerät verbleibt; stellt den Anteil der Nennkapazität dar, der potenziell emittiert wird, bevor das Gerät recycelt oder entsorgt wird.

^b Beinhaltet Emissionen der Installation

Die Differenzen sind durch unterschiedliche Praxen des Gashandlings, der eingesetzten Anlagen sowie der Art der Datenerhebung zu erklären und werden in Kapitel 7.1.5.3 erläutert.

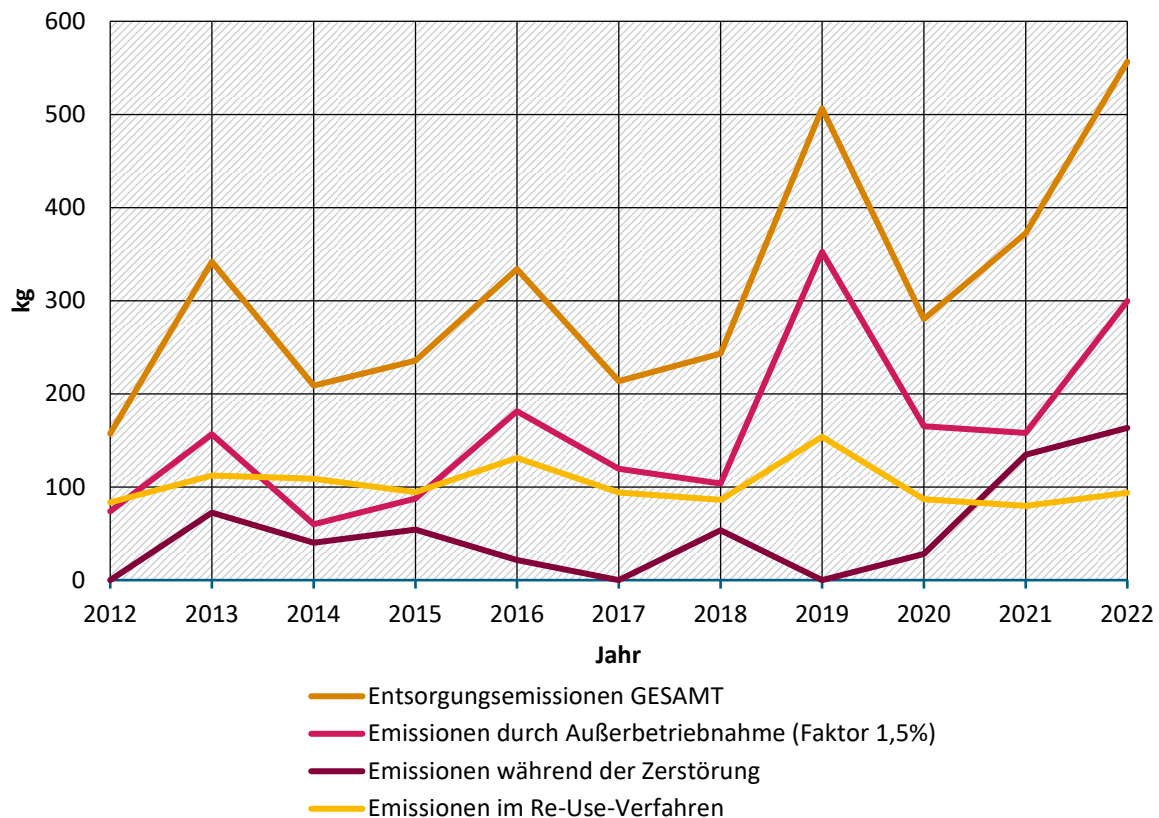
Die Erfassung der Emissionen aus der Entsorgung im Bereich elektrische Betriebsmittel unterscheidet sich in Teilen deutlich von derjenigen aus Kälte- und Klimaanlage. Beschrieben ist diese ausführlich in dem 2007 von Schwarz verfassten Bericht „Effektivere Datenerhebung für das SF₆-Monitoring der Netzbetreiber in der Hochspannung“ (Schwarz 2007, S. 24) sowie der genannten Selbstverpflichtung (VDN, VIK, ZVEI, Solvay 2005). Dabei beschreibt ersterer die Entsorgung wie folgt:

„Wird gebrauchtes SF₆-Gas bei der Außerbetriebnahme dem Betriebsmittel vor Ort entnommen und entspricht es der Norm IEC 60480, so bleibt es Produkt (Gebrauchtes Gas zur Wiederverwendung vor Ort). Entspricht es der „Re-use Spezifikation“ des Gasherstellers nach IEC 62271-303¹, so ist es dem Gas-Hersteller als Produkt zur Wiederverwendung beim Gashersteller zurückzugeben. Hersteller von Betriebsmitteln, bei denen die Gasentnahme nicht vor Ort erfolgt, nehmen das gebrauchte Produkt inklusive SF₆ zur Überprüfung zurück und entnehmen das SF₆ im Regelfall zur Wiederverwendung. Entspricht letzteres der Norm IEC 60480, so kann es beim Hersteller elektrischer Betriebsmittel direkt wiederverwendet werden. Entspricht das Gas der „Re-use Spezifikation“ des Gasherstellers nach IEC 62271-303 so kann es dem Gas-Hersteller als Produkt zurückgegeben werden“ (Schwarz 2007, S. 24).

Es werden also die Gesamtentsorgungsemissionen in der deutschen Inventarerhebung aus dreierlei Emissionen zusammengefasst: diejenigen aus dem „ReUse-process“, der Zerstörung und der Außerbetriebnahme. Die Erfassung dieser wird dabei über die in der Selbstverpflichtung festgeschriebenen Datenlieferung an das BMUV und UBA sichergestellt. Dieses Monitoring umfasst sowohl die Hersteller und Betreiber als auch den Gaseproduzenten Solvay Fluor GmbH.

Die Emissionen aus diesen drei Quellen haben sich in den letzten Jahren wie in Abbildung 1 dargestellt, entwickelt.

¹ Diese Norm wurde mittlerweile zurückgezogen. Auch die Kriterien für das ReUse-Verfahren sind nun in der IEC 60480 abgedeckt.

Abbildung 1: Nach Selbstverpflichtung gemeldete Entsorgungsemissionen von SF₆ aus elektrischen Betriebsmitteln 2012-2022

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Das Monitoring der Selbstverpflichtung erhebt allerdings keine Daten zu wiederaufbereiteten Mengen von SF₆, die nicht durch das ReUse-Verfahren gehen oder zerstört werden. Auch sind Entsorgungsbetriebe nicht Teil des Monitorings, sondern melden Mengen, wenn überhaupt, dann freiwillig. Die Gesamtbilanz weist also Lücken auf, auf die in Kapitel 7.1.5.1 detailliert eingegangen wird.

Die oben genannte Studie (Schwarz 2007) zu potentiellen Entsorgungsemissionen stammt aus der Zeit vor der Implementierung der neuen EU F-Gas-Verordnung 2024/573. Die neue Verordnung hat für die Verwendung von SF₆ in Schaltanlagen umfangreiche Maßnahmen erlassen, die auch erhebliche Konsequenzen für die Rückgewinnung von SF₆ haben werden (siehe 3.2.1.1, Artikel 13). Darüber hinaus gelten die folgenden Verbote für die Inbetriebnahme von elektrischen Schaltanlagen mit F-Gasen:

- ab 2026 für elektrische Mittelspannungsschaltanlagen für die Primär- und Sekundärverteilung bis einschließlich 24 kV;
- ab 2030 für elektrische Mittelspannungs-Schaltanlagen für die Primär- und Sekundärverteilung von mehr als 24 kV bis einschließlich 52 kV;
- ab 2028 für elektrische Hochspannungsschaltanlagen von 52 kV bis einschließlich 145 kV und bis einschließlich 50 kA Kurzschlussstrom für F-gase mit einem Treibhauspotenzial von 1 oder mehr;
- ab 2032 für elektrische Hochspannungsschaltanlagen von mehr als 145 kV oder mehr als 50 kA Kurzschlussstrom für F-Gase mit einem Treibhauspotenzial von 1 oder mehr.

Wie bereits in Abschnitt 3.2.1.1 ausgeführt, gilt außerdem ab 2035 ein Verbot, das die Verwendung von SF₆ für die Wartung oder Instandhaltung von elektrischen Schaltanlagen verbietet, es sei denn, das Gas ist aufgearbeitet oder recycelt. Ausnahmen werden gemacht, wenn aufgearbeitetes oder recyceltes SF₆ aus technischen Gründen nicht verwendet werden kann oder im Falle einer Notreparatur nicht verfügbar ist. Die Begründung für solche Fälle ist der zuständigen Behörde auf Verlangen nachzuweisen. Das Verwendungsverbot gilt nicht für militärische Ausrüstungen.

Da Schaltanlagen allerdings eine Lebensdauer von mindestens 40 Jahren haben, wird die Reduktion der Emissionen von SF₆ erst sehr zeitverzögert einsetzen, da bis zum Zeitpunkt des Verbotes noch Anlagen mit SF₆-Füllung installiert werden können. Die lange Lebensdauer wird aber dazu führen, dass das Verbot des Einsatzes von neuem SF₆ zur Wartung und Installation einen großen Einfluss haben wird, und die Branche sich in hohem Maße dafür einsetzen muss, SF₆ aus Altanlagen zu recyceln. Dies ist insofern von Relevanz, da die in den 1980er-Jahren auf den Markt gekommenen Mittelspannungsanlagen in den nächsten Jahren ihr Lebensende erreichen werden. Daher sind die erarbeiteten Vorschläge in Kapitel 9 umso dringlicher zu betrachten, auch, um eine umfassende Datenerhebung zu gewährleisten. Angemerkt werden muss allerdings, dass ab einem bestimmten Zeitpunkt die SF₆-Menge, die theoretisch zurückgenommen werden kann, diejenige überschreitet, die für die Füllung von Neuanlagen notwendig ist. SF₆ wird dann nur noch zu Servicezwecken eingesetzt, also nur noch in kleineren Mengen gebraucht. Die Rückgewinnung und Entsorgung verursachen damit für Unternehmen ausschließlich Kosten und werden so noch unattraktiver.

Wie genau die Anlagen bzw. das SF₆ recycelt werden können und welche Probleme bestehen, wird im Kapitel 7.1.5.1 aufgezeigt.

6 Problemstellung und Herangehensweise/Methode

Zur Aktualisierung der Rückgewinnungsfaktoren wurden mehrere methodische Ansätze verfolgt. Diese umfassten Literaturrecherchen, Unternehmensbefragungen sowie Fachgespräche. Daneben wurden mehrere Datensätze externer Organisationen im Hinblick auf Rückgewinnungsraten geprüft.

6.1 Literaturlauswertung

Die Literaturlauswertung umfasste neben den Annahmen aus dem deutschen F-Gas-Modell die in der „Emission Factor Database“ (EFDB) des IPCC aufgeführte Literatur (IPCC 2022), vor allem nationale Inventarberichte anderer Länder und eventuelle zusätzliche Hintergrundberichte sowie entsprechende wissenschaftliche Literatur. Daneben wurden gemeldete Daten zu Rückgewinnung, Aufbereitung und Zerstörung von F-Gasen ausgewertet sowie Unternehmens- und Verbandspublikationen zu diversen Aspekten dieses Vorhabens. Es wurde insgesamt festgestellt, dass kaum Fachliteratur nach wissenschaftlichen Standards (peer-reviewed Veröffentlichungen) vorliegen.

6.1.1 Rückgewinnungsraten aus der Literatur

Zunächst wurde eine Übersicht der aktuellen Modellannahmen zu Rückgewinnungsraten und Restfüllständen in Altanlagen erstellt (Tabelle 10). Die Tabelle zeigt zum Vergleich außerdem Werte aus der Literatur.

Tabelle 10: Rückgewinnungsraten und Restfüllstände aus verschiedenen Quellen in Prozent

Rückgewinnungsraten und Restfüllstände in Prozent der Restmenge in Altanlagen	Clodic & Barrault (2011)		Schwarz et al. (2013)	Rückgewinnungsrate (aktuelles Modell)	Restfüllstand (aktuelles Modell)
Jahr	2006	2030	2010	2021	2021
Supermärkte-Zentralanlagen	80	80	75	80	87,5
Verflüssigungssätze	18	60	60	80	85
Hermetische Anlagen in der Gewerbe- und Industriekälte	>1	35	40	60	90
Haushaltskühlgeräte	2,5	70	73,3	73,3	95,5
Speiseeismaschinen	Keine Angabe	Keine Angabe	Keine Angabe	65	95,5
Nahrungsmittelindustrie	79	80	75	80	85
Sonstige Industrieprozesse	74	80	75	80	85
Bewegliche Raumklimageräte	2	30	25	40	75
Single-Split-Raumklimageräte < 5 kW	5	20	40	60	87,5
Single-Split-Raumklimageräte > 5 kW	5	50	40	60	87,5
Rooftop (Multi-Split-Raumklimageräte)	40	50	60	80	87,5

Rückgewinnungsraten und Restfüllstände in Prozent der Restmenge in Altanlagen	Clodic & Barrault (2011)		Schwarz et al. (2013)	Rückgewinnungsrate (aktuelles Modell)	Restfüllstand (aktuelles Modell)
VRF-Raumklimageräte	Keine Angabe	Keine Angabe	Keine Angabe	80	87,5
Chiller (Verdrängungsverdichter)	43	80	75	80	90
Zentrifugal-Chiller	80	80	75	80	90
Wärmepumpen	8	30	50	65	75
Spülmaschinen mit Wärmepumpenfunktion	Keine Angabe	Keine Angabe	Keine Angabe	85	95,5
Mobile Klimaanlage (Pkw und Nfz)	0	40	38	50	34
Mobile Klimaanlage (Bus)	0	40	38	38	34
Mobile Klimaanlage (Landmaschinen)	Keine Angabe	Keine Angabe	11,7	11,7	34
Mobile Klimaanlage (Schiffe)	Keine Angabe	Keine Angabe	Keine Angabe	80	87,5
Mobile Klimaanlage (Schienenfahrzeuge)	40	80	Keine Angabe	80	87,5
Kühlfahrzeuge	50	80	65,7	65,7	87,5
Kühlschiffe/Container	8	40	65,7	65,7	87,5

Das IPCC stellt mit der „Emission Factor Database“ (EFDB) eine Datenbank zu Emissionsfaktoren und weiteren Parametern verschiedener Treibhausgase in den unterschiedlichen Anwendungssektoren bereit (IPCC 2022). Diese enthält auch einige Angaben zu Rückgewinnungsraten von F-Gasen, die in der folgenden Tabelle 11 gelistet sind. Wie man sieht, gibt es nur sehr wenige Quellen, die allesamt auf Schätzungen beruhen.

Tabelle 11: Rückgewinnungsraten von F-Gasen in der „Emission Factor Database“ (EFDB)

Sektor	Rückgewinnungsrate $\eta_{\text{rec,d}}$ (%)	Restfüllmenge p (% der Erstfüllmenge)	Quelle
Tschechien			
Stationäre Kälte und Klimatisierung	55	70	Ondrušová & Krtková (2018)
Transportkälte	55	30	
Mobile Klimatisierung	10	30	
Südkorea			
Mobile Klimatisierung (553 g Füllmenge)	-	51,4	Kim & Kim (2015)

Sektor	Rückgewinnungsrate $\eta_{\text{rec,d}}$ (%)	Restfüllmenge p (% der Erstfüllmenge)	Quelle
Mobile Klimatisierung (673 g Füllmenge)	-	51,2	
Mobile Klimatisierung (680 g Füllmenge)	-	55,2	
Mobile Klimatisierung (833 g Füllmenge)	-	58,4	
Mobile Klimatisierung (689 g Füllmenge)	-	55,6	

Österreich

Kälte und Klima (stationär und mobil)	70	-	UNFCCC (2023b), p. 276-279)
---------------------------------------	----	---	-----------------------------

USA

Stationäre Kälte und Klimatisierung (Kälteanlagen, Flüssigkeitskühlsätze, Verflüssigungssätze und Klimaanlage > 23 kg Füllmenge)	80	-	IPCC (2006, 2022)
Verflüssigungssätze (<23 kg Füllmenge)	66	-	
Freistehende Vitrinen, Verkaufsautomaten, Fenster-Klimaanlagen	0	-	
Klimaanlagen (<23 kg Füllmenge)	44	-	
Kühl- und Gefrierschränke (Heimgebrauch)	23	-	
Klimaanlagen (Heimgebrauch)	20	-	
Transportkälte	85	-	
Kühlcontainer	81	-	
Mobile Klimatisierung (leichte Nutzfahrzeuge)	70	-	
Kühlanhänger, Kühllieferwagen, Kühlcontainer (nicht in Häfen), Eisenbahnwagen	85	-	

Japan und Europa

Elektrische Hochspannungs-Schaltanlagen (SF ₆), Japan und Europa	-	95	IPCC (2006); Chapter 8
Elektrische Mittelspannungs-Schaltanlagen (SF ₆), Japan	-	95	
Elektrische Mittelspannungs-Schaltanlagen (SF ₆), Europa	-	93	

Sektor	Rückgewinnungsrate $\eta_{\text{rec,d}}$ (%)	Restfüllmenge p (% der Erstfüllmenge)	Quelle
Gasisolierte Transformatoren (SF ₆), Japan	-	95	

Für Tschechien sind in Ondrušová & Krtková (2018) sowie Müllerová et al. (2020) die Annahmen zur Rückgewinnungsrate und Restfüllmenge bei Entsorgung von Kälte- und Klimaanlage wie folgt genannt (Tabelle 12).

Tabelle 12: Rückgewinnungsraten für Tschechien

Schätzungen für Tschechien, 2018		Emissionsfaktoren (% der Erstfüllmenge pro Jahr)		Emissionen am Lebensende (%)	
Sektor	Lebenszeit (Jahre)	Initiale Emissionen	Betriebs-emissionen	Rückgewinnungsrate	Restfüllmenge
Gewerbekälte	10,5	3,0	13,0	55	70
Haushaltskälte	13,5	0,5	3,5	55	70
Industriekälte	17,0	3,0	13,0	55	70
Transportkälte	8,5	0,5	20,0	55	30
Stationäre Klimatisierung	13,5	0,5	6,5	55	70

Quelle: Müllerová et al. (2020)

Für Frankreich sind in AFCE & Citepa (2022) die in Tabelle 13 zusammengefassten Informationen und Werte aufgeführt.

Hinsichtlich der erfassten und gemäß nationalem Modell verfügbaren Mengen an rückgewonnenen F-Gasen in Frankreich zeigen sich seit 2017 signifikante Abweichungen zwischen den Daten zur Rückgewinnung von Kältemitteln und Daten zur Aufbereitung, welche im Bericht durch die zunehmende Relevanz von Recycling erklärt werden. Die Gesamtmenge der Rückgewinnung kann nämlich auch Mengen umfassen, die nicht aufbereitet, sondern nach einem einfachen Reinigungsprozess (Recycling) wiederverwendet werden.

In der nachfolgenden Tabelle 13 sind die der Emissionsberichterstattung von Frankreich zu Grunde liegenden Werte für das Jahr 2021 aufgeführt. Alle Werte wurden durch Konsultationen von Industrieunternehmen und Verbänden geschätzt.

Tabelle 13: Rückgewinnungsraten für Frankreich

Schätzungen für Frankreich, 2021		Emissionsfaktoren (% der Erstfüllmenge pro Jahr)		Emissionen am Lebensende (%)
Sektor	Lebenszeit (Jahre)	Initiale Emissionen	Betriebs-emissionen	Rückgewinnungs-rate
Haushaltskälte	15	0,2 Weinkühler: 0,6	0,01	56
Gewerbekälte	15	2	Große Märkte: 30 Supermärkte: 25 Verflüssigungssätze: 13 steckerfertige Geräte: 1	Große Märkte und Supermärkte 94, Verflüssigungssätze 60, steckerfertige Geräte 25
Transportkälte	Reefer: 30 Container: 15 Lastwagen, Anhänger: 10	1	Reefer: 15 Container: 20 Lastwagen, Anhänger: 12-18	Reefer: 40 Container: 50 Lastwagen, Anhänger: 70
Industriekälte	20	1,5	Nahrungsmittel: 10 Warenlager: 15 Chem. Industrie, Pharmaindustrie: 15 Kautschuk: 20	Nahrungsmittel: 95 Warenlager: 90 Chem. Industrie, Pharmaindustrie: 95 Kautschuk: 90
Flüssigkeitskühlsätze (Chiller)	<350 kW: 15 >350 kW: 20 Zentrifugal: 25	1,5	<350 kW: 6 >350 kW: 6 Zentrifugal: 4,5	Volumetrisch: 83 Zentrifugal: 95
Stationäre Klimatisierung	Bewegliche Raumklimageräte: 10 Single-Split, Multi-Split, VRF: 15 Rooftop: 20 Wärmepumpen (reversibel): 15	Vor-Ort-Installation: 2,5 Fabrikfertigung: 1,5	Single-Split: 6 Multi-Split, VRF: 7 Wärmepumpen: 4-7	Raumklimageräte: 50 Kleingewerbe: 70 VRF, Rooftop, Multi-Split: 85 Wärmepumpen: 45
Mobilklima	Pkw, Nutzfahrzeuge: 12 Busse, Schienenfahrzeuge: 15	Pkw, Nutzfahrzeuge: 0,23 Busse: 0,13 Schienenfahrzeuge: 1,5	Pkw, Nutzfahrzeuge: 9 Busse: 12,5 Schienenfahrzeuge: 6	Pkw: 54 Nutzfahrzeuge: 8 Busse: 8 Schienenfahrzeuge: 88

Quelle: AFCE & Citepa (2022)

Im Juli 2024 erschien eine Publikation des Internationalen Kälteinstituts (Institut International du Froid/International Institute of Refrigeration; IIF/IIR), die nicht länderspezifische Angaben zu Emissionsraten am Ende der Betriebsdauer von verschiedenen Klimaanlageentypen umfasst

(Tabelle 12), welche weiterhin zur Modellierung von weltweiten Emissionen genutzt werden (Dupont & Qudart 2024).

Tabelle 12: Leckageraten am Lebensende von verschiedenen Anlagentypen in der stationären Klimatisierung (%)

Gerätetypen	Leckagerate am Lebensende (%)
Fenster	25
Single-Split-Anlage	25
Multi-Split- Anlage	25
Packaged-System	25
VRF-Anlage	25
Flüssigkeitskühlsätze (Chiller)	15

Quelle: Dupont & Qudart (2024)

Insgesamt ist festzustellen, dass grundsätzlich kaum empirische Daten zur Absicherung der Werte für Rückgewinnung und Emissionen am Ende der Lebensdauer von Anlagen herangezogen werden, wahrscheinlich da solche Werte nirgendwo flächendeckend vorliegen. Die Angaben beruhen zumeist auf Expertenschätzungen, die nicht näher ausgeführt werden. Für verschiedene Anwendungen variieren die Literaturwerte deutlich, erreichen aber in verschiedenen europäischen Ländern ähnliche Größenordnungen, etwa in Österreich und Frankreich.

6.1.2 Gemeldete Daten zu Rückgewinnung, Aufbereitung und Zerstörung von F-Gasen

Neben dieser Literatur zur Emissionsberichterstattung wurden Datenauswertungen zu Rückgewinnung, Aufbereitung, Recycling und Zerstörung auf Basis bestehender Meldepflichten betrachtet.

Wie oben ausgeführt, unterliegen Unternehmen im Zusammenhang mit der EU F-Gas-Verordnung und der EU-Ozonschicht-Verordnung einer Reihe von Meldepflichten. Die Europäische Umweltagentur (European Environment Agency; EEA) wertet die abgelieferten Daten jährlich für die EU-Kommission aus.

Die letzte Veröffentlichung zu F-Gasen (Ludig et al. 2023) beschreibt, dass aufbereitete Mengen an F-Gasen in der EU im Jahr 2022 im Vergleich zum Vorjahr um 8 % abnahmen. Unterschiedliche Trends zeigten sich bei der Wiederaufbereitung: Die aufbereiteten HFKW-Mengen waren um 12 % geringer als 2021, die SF₆-Mengen stiegen um 14 % an und die Mengen ungesättigter HFKW und HFCKW verdoppelten sich auf niedrigem Niveau. Werden die aufbereiteten HFKW-Mengen zu den für den EU-Markt zur Verfügung stehenden HFKW-Mengen an Neuware (aus Produktion und Import) dazugerechnet, so stellten die aufbereiteten Mengen 2022 etwa 2 % (bzw. 2 % in CO₂-Äquivalenten) der Gesamtmenge dar. Die aufbereiteten SF₆-Mengen machen 36 % der Gesamtmengen an F-Gasen aus (in CO₂-Äquivalenten).

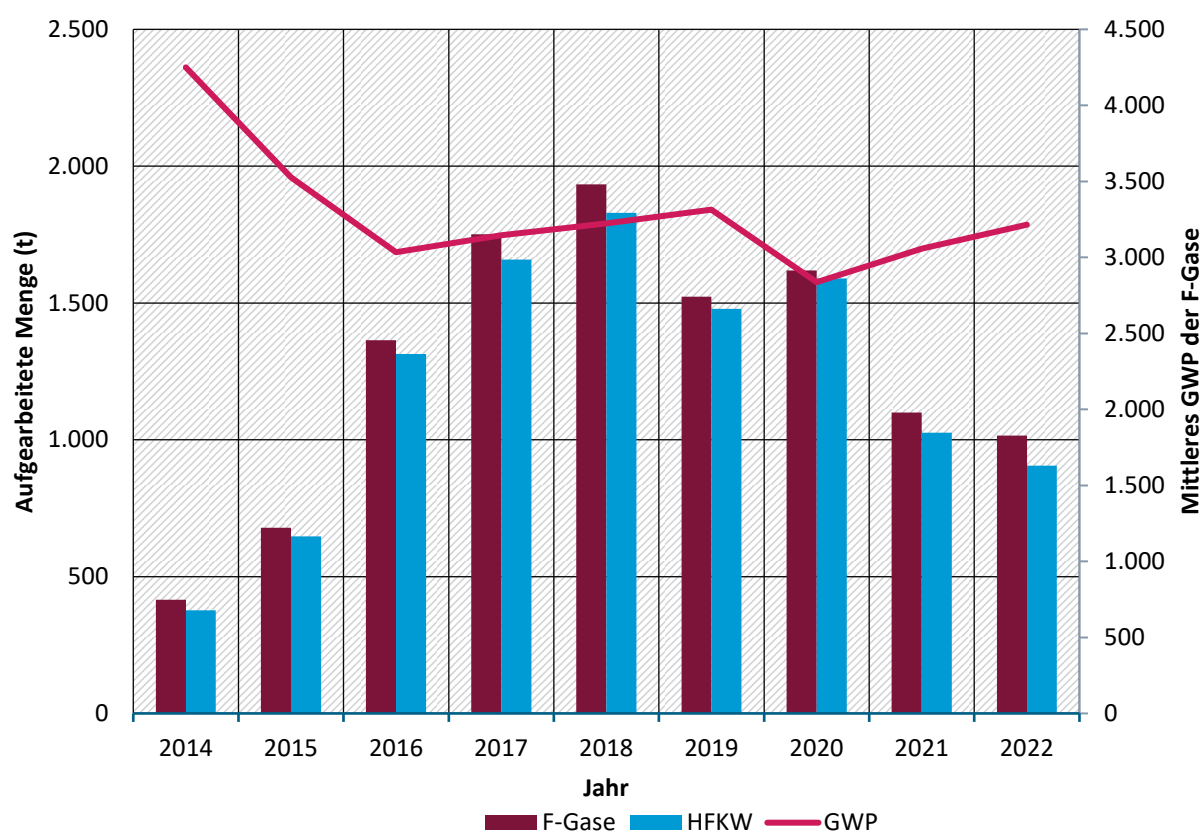
Die Daten der EEA auf Basis der Berichtspflichten für Unternehmen gemäß Artikel 19 der EU-F-Gas-Verordnung 517/2014 sind jedoch offenbar kritisch zu betrachten und liefern nur lückenhafte Informationen: Die Evaluierung der EU F-Gas-Verordnung 517/2014, welche eine detaillierte Analyse der bestehenden Regelungen beinhaltet (Birchby et al. 2022), stellte in diesem Zusammenhang inkonsistente Daten fest: Obwohl sich die Menge der aufgearbeiteten

HFKW laut der jährlich berichteten Daten im Zeitraum 2014 bis 2018 von 377 auf 1.829 Tonnen fast vervierfacht hatte, waren die Mengen in den folgenden Jahren, mit Ausnahme von 2020, wieder stark zurückgegangen (Abbildung 2). Das traf auf F-Gase insgesamt, aber auch auf HFKW im Speziellen zu. Im Jahr 2021 war die aufgearbeitete Menge der HFKW mit 1.026 Tonnen wieder unter der vom Jahr 2016 mit 1.314 Tonnen. Im Jahr 2022 ging die Menge noch einmal auf 905 Tonnen zurück.

Dies wurde in der Evaluierung unter anderem auf das Fehlen umfassender Daten zu recycelten und aufgearbeiteten F-Gas-Mengen zurückgeführt, da in der alten Fassung der F-Gas-Verordnung 517/2014 die Berichtspflichten für Recycling und Wiederaufbereitung nur auf Unternehmen zutrafen, die gleichzeitig auch Importeure, Exporteure oder Produzenten von F-Gasen waren. Einrichtungen, die hingegen nur Recycling und/oder die Aufarbeitung von F-Gasen durchführen, waren von der Berichtspflicht ausgenommen (Birchby et al. 2022). In der neuen Verordnung wurden die Berichtspflichten erweitert (siehe Kapitel 3.2.1.1.9); es sind nun alle Unternehmen, die Recycling und Aufarbeitung von F-Gasen betreiben, berichtspflichtig. Dies wird jedoch erst 2025 oder 2026 zu vollständigen Datensätzen führen.

Die Zerstörung von F-Gasen betraf hauptsächlich HFKW, wobei die Mengen im Jahr 2022 um etwa 5 % anstiegen (Ludig et al. 2023). Andere F-Gase machten nur einen Anteil von rund 4 % der zerstörten Mengen aus.

Abbildung 2: Aufarbeitung von fluorierten Treibhausgasen und HFKW sowie durchschnittliches GWP der aufgearbeiteten Gase aus der EU F-Gas-Berichterstattung



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Daten in Ludig et al. (2023)

6.2 Befragungen und Daten von Unternehmen

6.2.1 Stationäre Kälte-Klima- und Wärmepumpenanwendungen, mobile Klimatisierung

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden in telefonischen Interviews von etwa 15 Unternehmen Mengenangaben sowie Informationen zur Entsorgungspraxis in Deutschland abgefragt. Die Unternehmen umfassten Kälte-Klima-Fachgroßhandel, Servicefirmen, Kfz-Werkstätten, Kühlschrankrecyclingunternehmen, Gasehandel und Entsorgungsfachbetriebe. Daneben wurden während und im Nachgang des Workshops „Rückgewinnung, Wiederaufbereitung und Entsorgung von Kältemitteln“ im Juni 2023 weitere qualitative Informationen gesammelt und integriert (siehe Abschnitt 6.5).

6.2.2 SF₆ in elektrischen Betriebsmitteln

Mehrere Hersteller von elektrischen Schaltanlagen, Netzbetreiber und Entsorgungsfachfirmen für Schaltanlagen wurden schriftlich und telefonisch um Auskünfte gebeten. Weiterhin wurden während und im Nachgang des im Mai 2024 stattgefundenen Online-Workshops “SF₆ in elektrischen Betriebsmitteln” für Unternehmen im Bereich der elektrischen Betriebsmittel Informationen gesammelt und integriert (siehe Abschnitt 6.5).

6.3 Datensatz des VDKF

Der „Verband Deutscher Kälte-Klima-Fachbetriebe e.V.“ (VDKF) betreibt unter dem Namen „VDKF-LEC“ eine Datenbank, in welcher Anlagenbetreibende Informationen zu ihren Kälte- und Klimaanlageanlagen und -geräten freiwillig zur Verfügung stellen. Durch die Bereitstellung dieser Daten werden die von der deutschen Chemikalien-Klimaschutzverordnung (ChemKlimaschutzV) sowie der europäischen F-Gas-Verordnung (EU Nr. 517/2014) auferlegten Berichts-, Überwachungs- und Aufzeichnungspflichten erfüllt.

Für eine Auswertung rückgewonnener Kältemittelmengen aus stillgelegten Kälte- und Klimaanlageanlagen wurde ein Datensatz-Auszug aus der VDKF-LEC Datenbank erworben (VDKF 2023). Dieser Datensatz enthielt gerätespezifische Informationen zu (1) Kältemitteltyp, (2) Erstfüllmenge, also der Gesamtfüllmenge gemäß des Typenschildes, (3) Menge des rückgewonnenen Kältemittels der entsorgten Geräte, (4) Verbleib des rückgewonnenen Kältemittels, (5) Sektor und teilweise Teilsektor, in dem das Gerät genutzt wurde und in den meisten Fällen (6) geschätztes Alter des Geräts. Die Analyse des Datensatzes erfolgte mit zwei Zielen:

1. Die Gewinnung von Informationen über die rückgewonnenen Mengen fluorierter Kältemittel von außer Betrieb genommenen Kälte- und Klimaanlageanlagen und -geräten in Deutschland sowie die Zielorte der Kältemittel, z. B. Recycling, Aufarbeitung und Entsorgung.
2. Die Ableitung von Durchschnittswerten für sektor- und kältemittelspezifische Informationen über außer Betrieb genommene Kälte- und Klimaanlageanlagen und -geräte, d.h. Kältemittelfüllmengen und Rückgewinnungsraten zum Zeitpunkt der Außerbetriebnahme.

Die Rückgewinnungsrate ist in diesem Fall definiert als:

$$\frac{\text{Rückgewonnene Kältemittelmenge am Lebensende der Anlage}}{\text{Erstfüllmenge der Anlage}}$$

Ausgedrückt in der Formelbezeichnung aus Kapitel 5.1, ergibt sich eine Rückgewinnungsrate von

$$H_{rec,d} = \frac{R_{Lebensende,t}}{M_{t-d}}$$

mit $R_{Lebensende,t}$ als der rückgewonnenen Kältemittelmenge in Tonnen zum Zeitpunkt der Außerbetriebnahme und M_{t-d} als der Erstfüllmenge der Anlage in Tonnen.

Betrachtet man die Rückgewinnungsrate $\eta_{rec,d}$ aus Kapitel 5.1, so ist diese definiert als das Verhältnis von rückgewonnenem zu enthaltenem Kältemittel bei Außerbetriebnahme der Anlage. Als Formel ausgedrückt ergibt sich:

$$\eta_{rec,d} = \frac{R_{Lebensende,t}}{M_{t-d} \cdot \frac{p}{100}}$$

Wie man sieht, bezieht sich $H_{rec,d}$ auf die Erstfüllmenge, $\eta_{rec,d}$ dagegen auf die Restfüllmenge. Im deutschen F-Gas Modell wird $\eta_{rec,d}$ verwendet, kann jedoch mittels der VDKF-LEC Daten nicht berechnet werden. Ein direkter Vergleich der Rückgewinnungsraten ist somit nicht möglich und die Rückgewinnungsraten aus dem VDKF-LEC Datensatz können nur eingeschränkt für die Anpassung des deutschen F-Gas Modells verwendet werden.

Um die Repräsentativität der Daten zu gewährleisten, wurde für die in Punkt 2 genannte Ableitung der Durchschnittswerte die Anzahl der in der Datenbank erfassten Geräte für jedes Kältemittel innerhalb der unterschiedlichen Sektoren und Subsektoren über alle Jahre von 2017 bis 2021 summiert. Für jede Gerätetypgruppe (Kältemittel innerhalb des Teilsektors innerhalb des Sektors) mit einer Summe unter 25 wurden die jeweiligen Geräte aus dem endgültigen Datensatz entfernt. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass über die verfügbaren fünf Jahre (2017 bis 2021) je Sektor bzw. Teilsektor und Kältemittel im Mittel fünf Geräte vertreten waren.

Für die Berechnung der mittleren Betriebsjahre wurde der Datensatz weiter gefiltert nach Anlagen, für die Betriebsdauern verfügbar waren, wobei wieder sichergestellt wurde, dass für alle Gerätetypgruppen jeweils mindestens 25 Anlagen vertreten waren.

Entsprechend ergaben sich drei Datensätze: ein Datensatz zur Berechnung der rückgewonnenen Gesamtmengen, ein Datensatz für die Berechnung der mittleren Rückgewinnungsraten und ein Datensatz für die Berechnung mittlerer Betriebsdauern.

Die zurückgewonnene Kältemittelmenge in der VDKF-LEC Datenbank entspricht der UNFCCC „Common Reporting Format“ (CRF) Tabellenkategorie „Remaining in products at de-commissioning“ abzüglich „Emissions from disposal“ in Tabelle 2(II)B-Hs2 für Deutschland (UNFCCC 2023a). Bei den zurückgewonnenen Mengen in der Datenbank handelt es sich um die Menge an Kältemittel, die bei der Entsorgung aus der Anlage abgesaugt wurde, sodass die Emissionen während des Absaugevorgangs nicht aufgeführt und bereits von der zurückgewonnenen Menge abgezogen sind. Durch den Vergleich der VDKF-LEC und der UNFCCC-Daten wurde die Repräsentativität der VDKF-LEC-Datenbank bewertet.

Nicht-parametrische 95 %-Bootstrap-Konfidenzintervalle für Mittelwerte basierend auf jeweils 1.000 Resamplings wurden in R (R Core Team 2023) mit dem Paket „Hmisc“ (Harrell 2023) berechnet.

Eine Auswertung des VDKF-LEC Datensatzes mit dem Fokus auf F-Gase in der Emissionsberichterstattung unter der Klimarahmenkonvention (UNFCCC) wurde bereits in einer Fachzeitschrift veröffentlicht (Behringer et al. 2024).

6.4 Datensatz aus Polen

Das „Łukasiewicz Industrial Chemistry Institute“ in Polen betreibt eine Datenbank mit dem Namen „Central Registry of Operators“ (CRO), in die Betreiber von RACHP Equipment (Refrigeration, air conditioning and heat pumps; Kältetechnik, Klimatisierung und Wärmepumpen) berichten (CRO 2023). Grundlage für diese verpflichtende Berichterstattung ist die nationale Gesetzgebung, so dass die Daten als umfassend und repräsentativ angesehen werden können. Teil dieser Datenbank sind Informationen zu rückgewonnenen Mengen von F-Gasen aus stillgelegten Anlagen. Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde ein Auszug dieser Datenbank für die Jahre 2020 bis 2022 erworben und ausgewertet.

6.5 Fachgespräche und Workshops

Im Rahmen des Projektes wurden zwei Workshops durchgeführt, um die Zwischenergebnisse mit ausgewählten Fachleuten zur Diskussion zu stellen.

Am 22. Mai 2023 wurde ein halbtägiger Online-Workshop zum Thema „SF₆ in elektrischen Betriebsmitteln“ abgehalten, zu dem 28 externe Teilnehmende von Verbänden, Netzbetreibern und Anlagenherstellern begrüßt werden konnten. Die wichtigsten Diskussionspunkte betrafen die Freiwillige Selbstverpflichtung, Praktiken zur Entsorgung und Rückgewinnung von SF₆ sowie mögliche Regelungen der überarbeiteten EU F-Gas-Verordnung.

Am 22. Juni 2023 erfolgte ein halbtägiger Präsenzworkshop zum Thema „Entsorgung von Kälte- und Klimaanlageanlagen“ in den Räumen des BMUV in Bonn mit 40 Personen aus Industrie, Verbänden (VDKF, BWP) und Gasehandel. Inhaltliche Schwerpunkte betrafen die Entsorgungsmengen in Deutschland, regulatorische Aspekte des Abfallrechts, den Vollzug sowie die technischen Möglichkeiten der Wiederaufbereitung.

7 Datenauswertung

7.1 Entsorgungspraxis in Deutschland

7.1.1 Kältemittel aus Kühlgeräten

Kühlgeräte sind vorwiegend der Unterquellgruppe der Haushaltskälte (2.F.1.b) zugeordnet. Diese stellen den kleinsten Posten im Bereich der stationären Kälteanlagen dar und beinhalten Haushaltskühl- und -gefrierschränke und Speiseeismaschinen. In neuen Haushaltskühl- und -gefrierschränken werden allerdings seit 2015 ausschließlich Kohlenwasserstoffe (R-600a) eingesetzt, so dass nur noch geringe F-Gas-Emissionen, entweder aus der Nutzung von alten Geräten oder der Entsorgung, auftreten. Die nachfolgende Tabelle 14 stellt die Parameter des deutschen Modells für diese Anwendungen dar.

Tabelle 14: Parameter des deutschen Modells zur Berechnung von Entsorgungsemissionen in der Haushaltskälte und Kältemittel im Bestand

Haushaltskälte	Lebensdauer (Jahre)	Restfüllstand	Rückgewinnungsraten	Kältemittel
Haushaltskühlgeräte	15	95,5 %	73,3 %	R-600a
Speiseeismaschinen	15	95,5 %	2010: 50 %; 2020: 65 %	R-134a, R-404A, R-600a

Quelle: Warncke & Gschrey (2024)

In Bezug auf den Restfüllstand geht das deutsche Modell von deutlich höheren Restfüllständen aus als die IPCC-Guidelines, welche lediglich bei maximal 80 % liegen, die Rückgewinnungsraten sind sehr nah an den Werten des IPCC, welche dort bei maximal 70 % liegen (s. Tabelle 5).

Haushaltskühlgeräte wurden im Zuge der letzten Überarbeitung des Inventars nicht begutachtet, denn es werden keine HFKW mehr genutzt. Die Speiseeismaschinen hingegen finden sich erst seit 2017 im deutschen Inventar. Auch hier geht der Trend allerdings zum natürlichen Kältemittel R-600a, hat aber erst vor wenigen Jahren eingesetzt, weswegen noch länger mit der Nutzung (und dementsprechend Entsorgung) von HFKW zu rechnen ist. Die Annahmen zum Bereich der Speiseeismaschinen sind zwar noch recht neu, werden aber dennoch überprüft, vor allem in Bezug auf die Rückgewinnungsraten.

Die Entsorgung von Kühlgeräten aus Haushalten und Kleingewerbe wird in Deutschland gemäß Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG; siehe Kapitel 3.3.6) durch die Sammellogistik des Handels sowie kommunale Sammelstellen abgedeckt. Die gesammelten Geräte werden in Erstbehandlungsbetrieben begutachtet und von Flüssigkeiten entfrachtet.

Für korrekt entsorgte Kühlgeräte in spezialisierten Anlagen ist daher von hohen Rückgewinnungsraten auszugehen. Eine kürzlich erschienene Studie der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) stellt für die Jahre 2019-2021 erreichte Rückgewinnungsquoten von 89-95 % fest, wobei die Werte auf Basis von Angaben von dreizehn Recyclinganlagen errechnet wurden (LAGA 2023). Zu ausgedienten Kühlgeräten, die nicht an den Handel oder die kommunalen Sammelstellen zurückgegeben werden, liegen keine Informationen zu Rückgewinnungsraten vor.

7.1.2 Kältemittel aus größeren stationären Anlagen

Größere stationäre Kälte- und Klimaanlage sind in folgenden Unterquellgruppen im Inventar zu finden:

- a) 2.F.1.a Gewerbekälte (steckerfertige Geräte, Verflüssigungssätze und Zentralanlagen);
- b) 2.F.1.c Industriekälte (steckerfertige Geräte, Kälteanlagen der Nahrungsmittelindustrie und sonstigen Industrie, Kühlhäuser, Eisbahnen, Kranklimatisierung, Hochtemperatur-Wärmepumpen und Tieftemperaturkühlung in der Kunststoffindustrie);
- c) 2.F.1.f stationäre Klimaanlage (Raumklimageräte, Kaltwassersätze zur Gebäudeklimatisierung und industriellen Flüssigkeitskühlung, Wärmepumpenanlagen, Wärmepumpen-Wäschetrockner und gewerbliche Spülmaschinen mit Wärmepumpenfunktion).

7.1.2.1 Gewerbekälte (2.F.1.a)

Im Bereich der stationären Kältetechnik gibt es zwei große Sektoren, nämlich die Gewerbekälte (ca. 70 % Anteil an den klimawirksamen Emissionen dieses Bereichs) sowie die Industriekälte (ca. 29 %).

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

Tabelle 15 zeigt die bisher verwendeten Parameter in den Untersektoren der Gewerbekälte.

Tabelle 15: Parameter des deutschen Modells zur Berechnung von Entstehungsemissionen in der Gewerbekälte und Kältemittel im Bestand

Gewerbekälte	Lebensdauer	Restfüllstand	Rückgewinnungsraten	Kältemittel
<i>Zentralanlagen:</i>				
Supermärkte	14	87,5 %	2010: 75 %	R-404A, R-134a,
Discounters	10		2020: 80,5 %	R-410A, R-449, R-448, R-744, R-290
Verflüssigungssätze	12	85 %	2010: 60 % 2020: 80 %	R-404A, R-407C, R-134a, R-513A, R-452A, R-449A, R-455A, R-454C, R-1234ze, R-290, R-744
Steckerfertige Geräte	10	90 %	2010: 40 % 2020: 60 %	R-404A, R-407C, R-134a, R-455A, R-454C, R-290

Quelle: Warncke & Gschrey (2024)

Der Rückbau vor Ort von größeren Kälte- und Klimaanlage, sowie damit verbunden, die Rückgewinnung des Kältemittels, erfolgen in Deutschland durch zertifizierte Serviceunternehmen. Diese Serviceunternehmen werden in der Regel von den Anlagenbetreibern beauftragt, das gebrauchte Kältemittel zur Wiederaufbereitung oder Zerstörung an den Kältemittelhandel weiterzugeben. Außerdem werden Kältemittel in Sonderabfallverbrennungen entsorgt (s. Kapitel 4).

Es ergeben sich, und dies gilt für alle Bereiche der stationären Kälte, mehrere Möglichkeiten, die Daten zur Entsorgung zu gewinnen: Zum einen sind die Betreiber der Anlagen verpflichtet, Logbücher der Anlagen zu führen. In diesen ist neben den im Rahmen der Dichtheitsprüfungen festgestellten spezifischen Kältemittelverlusten (in Kilogramm und als jährliche Rate) auch die Rückgewinnung, Aufarbeitung und Entsorgung des Kältemittels anzugeben. Diese Daten müssen Anlagenbetreiber grundsätzlich nur den zuständigen Kontrollbehörden vorlegen. Firmenintern sind diese Angaben vor allem bei größeren Unternehmen meist digital verfügbar als Teil eines Anlageninventars.

Prinzipiell kann die Anlagendokumentation im Hinblick auf Kältemittel-Rückgewinnung ausgewertet werden. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde ein entsprechender elektronischer Datensatz des VDKF untersucht (siehe 7.2).

7.1.2.2 Industriekälte (2.F.1.c)

Die Industriekälte umfasst auf der einen Seite die Kühlung in der Lebensmittelproduktion, worunter unter anderem Kühlhäuser, Molkereien sowie Bier- und Weinproduktion fallen. Auf der anderen Seite sind in diesem Sektor auch Kühlprozesse in industriellen Bereichen wie der Chemieindustrie enthalten. Es werden sowohl steckerfertige Geräte, als auch die Bereitstellung von Kälte für Eisbahnen, Kranklimatisierung, Hochtemperaturwärmepumpen und Tieftemperaturkühlung in der Kunststoffindustrie erfasst.

Tabelle 16: Parameter des deutschen Modells zur Berechnung von Entsorgungsemissionen in der Industriekälte und Kältemittel im Bestand

Industriekälte	Lebensdauer (Jahre)	Restfüllstand	Rückgewinnungsraten	Kältemittel
Nahrungsmittel-industrie	20-30	85 %	2010: 75 % 2020: 80 %	R-404A R-407C
Sonstige Industrie	30	85 %	2010: 75 % 2020: 80 %	R-422D R-134a R-134a
Steckerfertige Geräte	10	90 %	2010: 40 % 2020: 60 %	R-227ea R-23 NH ₃
Kranklima	10	90 %	2010: 75 % 2020: 80 %	
Kunststoff- und Pharmaindustrie	10	85 %	2010: 75 % 2020: 80 %	
Tieftemperatur-anwendungen	10	85 %	2010: 75 % 2020: 80 %	

Quelle: Warncke & Gschrey (2024)

Die IPCC-Guidelines gehen im Sektor Industriekälte sogar über die Annahmen im deutschen Modell hinaus und nehmen eine Rückgewinnungsrate von bis zu 90 % an (s. Tabelle 5). Generell kann aber, bis auf die steckerfertigen Geräte, in diesem Sektor tatsächlich von einer allgemein höheren Rate ausgegangen werden, da sich keine der Anlagen in Privathaushalten befindet und eine Entsorgung über geregelte Prozesse eher sichergestellt ist.

Auch der Bereich der Industriekälte wurde im Zuge der letzten Modellüberarbeitung umfassend angepasst (Schwarz et al. 2013). Der Kältemittelbestand ist seitdem nicht mehr statisch, sondern

bis auf Ausnahmen über öffentlich zugängliche Warenstatistiken aktualisierbar. Im Gegensatz zu anderen Sektoren ist die Berechnungsbasis dabei nicht die Stückzahl an Anlagen, sondern die Produktionsmenge von Gütern. Über entsprechende Parameter zur erforderlichen Bereitstellung von Kälte, der installierten Kälteleistung, werden die einzelnen Kältemittelmengen für diese Leistungen ermittelt. Dieser Ansatz wurde von Barrault et al. (2010) für die französische Inventarerhebung entwickelt und in das deutsche Modell übernommen.

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

Zum Sektor 2.F.1.f werden Raumklimageräte, Kaltwassersätze zur Gebäudeklimatisierung und industriellen Flüssigkeitskühlung, Wärmepumpenanlagen, Wärmepumpen-Wäschetrockner und gewerbliche Spülmaschinen mit Wärmepumpenfunktion gezählt.

In allen europäischen Ländern wird der Raumklimatisierung ein langfristiges Wachstum bis 2030 vorausgesagt. Der Kältemittelbestand der insgesamt in Deutschland in Betrieb befindlichen beweglichen Raumklimageräte und einfachen Single-Split- und Multi-Split-Geräte war 2020 fast dreimal so hoch wie 2004 (2.694 t/962 t). Große Klimaanlage im Leistungsbereich von oberhalb ca. 20 kW Kälteleistung werden in der Regel als Flüssigkeitskühlsatz (Chiller) ausgelegt. Dieser Markt (Stückzahlen) ist in Deutschland recht stabil.

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

Die Eigenschaften von Wärmepumpen werden weiterhin in Wäschetrocknern und gewerblichen Spülmaschinen eingesetzt.

Die IPCC-Guidelines unterscheiden für diesen Sektor die Bereiche Chiller auf der einen Seite und Klimaanlage inklusive Wärmepumpen auf der anderen Seite. Für Chiller haben sowohl Restfüllstand als auch Rückgewinnungsrate recht hohe maximale Werte (s. Tabelle 5). Zwar beginnt die Spanne für die Rückgewinnungsrate bei 0 %, hat aber einen maximalen Wert von 95 %. Für den Restfüllstand werden 80-100 % angegeben. Grund hierfür ist, wie auch im Bereich der Industriekälte, dass Chiller in seltenen Fällen von Privatpersonen erworben und betrieben werden und daher eine Entsorgung in den meisten Regionen dieser Welt meist sichergestellt ist. Dies ist auch der Grund, warum die Spanne im Bereich Klimaanlage und Wärmepumpen sogar für den Restfüllstand bis Null geht. Denn Klimaanlage finden sich auch häufig in Privathaushalten und werden nicht immer ordnungsgemäß gewartet und ebenso wenig entsorgt.

Tabelle 17: Parameter des deutschen Modells zur Berechnung von Entsorgungsemissionen in der stationären Klimatisierung und Kältemittel im Bestand

Stationäre Klimaanlage	Lebensdauer (Jahre)	Restfüllstand	Rückgewinnungs-raten	Kältemittel
Raumklimageräte	Beweglich, Single-Split: 10 Multi-Split, VRF: 13	Beweglich: 75 % Single-Split, Multi-Split, VRF: 87,5 %	Beweglich 2010: 25 % 2020: 60 % Single-Split 2010: 40 % 2020: 60 % Multi-Split, VRF 2010: 60 % 2020: 80 %	R-410A, R-407C, R-32
Chiller	<100 kW, >100 kW: 15 Turbo-verdichter: 25	90 %	2010: 75 % 2020: 80 %	R-134a, R-410A, R-407C
Wärmepumpen	15	75 %	2010: 50 % 2020: 65 %	R-134a, R-410A, R-407C, R-404A, R-744
Wärmepumpen- Wäschetrockner	15	95 %	2010: 50 % 2020: 65 %	R-134a, R-407C, R-290
Spülmaschinen mit WP-Funktion	12	95 %	2010: 71 % 2020: 85 %	R-134a, R-513A

Quelle: Warncke & Gschrey (2024)

Im Zuge der letzten großen Überarbeitung des deutschen Modells im Jahr 2013 (Schwarz et al. 2013) wurden, wie auch im Bereich der Gewerbekälte, die dort beschriebenen Änderungen zum Restfüllstand und der Rückgewinnungsrate überhaupt erst eingeführt.

7.1.3 Kältemittel aus Transportkälteanlagen (2.F.1.d)

Im Sektor der Transportkälte werden die Emissionen von Kälteanlagen aus Kühlfahrzeugen und Kühlcontainern erfasst.

Tabelle 18: Parameter des deutschen Modells zur Berechnung von Entsorgungsemissionen in der Transportkälte und Kältemittel im Bestand

Transportkälte	Lebensdauer (Jahre)	Restfüllstand	Rückgewinnungsraten	Kältemittel
Kühlfahrzeuge	10	87,5 %	65,7 %	R-404A, R-134a, R-410A, R-452A
Kühlcontainer	14	87,5 %	65,7 %	R-134a, R-404A, R-513A, R-452A

Quelle: Warncke & Gschrey (2024)

Im Falle der Transportkälte geben die IPCC-Guidelines (s. Tabelle 5) einen deutlichen geringeren Wert für den maximalen Restfüllstand an, als das deutsche Modell, nämlich zwischen 0 und 50% der Erstfüllmenge. Auch die Lebensdauer wird mit 6 bis 9 Jahren geringer eingeschätzt als im deutschen Modell. Wie auch im Bereich der mobilen Klimaanlage sind diese Werte allerdings mit großer Unsicherheit behaftet. Im Bereich der Kühlfahrzeuge deshalb, da ein vermutlich sehr hoher, aber nicht quantifizierter Anteil der Altfahrzeug-Entsorgung im Ausland stattfindet. Im Bereich der Kühlcontainer ist die Zuordnung der Emissionen generell eine theoretische, da sich die Container meist auf den Weltmeeren befinden und die Emissionen Deutschland über einen geschätzten Anteil von 10 % des Weltbestandes zugerechnet werden. Aber auch hier ist der Verbleib der Container nicht gut nachvollziehbar.

Für den Bereich Kühlfahrzeuge ist es daher besonders wichtig, eine Aktualisierung der Annahmen vorzunehmen und die o.g. Probleme der Entsorgung über schlüssige Modellannahmen zu lösen.

Im Bereich der Kühlcontainer ist eine intensive Recherche nicht zielführend, da allein die Zurechnung von Containern zu einem Land sich als schwierig erweist. Zudem fand in den letzten Jahren eine Inventarverbesserung dieses Sektors statt, in welchem die bisherigen Annahmen überprüft bzw. angepasst wurden (Warncke & Gschrey 2021, 2024). Die Annahmen, welche in Tabelle 18 aufgeführt sind, haben demnach weiterhin Bestand.

7.1.4 Kältemittel aus mobilen Klimaanlage (2.F.1.e)

Zur mobilen Klimatisierung zählen Fahrzeugklimaanlagen in Personenkraftwagen (Pkw), Nutzfahrzeugen (Nfz), Bussen, Landmaschinen, Schienenfahrzeugen, Schiffen, Flugzeugen und Hubschraubern.

Die Emissionen von HFKW aus mobilen Klimaanlage werden zu fast 70 % durch Pkw verursacht. Die HFKW-134a-Emissionen aus dem Pkw-Kältemittelbestand sanken 2020 auf 1.829 t, eine erneut sehr deutliche Reduktion (2018: 2.097 t). Der Emissionsverlauf wird weiter von der Einhaltung der EU-Richtlinie 2006/40/EG (MAC-Richtlinie) über den Ausstieg von HFKW-134a aus Autoklimaanlagen bestimmt. Seit 2017 dürfen neue Pkw für die EU nicht mehr mit Kältemitteln mit einem Treibhauspotenzial über 150, und damit auch nicht mehr mit R-134a klimatisiert werden. Die deutsche Autoindustrie hatte sich nach jahrelanger Befürwortung von CO₂ (R-744) als alternativem Kältemittel 2011 zunächst für den Einsatz des neu entwickelten, ungesättigten uHFKW-1234yf entschieden. Das Treibhauspotenzial (GWP) von uHFKW-1234yf wird laut EU F-Gas-Verordnung 2024/573 mit 0,5 angegeben und liegt damit deutlich unter den erlaubten 150 der MAC-Richtlinie.

Bei anderen mobilen Klimaanlage (Busse, Nutzfahrzeuge der Gewichtsklassen N3, N2 und teilweise N1, Landmaschinen, Schiffe, Schienenfahrzeuge, mittelgroße Flugzeuge und Hubschrauber) ist ein Ausstieg aus HFKW-134a bisher gesetzlich nicht vorgeschrieben, wird aber durch den HFKW-Phase-down der EU F-Gas-Verordnung gefördert. Die MAC-Richtlinie gilt auch für die Gruppe 1 der kleinsten Gewichtsklasse der Nutzfahrzeuge N1. Aus diesen Gründen werden seit 2016 Nutzfahrzeuge N1 zunehmend ebenfalls mit uHFKW-1234yf klimatisiert.

Tabelle 19: Parameter des deutschen Modells zur Berechnung von Entsorgungsemissionen in der mobilen Klimatisierung und Kältemittel im Bestand

Mobile Klimaanlage	Lebensdauer (Jahre)	Restfüllstand	Rückgewinnungsraten	Kältemittel
Pkw	15	34 %	2010: 38 % 2020: 50 %	R-134a, R-1234yf
Nfz	15	34 %	2010: 38 % 2020: 50 %	R-134a, R-1234yf
Busse	15	34 %	2010: 38 % 2020: 50 %	R-134a
Schienenfahrzeuge	25	87,5 %	80 %	R-134a
Schiffe	25	87,5 %	2010: 60 % 2020: 80 %	R-134a
Landmaschinen	10	34 %	11,7 %	R-134a

Quelle: Warncke & Gschrey (2024)

Flugzeuge und Hubschrauber sind in der Tabelle 19 nicht enthalten, da ihre Emissionen ausschließlich über gemeldete Bestandszahlen und nicht über Neuzugänge berechnet werden.

Unter allen Sektoren der Kälte- und Klimaanlage geben die IPCC-Guidelines hier die geringstmöglichen Maximalwerte sowohl für den Restfüllstand als auch die Rückgewinnungsrate an (s. Tabelle 5), nämlich gerade einmal 50 %. Bedingt ist dies durch mehrere Faktoren: Zum einen haben mobile Klimaanlage generell deutlich höhere Emissionen aus dem Bestand, also während der Lebenszeit, da sie dauerhaft in Bewegung sind und Dichtungen weitaus mehr beansprucht werden. Zum anderen sind Klimaanlage, im Gegensatz zu Kälteanlagen, nicht unbedingt notwendig, d.h. der Pkw bringt die Insassen auch ohne Klimatisierung an das Ziel. Eine Nachfüllung findet also nicht unbedingt statt, vor allem dann nicht, wenn der Pkw bereits in die Jahre gekommen ist und der Entsorgung somit näher. Darüber hinaus findet die Absaugung von verbleibendem Kältemittel aus Altfahrzeugen in den Demontagebetrieben unter ungünstigen Bedingungen statt. Wie die Studie „Modelle zur Inventarerhebung“ (Schwarz et al. 2013) bereits beschreibt, kann mit den üblichen Servicegeräten nicht die gesamte Kältemittelfüllmenge entnommen werden. Zudem dauert diese fast vollständige Absaugung etwa 30 Minuten – eine Zeit, die sich die Betriebe kaum nehmen werden, denn sowohl ist der Zeitdruck groß, als auch der Nutzen gering.

Die damalige Studie führte nicht nur diese Punkte auf, sondern änderte die Vorgehensweise der Emissionsabschätzung der Entsorgung von Pkw grundlegend. Dazu wurde eine Umfrage unter Altfahrzeugverwertern durchgeführt. Wichtigste Änderung war jedoch die, dass nicht mehr die entsprechende Kältemittelfüllmenge aus dem Jahr des Inverkehrbringens nach Ende der Lebensdauer multipliziert mit dem Emissionsfaktor als Entsorgungsemission gewertet wurde. Denn wie auch im Bereich der Kühlfahrzeuge, wird ein Großteil der Pkw exportiert und findet im Exportland sein Lebensende. Stattdessen greift das deutsche Modell seitdem auf die Daten der Abfallwirtschaft zur Altfahrzeuge-Verwertung des Statistischen Bundesamtes (Destatis 2022) zurück. Aus diesen werden dann mit den oben aufgeführten Parametern die Entsorgungsemissionen ermittelt. Diese Daten stehen jedoch nur für Pkw zur Verfügung. Allerdings werden sie auch für die Ermittlung der Entsorgungsemissionen von N1 Fahrzeugen

genutzt, denn der Anteil dieser Fahrzeuge an der Statistik beträgt 4 %. Für die Bereiche Pkw und N1-Fahrzeuge liegt also eine solide Datengrundlage für die Berechnung vor.

Anders sieht es in den anderen Kategorien der mobilen Kälte aus. Hier werden die Emissionen nach wie vor mit der Annahme berechnet, dass alle im Jahre des Inverkehrbringens auf den Markt gebrachten Kältemittelmengen entsprechend nach Ende der Lebensdauer in gewissem Maße emittieren. Wie bereits angenommen wurde, haben Unternehmensbefragungen im Rahmen dieses Vorhabens sowie auch Redebeiträge von Seiten der Industrie im Workshop bestätigt, dass ein Großteil der Fahrzeuge bzw. Schienenfahrzeuge und Schiffe ihr Lebensende nicht in Deutschland finden, sondern vorher ins Ausland exportiert werden.

7.1.5 SF₆ aus elektrischen Betriebsmitteln

7.1.5.1 Entsorgungspraxis

Die Entsorgung von elektrischen Schaltanlagen ist durch zertifiziertes Personal (Artikel 10 der Verordnung 2024/573, siehe Kapitel 3.2.1.1.6) erforderlich. Die Zertifizierung umfasst auch eine Anleitung für die Bedienung der verwendeten Geräte des Gashandlings. Besondere Sicherheitsanforderungen sind zu beachten, da SF₆ nicht nur klimaschädigende Eigenschaften hat, sondern in hoher Konzentration in geschlossenen Räumen die Sauerstoffkonzentration stark sinken lassen kann, so dass Lebensgefahr besteht. Diese Eigenschaft trifft auf alle F-Gase zu. Des Weiteren können sich im SF₆-Behälter und auch im Gas selbst Zersetzungsprodukte befinden, die gesundheitsschädlich sein können (Solvay 2023, mündliche Mitteilung).

Grundsätzlich stehen zwei Wege zur Entsorgung zur Verfügung: zum einen die Entsorgung als Abfall und zum anderen die Wiederverwendung nach Aufbereitung. Diese Entsorgungspfade sind in Deutschland im Kreislaufwirtschaftsgesetz festgeschrieben, welches in Kapitel 3.3.3 beschrieben ist.

Die Verantwortlichkeiten der Entsorgung liegen dabei bei den drei folgenden Körperschaften: dem Abfallerzeuger, dem Abfallbeförderer und dem Entsorger.

Dabei muss der Abfall laut Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV, siehe Kapitel 3.2.5) eingestuft werden. Die AVV dient zur Bezeichnung von Abfällen und zu deren Einstufung nach ihrer Gefährlichkeit. Das Kernstück ist das Abfallverzeichnis, welches 840 Abfallarten listet. Jeder Abfall in der EU muss eindeutig einer dieser Abfallarten und dem zugehörigen sechststelligen Abfallschlüssel (AS) zugeordnet werden.

Die Abfall-Einstufung von SF₆-Gas ist in Tabelle 20 aufgeführt.

Tabelle 20: Abfallschlüssel für SF₆

Zustand SF ₆	Abfallschlüssel	Beschreibung
Neues SF ₆ -Gas zur Entsorgung	AS: 16 05 05	Gase in Druckbehältern mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 05 04 fallen
Gebrauchtes SF ₆ -Gas (Entnahme aus intakten Geräten)	AS: 16 05 05	Gase in Druckbehältern mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 05 04 fallen
Gebrauchtes SF ₆ -Gas (verunreinigt / Störlichtbogen)	AS: 16 05 04*	gefährliche Stoffe enthaltende Gase in Druckbehältern (einschließlich Halonen)

Quelle: ZVEI (2023)

Anmerkung: Abfallarten im Abfallverzeichnis, deren Abfallschlüssel mit einem Sternchen (*) versehen sind, sind gefährlich im Sinne des § 48 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes

Nach welchen Kriterien das SF₆ eingestuft wird, ist im Abschnitt zum Recycling erläutert (Kapitel 7.1.5.2).

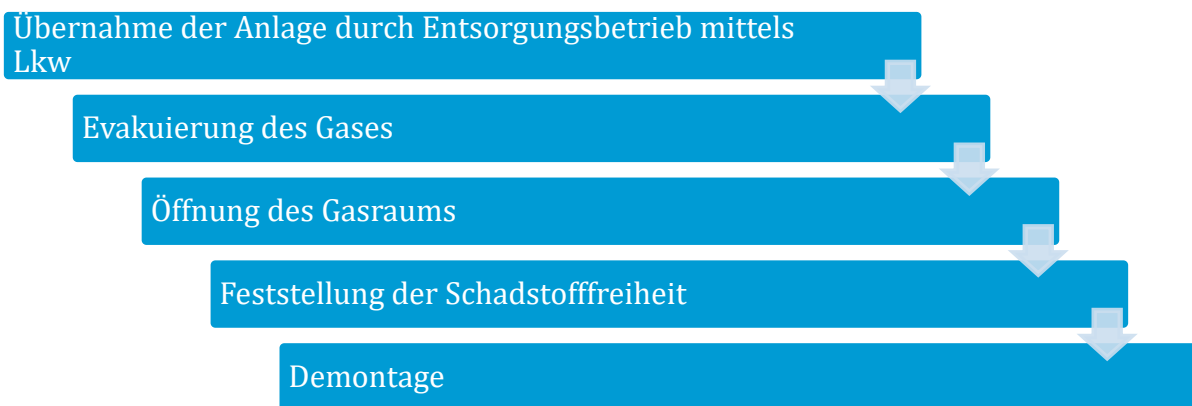
Relevant für die Entsorgung eines als „gefährlich“ eingestuften Stoffes ist auch die zu entsorgende Menge. Ist diese pro Abfallschlüssel/Anfallstelle und Jahr größer als 20 Tonnen, ist ein Sammelentsorgungsnachweis und ein Übernahmeschein vonnöten. Ist die Menge kleiner, wird ein Einzelentsorgungsnachweis ausgestellt sowie ein elektronischer Begleitschein.

Gebrauchtes SF₆-Gas, dessen sich der Verwender nicht entledigen, sondern dieses wiederverwenden will, kann in speziellen Anlagen so aufgearbeitet werden, dass nahezu die Qualität von SF₆-Frischware erreicht wird. Der genaue Umgang mit dem Gas selbst wird im folgenden Kapitel dargestellt. Wird dasselbe Gas an den Kunden zurückgeliefert, der es geliefert hat, handelt es sich nicht um Abfallentsorgung, denn das Gas ist dann kein deklarierter Abfall.

Generell sind Vertreiber und Hersteller von SF₆-Gas in Deutschland gemäß §23 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) nach §4 Abs. 2 der Chemikalien-Klimaschutzverordnung (ChemKlimaschutzV) im Rahmen ihrer Produktverantwortung verpflichtet, SF₆-Gas zurückzunehmen. Auch sie können neben den Entsorgungsbetrieben die Entsorgung der Anlagen und des SF₆ übernehmen bzw. in Auftrag geben. Ebenfalls die Netzbetreiber selbst können diese Tätigkeit übernehmen. Einige von ihnen haben sich intern eine Recyclinginfrastruktur aufgebaut und sind so unabhängiger von externen Unternehmen.

Unterschieden werden muss bei Entsorgungsbetrieben zwischen Entsorgungsfachbetrieben und Entsorgungsbetrieben. Der Unterschied liegt darin, dass erstere zusätzlich zum 5-tägigen Fachlehrplan zum Kreislaufwirtschaftsgesetz eine Auditierung durch den TÜV erhalten, der sie sodann also **Fachbetrieb** auszeichnet. Der Entsorger von Schaltanlagen muss allerdings nicht zwingend ein Fachbetrieb sein. Ein Register besteht jedoch nur für Entsorgungsfachbetriebe (eEFBV 2025), allerdings nicht speziell für die Entsorgung von SF₆.

Bei der Außerbetriebnahme von elektrischen Betriebsmitteln muss eine Vielzahl von Schritten beachtet werden. Zunächst ist es wichtig festzustellen, um welche Art von Anlage es sich genau handelt, es müssen Baujahr, Typ und Füllmenge ermittelt werden. Aus diesen Informationen lässt sich ableiten, welche Möglichkeiten der Gasentnahme bestehen. Es müssen Transporteinheiten, wie Gasspeicher oder Flaschen, sowie entsprechende Transportmittel organisiert werden. Vereinfacht läuft die Entsorgung in den meisten Fällen wie in Abbildung 3 schematisch dargestellt ab.

Abbildung 3: Fließbild zum Ablauf der Entsorgung eines elektrischen Betriebsmittels

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Recherche

Allerdings kann die Anlage nicht in allen Fällen transportiert werden. Es kann sinnvoller sein, die Anlage vor Ort zu evakuieren. Der Leitfaden des ZVEI (2024) bietet eine Entscheidungshilfe zur Ortswahl der Gasentnahme.

Bereits in Kapitel 5.2 sind die entsprechenden Normen hinsichtlich von SF₆ genannt, auf die im folgenden Kapitel näher eingegangen werden soll. Eine weitere, noch nicht genannte Norm ist die IEC 62271-4. Sie ist für den Prozess der Rückgewinnung entscheidend, denn in ihr wird der standardisierte Ablauf der Gasentnahme genau beschrieben. Auch die schon erwähnten Leitfäden (ZVEI 2018, ZVEI 2023) bieten genaue Hinweise und praktische Tipps zum Ablauf der Rücknahme. Betont werden soll an dieser Stelle die Unterscheidung der Entsorgung zwischen Hochspannungsanlagen bzw. Anlagen, die über Ventile am SF₆-Gasraum verfügen und solchen, die, wie oben erwähnt „sealed for life“ sind. Letztere weisen, wie der Name schon sagt, keine Öffnung auf, weshalb im Gegensatz zu Anlagen, bei denen das SF₆ durch das Ventil abgesaugt werden kann, die Absaugung des SF₆ deutlich aufwendiger ist. In diesem Fall muss der Gasraum aufgebohrt werden. Damit es nicht zu Emissionen kommt, muss eine spezielle gasdichte Bohrausrüstung verwendet werden. Diese Herangehensweise erschwert die Rückgewinnung.

Neben Außerbetriebnahmen kann SF₆ auch zu Wartungszwecken aus Anlagen entfernt werden. Dieses Gas kann je nach Qualität auch vor Ort recycelt werden. Auch dieses Verfahren wird im nächsten Abschnitt erläutert.

Wie bereits erwähnt (siehe Kapitel 5.2), haben auch ein Fluornitril und ein Fluorketon in Teilen Eingang in den Markt gefunden. Diese müssen in hierfür eigens hergestellten Aufbereitungsanlagen behandelt werden. Die Lagerung ist deutlich aufwendiger, da die Stoffe vor Ort gemischt werden müssen (entweder mit CO₂, O₂ oder synthetischer Luft).

Die Kosten der Entsorgung einer MS-Anlage belaufen sich zwischen einem mittleren dreistelligen bis vierstelligen Betrag pro Anlage. Der Transport wird separat berechnet, ebenso die Rückvergütung von Metall. Bei einer größeren Anzahl von zu entsorgenden Anlagen werden Mengenrabatte gegeben. Die Ressourcen, die ein Unternehmen einsetzen muss, um Entsorgungen durchführen zu können, liegen bei der Mitarbeiterschulung, den Behältern für das SF₆, dem Absaug- und dem Analysegerät. Für eine Mindestausrüstung fallen Kosten im unteren fünfstelligen Bereich an, damit können allerdings keine großen Mengen behandelt werden. Um für einen universelleren Einsatz ausgerüstet zu sein, sind größere Gerätschaften nötig, deren Kosten inklusive größerer Behältnisse wie Flaschen, Tanks oder Zylindern, höher liegen und zwischen einem mittleren fünfstelligen und niedrigen sechsstelligen Betrag liegen können.

7.1.5.2 Recycling und Aufarbeitung von SF₆

Wie bereits beschrieben, gelten für das SF₆ bestimmte Qualitätsnormen in Bezug auf den Zustand (Tabelle 21).

Tabelle 21: SF₆-Normen

Zustand des SF ₆	Normen
Neues Gas	IEC 60376*
SF ₆ -Gas gebraucht zur Wiederverwendung	IEC 60480 **
SF ₆ -Gas gebraucht zur Rückgewinnung beim SF ₆ -Hersteller	IEC 62271-4 ***

Quelle: * IEC 2018, ** IEC 2019, *** IEC 2022

Während des Betriebs der Schaltanlagen kann es durch unterschiedliche Faktoren zu Verunreinigungen kommen, die in Tabelle 22 dargestellt sind.

Tabelle 22: Ursachen und Stoffe der Verunreinigung von SF₆

SF ₆ Situation und Gebrauch	Ursache der Verunreinigung	Mögliche Verunreinigung
Während der Handhabung	Leckagen, unvollständige Evakuierung und Desorption (Ausgasung), Verwendung von ölhaltigem Handlingsequipment	Luft, Öl, H ₂ O
Isolierfunktion	Entladung (Teilentladung, Koronaentladung, Funkenentladung, etc.)	HF, SO ₂ , SOF ₂ , SOF ₄ , SO ₂ F ₄
Schaltgeräte	Zersetzungsprodukte bei Schaltlichtbögen	H ₂ O, HF, SO ₂ , SOF ₂ , SOF ₄ , SO ₂ F ₄ , CuF ₂ , SF ₄ , WO ₃ , CF ₄ , AlF ₃
	Mechanischer Abrieb	Metallstäube, Teilchen
Interner Lichtbogen	Schmelzen und Zersetzen von Werkstoffen	Luft, H ₂ O, HF, SO ₂ , SOF ₂ , SOF ₄ , SO ₂ F ₄ , SF ₄ , CF ₄ , Metallstäube, Teilchen, AlF ₃ , FeF ₃ , WO ₃ , CuF ₂

Quelle: Schulungsunterlagen ZVEI; IEC 60480:2004

Um die Qualität des Gases und somit nicht nur die weitere Verwendung, sondern auch die Art der möglicherweise notwendigen Entsorgung zu ermitteln, werden verschiedene Verfahren angewandt. Messungen vor Ort mit portablen Geräten beschränken sich grundsätzlich auf die Messung der Schwefeldioxid-Konzentration. Dieser Wert wird als Grundlage für eine Gesamtbeurteilung der Toxizität herangezogen. Nach Erkenntnissen der Norm IEC 60480 beträgt das Verhältnis von Schwefeldioxid (SO₂) zur Gesamtmenge aller Zersetzungsprodukte im eingesetzten SF₆-Gas 1 zu 4; dies wird als SO₂-Äquivalenz bezeichnet. Des Weiteren findet eine Abschätzung des Gefährdungspotenzials der Zersetzungsstoffe statt, die auf der Messung von Schwefeltetrafluorid (SF₄) beruht, da dieses ein höheres Gefährdungspotenzial als alle andere Zersetzungsstoffe hat.

Die Ergebnisse der SO₂-Messung ermöglichen die Klassifizierung nach der sogenannten CLP-Verordnung, der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen (Europäisches Parlament und Europäischer Rat 2008). Dieser Wert liegt bei 250 ppm SO₂-Konzentration. Ist die SO₂-Konzentration kleiner als dieser Wert, wird das Gas als „Gebraucht, aber ohne toxische Eigenschaften“ bezeichnet. Ist der Wert größer gleich 250 ppm muss das SF₆ als Gefahrstoff gekennzeichnet werden. Hier ist nun der genannte Abfallschlüssel als „Gefährlicher Abfall“ zu nutzen. Laut dem ZVEI-Leitfaden (ZVEI 2023) wird dieser Grenzwert allerdings zurzeit hinterfragt und in einer Arbeitsgruppe des Conseil International des Grands Réseaux Électriques (CIGRE) untersucht.

Am Markt gibt es unterschiedliche Geräte zur Gasrückgewinnung. Einige können das Gas nur absaugen, andere vor Ort direkt aufbereiten. Das Recycling besteht dabei nur aus der Entfernung von Feuchtigkeit sowie festen und gasförmigen Zersetzungsprodukten durch einen Trocken- und Partikelfilter.

Die größten Probleme bei der Verunreinigung von SF₆ stellen Luft und Stickstoff² dar, da diese nur bis zu einem gewissen Grad entfernt werden können. Zudem genügt hier kein einfaches Reinigungsverfahren (Recycling), sondern es muss mittels eines kryogenen Druck-Verfahrens getrennt werden. Dabei werden zunächst die Zersetzungsprodukte gefiltert, im Anschluss die Feuchte, und erst dann wird das SF₆ von Stickstoff und Luft getrennt. Gasgemische sind bis zu einem SF₆-Gehalt von über 40 % trennfähig. Die Firma DILO hat eine solche Anlage mittlerweile in mobiler Ausführung verfügbar. Dabei können bis zu 40 kg SF₆ pro Stunde gereinigt werden.

Jede Charge an aufbereitetem SF₆-Gas wird auf Einhaltung der Reinheitskriterien analysiert. Dies wird im Prozess der Wiederaufbereitung im Unternehmen mit einem Gaschromatograph und IR-Spektrometer durchgeführt. Die folgende Tabelle 23 zeigt die Qualitätslevel des aufbereiteten Gases im Vergleich zur Frischware. Geringste Verunreinigungen können somit analysiert werden. Expertengespräche haben ergeben, dass der Kontaminierungsgrad des rückgewonnenen SF₆ selten so hoch sei, dass das Gas nicht wiederverwendet werden könne.

Beim ReUse-Verfahren von Solvay (siehe Kapitel 4.1) wird das rückgewonnene Gas mit SF₆-Frischware gemischt und anschließend wiederverwendet.

Die Kosten von neuem SF₆ belaufen sich je nach Mengenabnahme auf 7-14 Euro pro kg. Das wiederaufbereitete Gas ist zurzeit nur Nuancen teurer als SF₆-Frischware.

Tabelle 23: Qualitätslevel von SF₆ beispielhaft für die DILO GmbH

Komponente	DILO Qualität "Certified Gas"	IEC 60376 (Neugas)	ASTM D2472-15
SF ₆	> 99,9 Vol.-% (> 99,99 Gew.-%)	> 98,5 Vol.-%	≥ 99,8 Gew.-%
Frostpunkt (100 kPa)	≤ -62 °C	-36 °C	-62 °C
SO ₂	< 0,1 µl/l	-	-

Anmerkung: ASTM D2472 ist eine weitere internationale Standard-Spezifikation für SF₆ als Frischware.

Quelle: Verändert nach DILO GmbH (2024)

² In China könnte dies zum Problem werden, denn dort wird SF₆ kaum in reiner Form, sondern meist als Stickstoff-Gemisch verwendet.

7.1.5.3 Emissionsfaktoren

In Kapitel 5.2 werden die Emissionsfaktoren des deutschen Modells sowie die Default-Faktoren der IPCC-Guidelines erläutert.

Tabelle 24 zeigt einen Vergleich der tatsächlich verwendeten Faktoren anhand einer Auswahl von Ländern.

Tabelle 24: Vergleich der SF₆-Emissionsfaktoren für Herstellung, Betrieb und Entsorgungsverluste von Schaltanlagen im Jahr 2021 in ausgewählten Ländern (%)

Emissionsfaktoren (%)			
Land	Herstellungsemissionen	Bestandsemissionen	Entsorgungsemissionen
Dänemark	5,0	0,5	NO*
Frankreich	0,36	0,67	1,3
Griechenland	NA**	NA	NA
Italien	0,37	0,48	3
Niederlande	NA	IE***	NA
Polen	6,0	2,0	NO
Spanien	0,69	0,45	1,9
Schweden	0,16	0,5	2,0
Japan	2,0	0,1	1,0
US	3,32	1,9	IE

Anmerkungen: * NO: Not occurring (nicht vorkommend); ** NA: Not applicable (nicht anwendbar) *** IE: Included elsewhere (an anderer Stelle inkludiert). Es ist zu beachten, dass die Emissionsfaktoren aus Japan für die Herstellung und Entsorgung auf einer Veröffentlichung aus dem Jahr 2004 basieren. Die Werte unterscheiden nicht zwischen Hoch- und Mittelspannung.

Quelle: UNFCCC (2023a)

Tabelle 24 zeigt, dass die Emissionsfaktoren für alle Phasen des Lebenszyklus von elektrischen Betriebsmitteln in den ausgewählten Ländern unterschiedlich sind. Für diese Unterschiede gibt es eine Reihe von Gründen, einige in der Folge genannte sind EU-spezifisch, andere gelten auch global:

1. Politischer Rahmen

Abgesehen von europäischen Maßnahmen, die für alle EU-Mitgliedstaaten gleichermaßen gelten, wie die EU F-Gas-Verordnung (EU) 2024/573 oder die Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH), sind die nationalen Ziele zur Emissionsreduktion in der EU unterschiedlich.

Dänemark, zum Beispiel, führte 2001 eine F-Gas-Steuer ein, deren Höhe abhängig vom Treibhauspotenzial der besteuerten F-Gase ist, was zu einem sehr hohen Satz für SF₆ führt. Elektrische Schaltanlagen sind zwar von dieser Steuer ausgenommen, das Bewusstsein im Umgang mit SF₆ hat sich allerdings allgemein verändert. Ein weiteres Beispiel ist die bereits genannte Freiwillige Selbstverpflichtung in Deutschland. Im Jahr 2001 betrugen die Emissionen bei der Herstellung elektrischer Bauteile 27 t, und damit mehr als aus dem Betrieb der Schaltanlagen selbst. Die Industrie hat durch Wiederverwendung und Kreislaufführung des Gases den Verbrauch pro Produkt erheblich verringert, so dass im Jahr 2009 nur noch 8 t Emissionen entstanden. Es fand also eine deutliche Reduktion der Emissionen statt.

2. Marktposition der Hersteller elektrischer Schaltanlagen

Elektrische Schaltanlagen, die SF₆ enthalten, werden nur in wenigen EU-Mitgliedstaaten in großem Umfang hergestellt, darunter Deutschland, Frankreich, Italien und Spanien. Ein großer Hersteller von SF₆-freien elektrischen Schaltanlagen ist in den Niederlanden ansässig. Die Existenz von Produktionsanlagen für elektrische Schaltanlagen, die SF₆ enthalten, führt im Allgemeinen zu Emissionen während der Herstellung und hat somit einen großen Einfluss auf die gesamten SF₆-Emissionen in dieser Kategorie sowie die Emissionsfaktoren.

3. Netzinfrastruktur

Unterschiedliche Netzstrukturen innerhalb der EU ergeben sich vor allem aus der benötigten und erzeugten Energie sowie aus den Standorten der Energieerzeugung. In Ländern mit großen Flächen und geringer Bevölkerungsdichte wie Schweden muss weniger Energie über längere Strecken transportiert und verteilt werden als z.B. in Deutschland. Um Stromverluste zu vermeiden, wird zum Beispiel die Spannungsebene 72 kV - 80 kV als „Mittelspannung“ verwendet, was in den meisten anderen EU-Ländern nicht der Fall ist. Ein weiterer Faktor ist die Bedeutung der Offshore-Energieerzeugung, die ebenfalls andere Strukturen/Schaltanlagen erfordert. Außerdem spielt das Datum der Einführung von elektrischen Schaltanlagen, die auf SF₆ basieren, eine wichtige Rolle, wenn es um die Wahl einer Methode zur Schätzung der Emissionen geht. Ein schnelles Bestandswachstum aufgrund der späten Einführung von elektrischen Betriebsmitteln, die SF₆ enthalten, schließt laut IPCC-Guidelines die Anwendung des Massenbilanzansatzes aus.

4. Methode der Berichterstattung

Die Wahl der Berichtsmethode hängt von der Datenverfügbarkeit ab und davon, ob die Kategorie in einem Land als Schlüsselkategorie vermerkt ist. Die Verfügbarkeit von Daten ist in den einzelnen Mitgliedstaaten sehr unterschiedlich. In Ländern, in denen es starke Industrieverbände gibt, die einen Großteil aller Interessengruppen vertreten, ist es einfacher, umfassende Daten zu erhalten. Dies gilt auch für Länder, die stärkere politische Maßnahmen ergriffen haben oder in denen die Industrie selbst zusätzliche Maßnahmen ergriffen hat.

Die Werte zeigen, dass Deutschland mit seinem sehr differenzierten Berichtsansatz teilweise deutlich über den Ansätzen der anderen Länder liegt. Vor allem die Unterscheidung nach Hochspannung, Mittelspannung und „Anderen“ in Kombination mit dem Mischansatz aus Massenbilanzierung und Emissionsfaktoren erfordert zwar eine teilweise aufwendigere Datenerhebung, ermöglicht aber auch deutlich genauere Ergebnisse. Bei den berichteten Daten aus anderen Ländern ist unklar, ob es sich um Mittelwerte aus allen Spannungsebenen oder nur jeweils HS oder MS handelt.

7.2 VDKF-LEC Datensatz

7.2.1 Anzahl stillgelegter Anlagen

Ursprünglich umfasste die VDKF-LEC Datenbank 6.831 Geräte in verschiedenen Kälte- und Klimasektoren. Nach Qualitätsprüfungen und Filterung enthielt die Datenbank Einträge zu 6.763 Geräten für die Jahre 2017 bis 2021 in den UNFCCC-Sektoren „2.F.1.a Gewerbekälte“, „2.F.1.b Haushaltskühlgeräte“, „2.F.1.c Industriekälte“, „2.F.1.d Transportkälte“, „2.F.1.f Stationäre Klimatisierung“ sowie „Unbekannt“ für Geräte, die keinem UNFCCC-Sektor zuordbar waren (Tabelle A 1 in Anhang A.1). Eine weitere Filterung für die Berechnung der Durchschnittswerte ergab eine Gesamtzahl von 6.192 Anlagen (Tabelle 25). Die Geräte waren mit verschiedenen Kältemitteln und Gemischen gefüllt, die in Tabelle 26 gelistet sind. Eine weitere Filterung nach Anlagen, für die die Betriebsdauer verfügbar war, unter Einhaltung der mindestens-25-Anlagen-Regel, ergab einen Datensatz mit 5.341 Geräten (Tabelle A 2 in Anhang A.1).

Der Erfassungsbereich war über die Jahre hinweg weitgehend konsistent, wobei stationäre Klimaanlage der am stärksten vertretene Sektor waren, vor allem durch dezentrale Split-Geräte. Das Jahr 2018 wies für alle Sektoren die größte Anzahl stillgelegter Anlagen auf, aber es ist kein klarer Trend über die Jahre erkennbar.

R-404A ist das vorherrschende Kältemittel in der gewerblichen Kälteerzeugung, gefolgt von R-134a. R-449A ist ein vergleichsweise neues Gemisch, das als Nachrüstung für z.B. R-404A und R-507A entwickelt wurde und als solches in früheren Jahren nicht häufig in stillgelegten Anlagen vorkam. Stillgelegte Industriekälteanlagen wurden hauptsächlich mit R-134a befüllt, gefolgt von R-407C und R-404A. Bei stationären Klimaanlage sind R-407C und R-410A die Standardkältemittel, die bei der Stilllegung zurückgewonnen werden, aber einige Geräte enthielten auch R-134a. Andere Kältemittel wurden nur sporadisch für verschiedene Anlagentypen aufgeführt. Nur sehr wenige Wärmepumpen wurden in der Datenbank als stillgelegt aufgeführt, was verständlich ist, da Wärmepumpen erst vor einigen Jahren in größerer Zahl installiert wurden (BWP 2023).

Tabelle 25: Anzahl der stillgelegten Kälte- und Klimaanlage im VDKF-LEC Datensatz für die verschiedenen Sektoren und Teilsektoren nach Kältemittel und Jahr

Kältemittel	2017	2018	2019	2020	2021	Summe
2.F.1.a Gewerbekälte – Ortsmontierte Anlagen						
R-22	17	29	13	8	8	75
R-134a	27	39	43	26	43	178
R-404A	91	92	70	101	65	419
R-407C	20	15	11	3	18	67
R-422D	8	7	7	6	5	33
R-449A	0	3	4	12	7	26
R-507A	8	20	8	7	2	45

Kältemittel	2017	2018	2019	2020	2021	Summe
-------------	------	------	------	------	------	-------

2.F.1.a Gewerbekälte - Steckerfertige Geräte

R-134a	17	12	5	4	14	52
R-404A	9	21	22	12	19	83

2.F.1.b Haushaltskühlgeräte

R-600a	5	3	10	3	4	25
--------	---	---	----	---	---	-----------

2.F.1.c Industriekälte

R-12	6	14	18	1	1	40
R-22	20	16	7	13	9	65
R-134a	120	149	79	146	145	639
R-404A	22	19	16	30	19	106
R-407C	40	58	35	34	50	217
R-410A	4	9	7	8	6	34
R-422D	12	3	4	4	11	34

2.F.1.f Stationäre Klimatisierung - Dezentrale Split-Geräte (single/multi)

R-22	78	84	50	48	31	291
R-134a	35	44	30	45	25	179
R-407C	147	186	167	117	86	703
R-410A	290	396	388	361	357	1.792

2.F.1.f Stationäre Klimatisierung - Dezentrale VRF-Geräte

R-407C	9	9	8	8	6	40
R-410A	17	28	25	33	37	140

2.F.1.f Stationäre Klimatisierung - Sonstige dezentrale Klimaanlage

R-407C	14	8	6	4	4	36
R-410A	7	10	5	4	4	30

2.F.1.f Stationäre Klimatisierung - Zentrale Raumluftechnik-Geräte

R-22	13	12	7	3	4	39
R-407C	17	18	19	20	14	88
R-410A	12	11	9	15	9	56

Kältemittel	2017	2018	2019	2020	2021	Summe
-------------	------	------	------	------	------	-------

2.F.1.f Stationäre Klimatisierung - Sonstige zentrale Klimaanlage

R-22	15	26	2	6	5	54
R-134a	7	17	14	55	35	128
R-407C	26	34	18	33	15	126
R-410A	27	13	16	18	13	87

2.F.1.f Stationäre Klimatisierung - Wärmepumpen (Direktverdampfung)

R-410A	4	4	12	2	5	27
--------	---	---	----	---	---	-----------

Unbekannt

R-134a	18	19	55	32	27	151
R-404A	7	11	7	7	4	36
R-407C	3	8	13	7	20	51
Gesamt	1.172	1.447	1.210	1.236	1.127	6.192

Anmerkung: Es sind nur Gerätetypklassen (Sektor, Teilsektor und Kältemittel) dargestellt, die in der Summe über die Jahre mindestens 25 Anlagen aufwiesen, für eine vollständige Liste siehe Tabelle A 1 in Anhang A.1.

Quelle: VDKF (2023)

Tabelle 26: Relevante Kältemittel und Gemische in entsorgten Anlagen

Kältemittel	Typ	Enthaltenes Gas	GWP ¹	Üblicher Gebrauch
R-12	Einzelgas	FCKW-12 (CCl ₂ F ₂)	11.200 ²	Mittlerweile verbotenes Kältemittel da ozonschichtschädigend
R-22	Einzelgas	HFCKW-22 (CHClF ₂)	1.960 ²	Mittlerweile verbotenes Kältemittel da ozonschichtschädigend
R-32	Einzelgas	HFKW-32 (CH ₂ F ₂)	675	Stationäre Klimatisierung, Teil von Kältemittelgemischen
R-125	Einzelgas	HFKW-125 (CF ₃ -CHF ₂)	3.500	Teil von Kältemittelgemischen
R-134a	Einzelgas	HFKW-134a (CF ₃ -CH ₂ F)	1.430	Haushaltskälte (exkl. Kühlschränke und Kühltruhen), mobile Klimatisierung (exkl. Pkw), Brauchwasserwärmepumpen
R-143a	Einzelgas	HFKW-143a (CF ₃ -CH ₃)	4.470	Teil von Kältemittelgemischen
R-1234yf	Einzelgas	uHFKW-1234yf (CF ₃ CF=CH ₂)	0,501	Mobile Klimatisierung in Pkw, Teil von Kältemittelgemischen
R-1234ze(E)	Einzelgas	uHFKW-1234ze(E) (CF ₃ CH=CHF)	1,37	Industriekälte, Teil von Kältemittelgemischen
R-404A	Mischung	44 % HFKW-125, 4 % HFKW-134a, 52 % HFKW-143a	3.922	Gewerbe- und Industriekälte
R-407C	Mischung	23 % HFKW-23, 25 % HFKW-125, 52 % HFKW-134a	1.774	Stationäre Klimatisierung
R-410A	Mischung	50 % HFKW-32, 50 % HFKW-125	2.088	Stationäre Klimatisierung
R-422D	Mischung	65 % HFKW-125, 32 % HFKW-134a, 3 % R-600a	2.729	Gewerbe- und Industriekälte
R-448A	Mischung	26 % HFKW-32, 26 % HFKW-125, 21 % HFKW-134a, 20 % uHFKW-1234yf, 7 % uHFKW-1234ze(E)	1.386	Gewerbe- und Industriekälte
R-449A	Mischung	24 % HFKW-32, 25 % HFKW-125, 26 % HFKW-134a, 25 % uHFKW-1234yf	1.396	Gewerbe- und Industriekälte
R-450A	Mischung	42 % HFKW-134a, 58 % uHFKW-1234ze(E)	601	Gewerbe- und Industriekälte
R-507A	Mischung	50 % HFKW-125, 50 % HFKW-143a	3.985	Gewerbekälte
R-600a	Einzelgas	Isobutan (HC(CH ₃) ₃)	0	Haushaltskühlgeräte und steckerfertige Geräte

¹ GWP₁₀₀ nach Verordnung (EU) 2024/573 (F-Gas-Verordnung)² GWP₁₀₀ nach 6. IPCC-Sachstandsbericht (IPCC 2021)

7.2.2 Rückgewonnene Kältemittelmengen

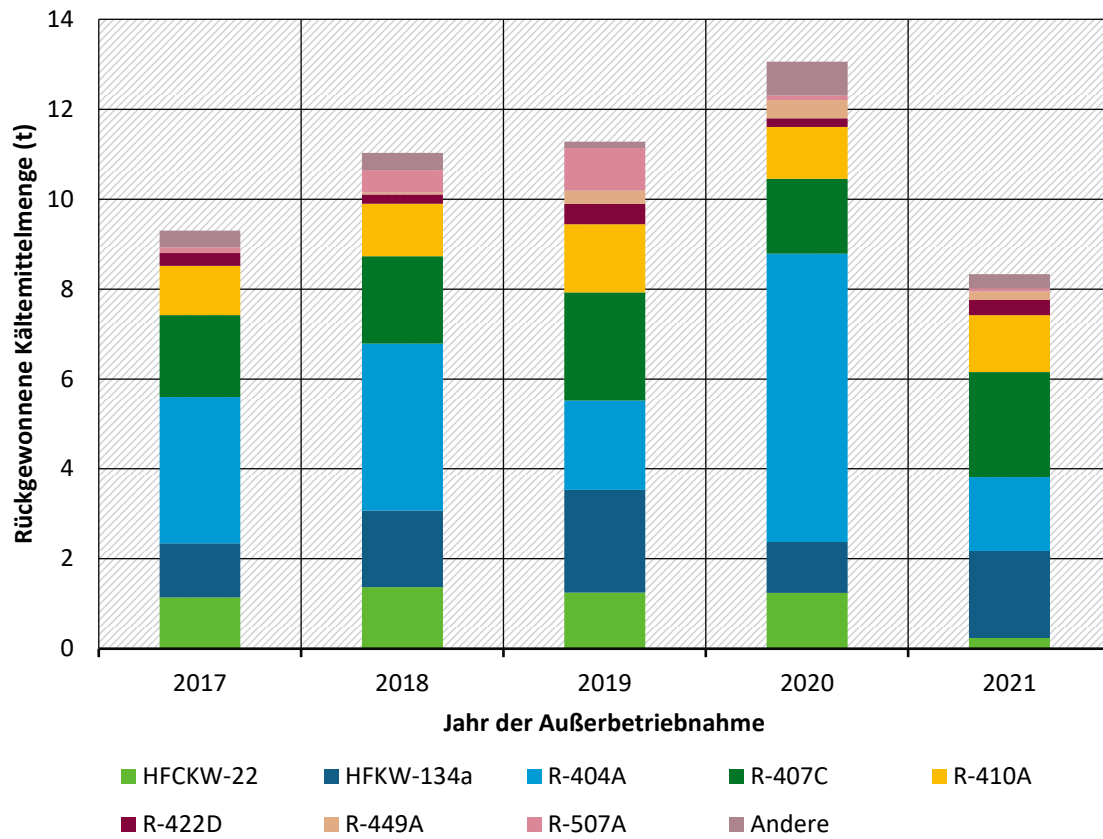
Über den betrachteten Zeitraum von fünf Jahren (2017-2021) wurden 53 t Kältemittel aus Altanlagen im VDKF-LEC Datensatz rückgewonnen, wobei es sich maßgeblich um HFKW handelte (Tabelle 27). HFCKW machten mit großem Abstand die zweitgrößte Gruppe der rückgewonnenen Mengen aus, wobei den größten Anteil HFCKW-22 ausmachte (Abbildung 4). Bei den rückgewonnenen FKW handelte es sich um FKW-218, welches nur in den Mischungen R-413A und R-403B enthalten war, aber nicht als Einzelgas verwendet wurde. FCKW wurden ebenfalls rückgewonnen, jedoch nur zu einem sehr geringen Anteil. Als Einzelgas wurde nur FCKW-12 aus Altanlagen entnommen, FCKW-115 war ausschließlich Teil der Mischungen R-502 und R-504. Ab dem Jahr 2018 wurden auch uHFKW-1234yf und -1234ze rückgewonnen, jedoch nur in sehr geringen Mengen. Natürliche Kältemittel sind ebenfalls in der VDKF-LEC Datenbank gelistet, jedoch sind die Mengen hier sehr klein und entstammten maßgeblich einigen wenigen Haushaltskühlgeräten und Mischungen.

Tabelle 27: Summen der rückgewonnenen Kältemittelmengen aus Altanlagen in Tonnen im VDKF-LEC Datensatz

Typ	2017	2018	2019	2020	2021	Summe über alle Jahre	Anteil an der Gesamtsumme
FCKW	0,033	0,007	0,009	0,001	0,002	0,052	0,10 %
FKW	0,002	0,017	0,001	0	0	0,020	0,04 %
HFCKW	1,199	1,401	1,266	1,284	0,237	5,387	10,17 %
HFKW	8,044	9,569	9,892	11,641	8,021	47,167	89,01 %
uHFKW	0	0,020	0,095	0,122	0,056	0,293	0,55 %
Natürliche	0,018	0,014	0,018	0,010	0,014	0,074	0,14 %
Gesamt	9,296	11,028	11,281	13,058	8,330	52,993	-

Quelle: VDKF (2023)

In der Summe nahm die rückgewonnene Kältemittelmenge bis ins Jahr 2020 kontinuierlich zu, während sie im Jahr 2021 deutlich geringer war als in den vorangegangenen Jahren (Abbildung 4 und Tabelle 28). Für das Jahr 2020 entstammt die rückgewonnene R-404A-Menge jedoch einigen wenigen Industriekälteanlagen mit sehr großen rückgewonnenen Mengen von 220 kg bis zu 1.800 kg. Ignoriert man die einzelne Altanlage mit 1.800 kg rückgewonnenem R-404A, läge die Jahressumme für 2020 größtmäßig zwischen denen für 2018 und 2019.

Abbildung 4: Rückgewonnene Kältemittelmenge aus Altanlagen im VDKF-LEC Datensatz nach relevanten Kältemitteln

Anmerkung: „Andere“ sind FCKW-12, HFCW-23, HFCW-32, HFCW-143a, R-410A, R-402A, R-403B, R-407A, R-407B, R-407D, R-407F, R-408A, R-409A, R-413A, R-417A, R-422A, R-427A, R-437A, R-448A, R-450A, R-452A, R-502, R-504, R-507A, R-513A, R-290, R-600a, R-718 und R-744.

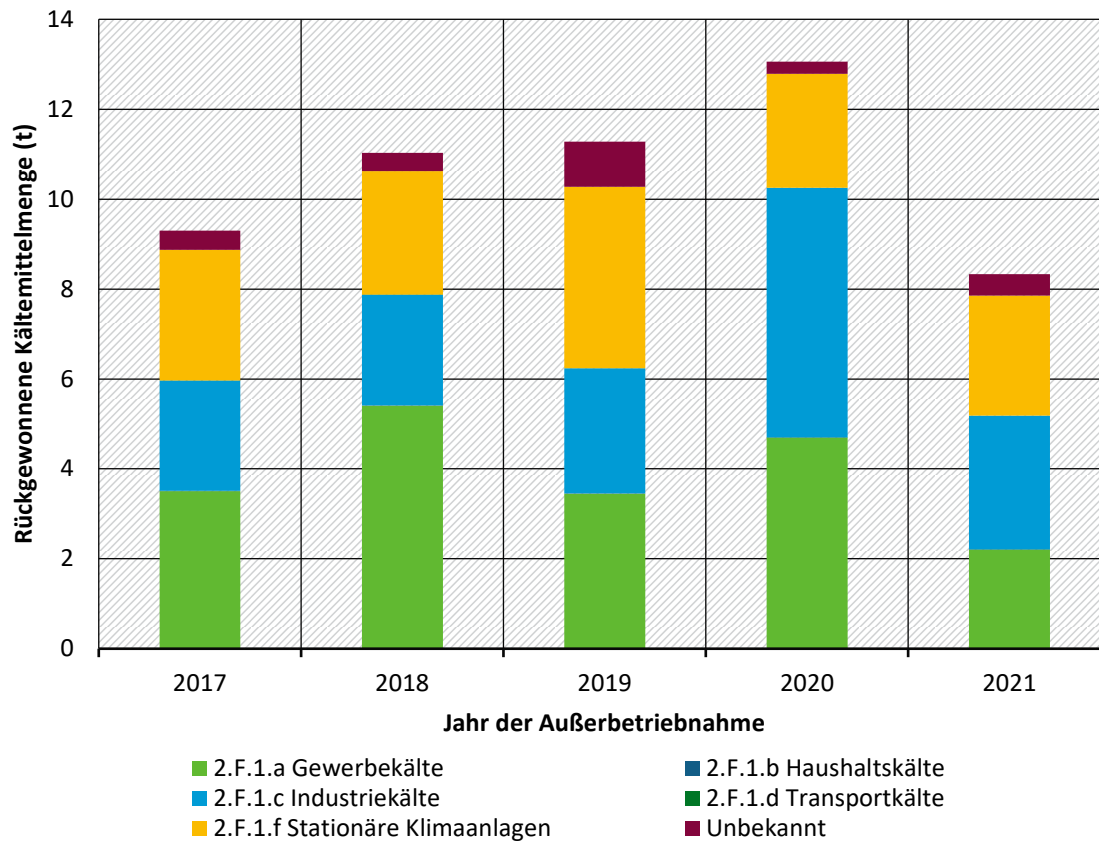
Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den ausgewerteten Daten aus VDKF (2023)

Tabelle 28: Rückgewonnene Kältemittelmenge aus Altanlagen in Tonnen im VDKF-LEC Datensatz für Deutschland nach relevanten Kältemitteln

Kältemittel	2017	2018	2019	2020	2021	Summe	Anteil an der Gesamtsumme
FCKW-12	0,013	0,006	0,009	0,001	0,003	0,033	0,06 %
HFCKW-22	1,140	1,368	1,246	1,244	0,237	5,235	9,88 %
HFKW-23	0,001	0,005	0,012	0,002	0,004	0,025	0,05 %
HFKW-32	0	0,002	0,010	0,011	0,015	0,038	0,07 %
HFKW-134a	1,206	1,706	2,289	1,132	1,938	8,270	15,61 %
HFKW-143a	0	0	0	0,410	0	0,410	0,77 %
R-404A	3,253	3,716	1,986	6,412	1,647	17,013	32,10 %
R-407C	1,822	1,941	2,406	1,662	2,328	10,160	19,17 %
R-410A	1,096	1,169	1,518	1,154	1,273	6,211	11,72 %
R-422D	0,284	0,202	0,455	0,197	0,340	1,478	2,79 %
R-449A	-	0,043	0,292	0,400	0,187	0,921	1,74 %
R-507A	0,128	0,499	0,942	0,099	0,067	1,735	3,27 %
Andere Mischungen	0,352	0,367	0,115	0,334	0,292	1,461	2,76 %
Natürliche Kältemittel	<0,001	0,004	<0,001	<0,001	<0,001	0,004	0,01 %
Gesamt	9,297	11,027	11,281	13,059	8,330	52,993	-

Quelle: VDKF (2023)

Betrachtet man die verschiedenen Sektoren, entstammte der größte Teil der rückgewonnenen Kältemittel in der Summe über alle Jahre den Gewerbekälteanlagen, dicht gefolgt von Industriekälteanlagen und stationären Klimaanlage (Abbildung 5 und Tabelle 29). Die übrigen Sektoren hatten nur einen sehr kleinen Anteil an der gesamten rückgewonnenen Menge.

Abbildung 5: Rückgewonnene Kältemittelmenge aus Altanlagen im VDKF-LEC Datensatz in den verschiedenen Sektoren

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den ausgewerteten Daten aus VDKF (2023)

Tabelle 29: Rückgewonnene Kältemittelmenge aus Altanlagen in Tonnen im VDKF-LEC Datensatz für Deutschland nach Sektor

Sektor	2017	2018	2019	2020	2021	Summe	Anteil an der Gesamtsumme
2.F.1.a Gewerbeälte	3,505	5,409	3,451	4,699	2,208	19,271	36,37 %
2.F.1.b Haushaltskühlgeräte	0,010	0,001	0,002	0,005	0,002	0,019	0,04 %
2.F.1.c Industriälte	2,445	2,462	2,783	5,553	2,978	16,220	30,61 %
2.F.1.d Transportälte	0,008	0,006	0,000	0,000	0,000	0,013	0,02 %
2.F.1.f Stationäre Klimaanlage	2,903	2,742	4,037	2,531	2,665	14,878	28,08 %
Unbekannt	0,427	0,407	1,009	0,271	0,478	2,592	4,89 %
Gesamt	9,297	11,027	11,281	13,059	8,330	52,993	-

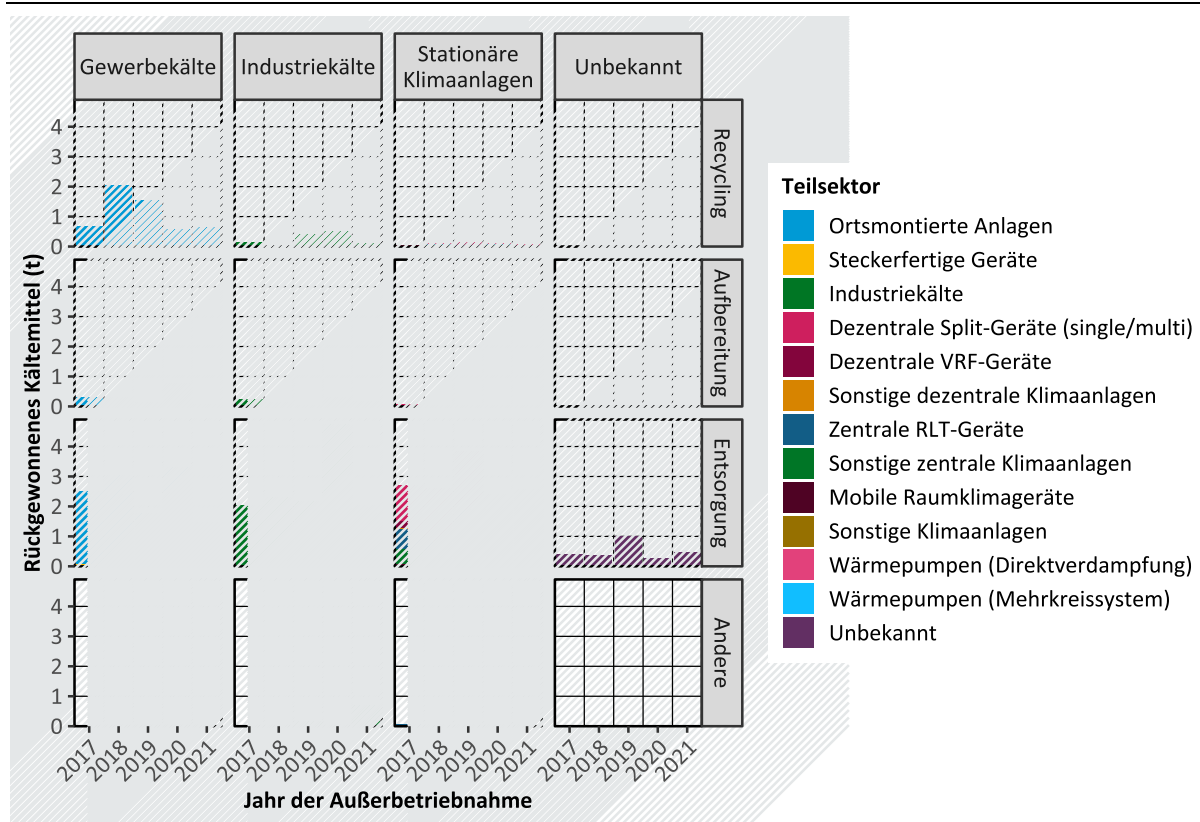
Quelle: VDKF (2023)

Der größte Teil der zurückgewonnenen Kältemittelmenge aus stillgelegten Kälte- und Klimaanlage (RAC-Anlagen) wurde der Entsorgung zugeführt (Abbildung 6 und Tabelle 30). Nur ein kleiner Teil wurde recycelt, und noch weniger wurde zurückgewonnen. Bei Klimaanlage wurde fast das gesamte rückgewonnene Gas der Entsorgung zugeführt. Der

weiterer Verbleib der „entsorgten“ Mengen ist jedoch nicht weiter bekannt. Es ist insbesondere unklar, ob die Mengen zerstört oder anderweitig verwertet wurden.

Insgesamt waren die zurückgewonnenen Mengen in den verschiedenen Sektoren von Jahr zu Jahr unterschiedlich. Auffallend ist, dass das Recycling und in geringerem Maße auch die Rückgewinnung von Kältemitteln, hauptsächlich von R-404A, in der Gewerbekälte erfolgte. Bei der Entsorgung von rückgewonnenem R-404A aus industriellen Kälteanlagen war im Jahr 2020 ein deutlicher Anstieg zu verzeichnen. Dieser hohe Wert ist jedoch, wie oben erwähnt, auf einige wenige große Anlagen zurückzuführen.

Abbildung 6: Rückgewonnene Kältemittelmengen aus den verschiedenen Sektoren und Teilsektoren mit Verbleib im VDKF-LEC Datensatz



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Zahlen aus VDKF (2023)

Anmerkung: Haushaltskühlgeräte und Transportkälte sind nicht dargestellt

Tabelle 30: Verbleib der zurückgewonnenen Kältemittel aus stillgelegten RAC-Anlagen in Tonnen im VDKF-LEC Datensatz

Verbleib	2017	2018	2019	2020	2021	Gesamt
2.F.1.a Gewerbekälte						
Recycling	0,698	2,041	1,543	0,591	0,645	5,519
Aufbereitung	0,308	0,320	0,142	0,795	0,090	1,655
Entsorgung	2,498	3,030	1,766	3,312	1,472	12,079
Handel	0,000	0,018	0,000	0,000	0,000	0,018

Verbleib	2017	2018	2019	2020	2021	Gesamt
Unbekannt	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001

2.F.1.b Haushaltskühlgeräte

Aufbereitung	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,002
Entsorgung	0,010	0,001	0,002	0,003	0,002	0,018

2.F.1.c Industriekälte

Recycling	0,142	0,027	0,419	0,505	0,110	1,203
Aufbereitung	0,262	0,136	0,000	0,299	0,170	0,867
Entsorgung	2,041	2,299	2,183	4,749	1,998	13,270
Hersteller	0,000	0,000	0,130	0,000	0,700	0,830
Unbekannt	0,000	0,001	0,050	0,000	0,000	0,051

2.F.1.d Transportkälte

Recycling	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,004
Entsorgung	0,008	0,002	0,000	0,000	0,000	0,009

2.F.1.f Stationäre Klimatisierung

Recycling	0,049	0,112	0,146	0,123	0,077	0,507
Aufbereitung	0,085	0,033	0,023	0,001	0,016	0,158
Entsorgung	2,704	2,596	3,836	2,399	2,571	14,106
Handel	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Hersteller	0,050	0,000	0,032	0,000	0,000	0,083
Unbekannt	0,007	0,001	0,000	0,007	0,001	0,016

Unbekannt

Recycling	0,000	0,008	0,000	0,004	0,003	0,015
Aufbereitung	0,005	0,012	0,014	0,000	0,000	0,030
Entsorgung	0,422	0,387	0,995	0,267	0,475	2,546
Gesamt	9,297	11,027	11,281	13,059	8,330	52,993

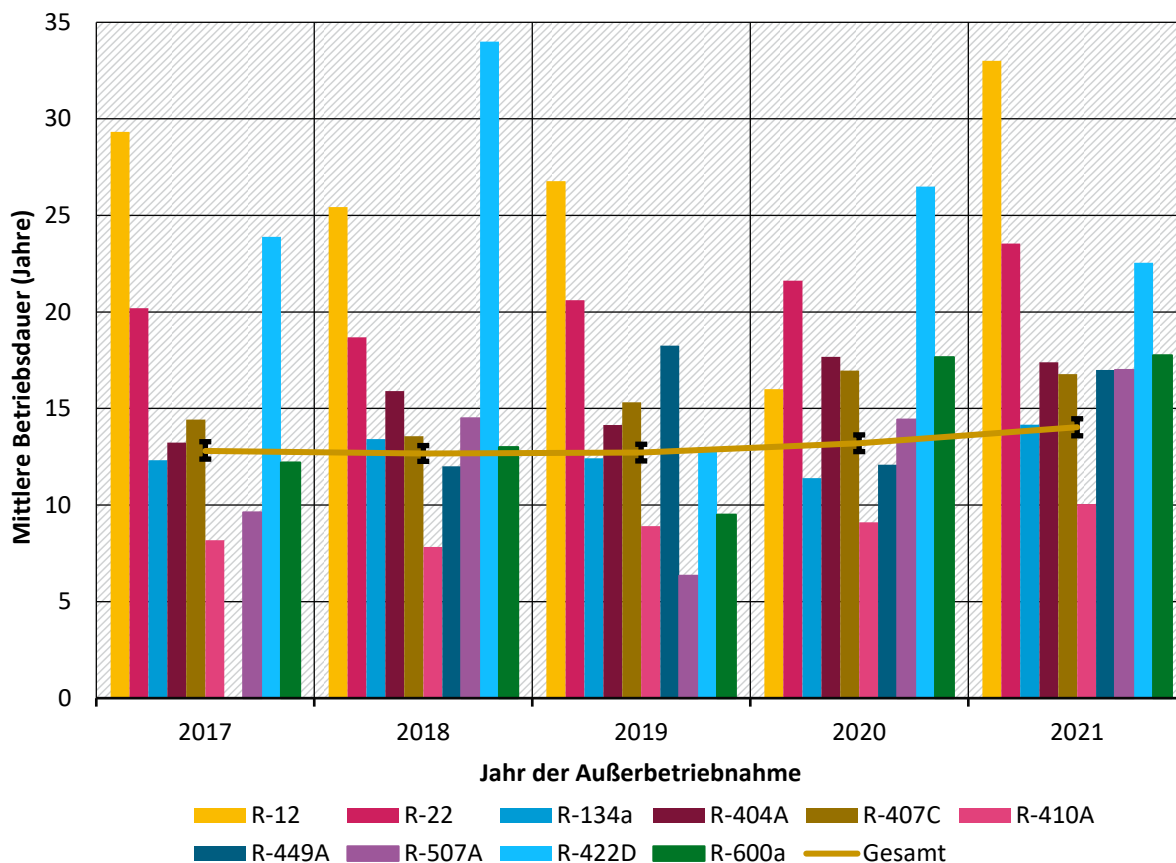
Quelle: VDKF (2023)

7.2.3 Betriebsjahre stillgelegter Anlagen

Betrachtet man die durchschnittlichen Betriebsjahre stillgelegter Anlagen, so lassen sich Zusammenhänge zwischen der Art des Kältemittels und der Lebensdauer der Anlage feststellen. Über die Jahre konnte eine Zunahme der mittleren Betriebsdauer beobachtet werden, die jedoch

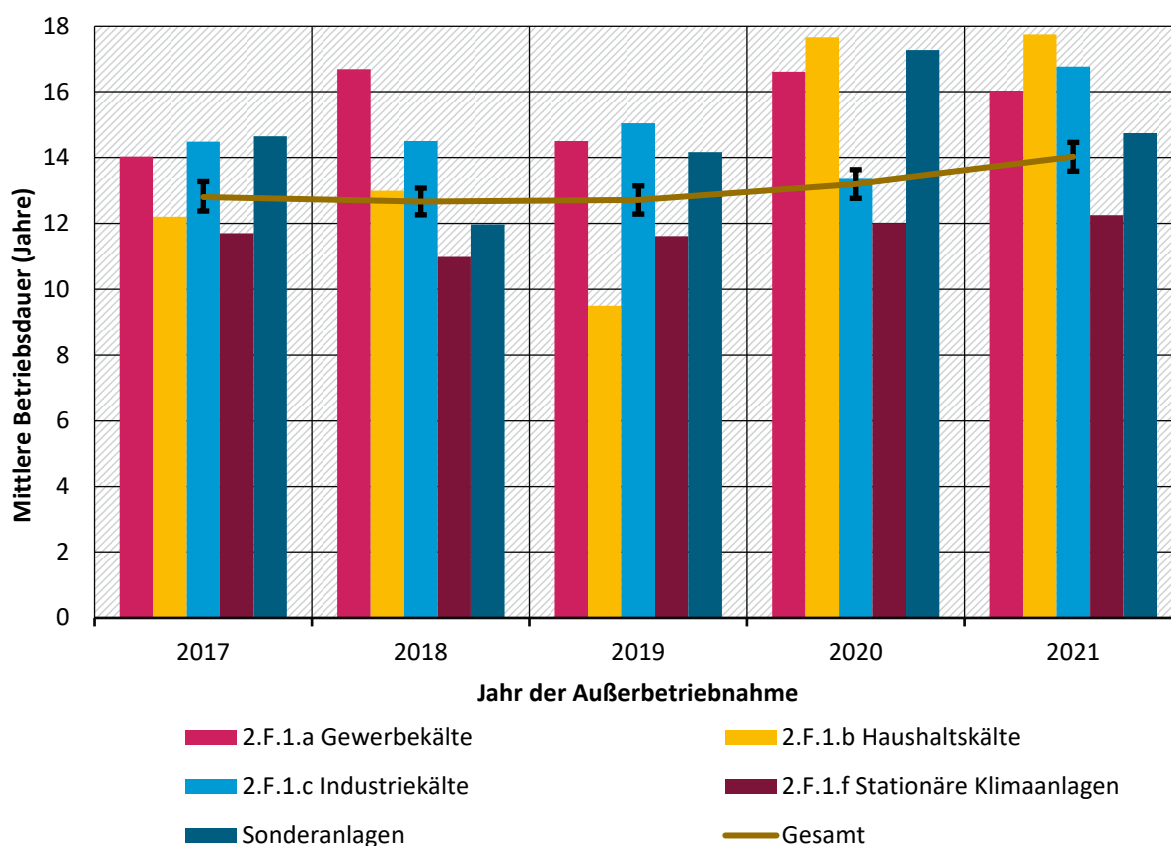
erst ab 2020 und nicht für alle Kältemittel zu finden war (Abbildung 7 und Tabelle 31). Über die Sektoren zeigte sich ebenfalls ein positiver Trend, wenn auch nur von 2019 an und ebenfalls nicht für alle Kältemittel (Abbildung 8).

Abbildung 7: Mittlere Anzahl der Betriebsjahre von stillgelegten RAC-Anlagen in der VDKF-LEC Datenbank nach Kältemittel



Anmerkung: Fehlerbalken sind 95 %-Bootstrap-Konfidenzintervalle für den Gesamtmittelwert basierend auf 1.000 Resamplings.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den ausgewerteten Daten aus VDKF (2023)

Abbildung 8: Mittlere Anzahl der Betriebsjahre von stillgelegten RAC-Anlagen im VDKF-LEC Datensatz nach Sektor

Anmerkung: Fehlerbalken sind 95 %-Bootstrap-Konfidenzintervalle für den Gesamtmittelwert basierend auf 1.000 Resamplings.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den ausgewerteten Daten aus VDKF (2023)

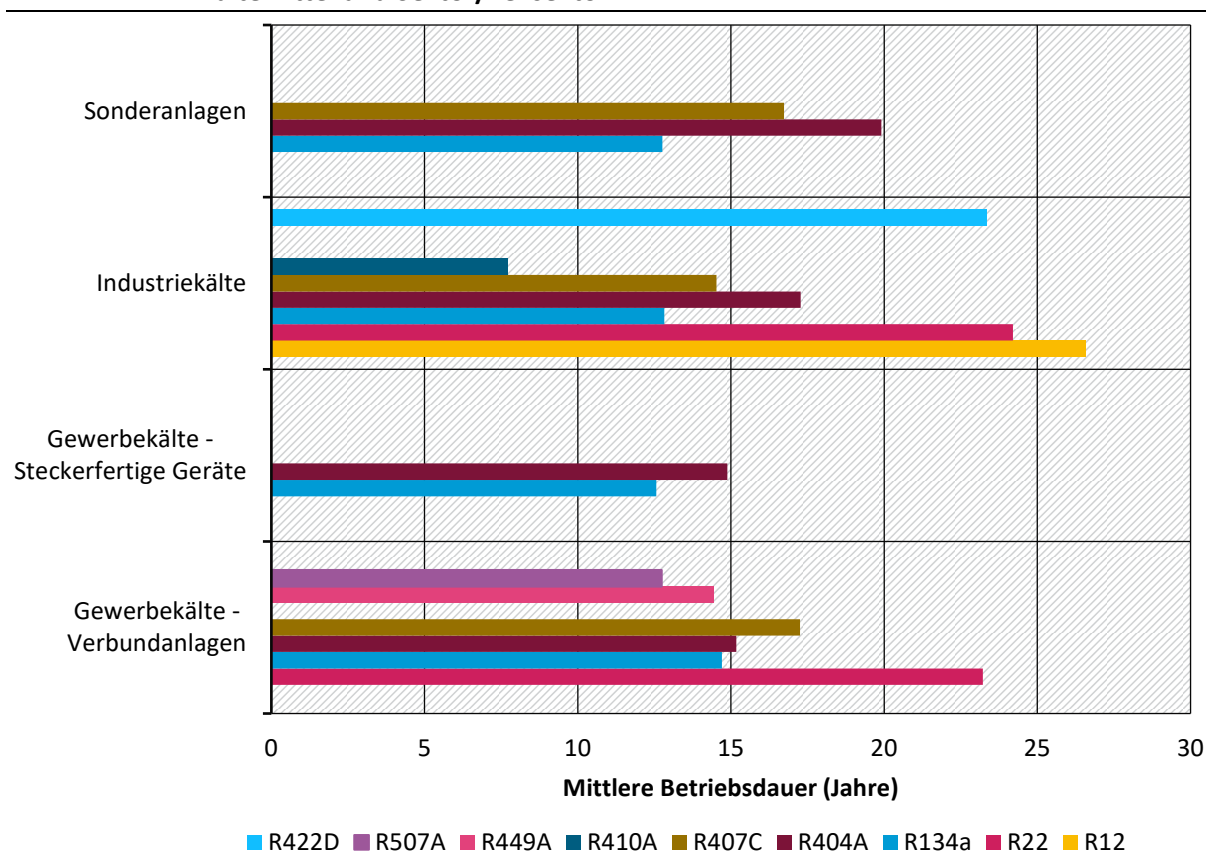
Für Gewerbe-, Industrie- und Sonderanlagen ergaben sich Unterschiede zwischen den Kältemitteln in Bezug auf die Betriebsdauer (Abbildung 9). Anlagen mit R-12 (FCKW) und R-22 (HFCKW) hatten eine deutlich längere Betriebsdauer im Vergleich zu Anlagen mit HFKW und Gemischen. Für Industriekälteanlagen gab es den größten Unterschied. Hier war die mittlere Betriebsdauer von R-12-Anlagen 19 Jahre länger als die der R-410A-Anlagen. Ein direkter Vergleich ist hier allerdings weitgehend unzulässig, da es sich bei den R-410A-Anlagen ziemlich sicher um einen anderen Gerätetyp handelte als die R-12-Anlagen. Dies zeigt auch die mittlere Erstfüllmenge, die bei den R-410A-Anlagen bei 5,7 kg lag, bei den R-12-Anlagen jedoch bei 0,6 kg (Tabelle 31). Interessanterweise handelte es sich bei den R-22-Anlagen um deutlich größere Anlagen mit einer mittleren Erstfüllmenge von 53 kg. Hinzu kommt, dass FCKW- und HFCKW-Anlagen seit vielen Jahren nicht mehr gebaut werden, und es sich bei den außer Betrieb genommenen Geräten um die letzten und ältesten Anlagen dieses Typs handelt.

Innerhalb der Teilsektoren der Gewerbekälte gab es kleinere Unterschiede zwischen den verschiedenen HFKW und Gemischen. Für ortsmontierte Anlagen waren die meisten Kältemittel aus Anlagen mit vergleichbarer Füllmenge, mit Ausnahme von R-404A- und R-449A-Anlagen, die eine vergleichbare, aber insgesamt höhere Füllmenge aufwiesen. Wie oben beschrieben, hatten Anlagen mit R-22 eine deutlich längere Lebensdauer als Anlagen mit anderen Kältemitteln. Innerhalb der Kältemittel mit geringerer Füllmenge hatten Anlagen mit R-407C die längste Lebensdauer nach R-22-Anlagen. Anlagen mit R-507A wiesen die kürzeste Betriebsdauer auf, wobei der Unterschied zu R-407C-Anlagen im Mittel bei ca. vier Jahren lag. R-404A-Anlagen

hatten die längste Betriebsdauer in dieser Gruppe, wobei die Unterschiede mit unter vier Jahren hier insgesamt gering waren. Zwischen R-404A- und R-449A-Anlagen war der Unterschied in der Betriebsdauer mit unter einem Jahr sehr klein. Bei steckerfertigen Geräten war die Füllmenge von R-134a-Geräten tendenziell geringer und die Lebensdauer etwas kürzer als bei Geräten mit R-404A.

Für Industriekälteanlagen konnten deutlich kürzere Betriebsdauern für R-410A-Anlagen beobachtet werden. Ein direkter Vergleich ist in diesem Sektor aufgrund der fehlenden Teilsektoren, wie oben beschrieben, allerdings nicht sinnvoll. Gleiches gilt für Sonderanlagen, da hier der Gerätetyp unbekannt ist.

Abbildung 9: Mittlere Anzahl der Betriebsjahre von stillgelegten Gewerbe-, Industrie- und Sonderanlagen im VDKF-LEC Datensatz über die Jahre 2017 bis 2021 nach Kältemittel und Sektor/Teilsektor



Anmerkung: Haushaltskühlgeräte sind nicht gezeigt, da es hier nur ein Kältemittel gab.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den ausgewerteten Daten aus VDKF (2023)

Tabelle 31: Statistische Parameter zu Betriebsjahren von Altanlagen im VDKF-LEC Datensatz

Kältemittel	Mittlere Betriebsjahre	Unteres 95 %-KI (Betriebsjahre)	Oberes 95 %-KI (Betriebsjahre)	Anzahl Anlagen	Mittlere Erstfüllmenge (kg)
2.F.1.a Gewerbekälte - Ortsmontierte Anlagen					
R-22	23,2	21,3	25,1	69	18,5
R-134a	14,7	13,4	16,2	161	17,5
R-404A	15,2	14,3	15,9	382	43,2

Kältemittel	Mittlere Betriebsjahre	Unteres 95 %-KI (Betriebsjahre)	Oberes 95 %-KI (Betriebsjahre)	Anzahl Anlagen	Mittlere Erstfüllmenge (kg)
R-407C	17,3	15,4	19,1	63	20,3
R-449A	14,4	11,3	17,7	25	38,4
R-507A	12,7	10,4	15,5	35	22,9

2.F.1.a Gewerbekälte - Steckerfertige Geräte

R-134a	12,6	11,1	14,1	41	1,0
R-404A	14,9	13,6	16,2	70	1,7

2.F.1.b Haushaltskühlgeräte

R-600a	12,8	10,8	14,8	25	0,0
--------	------	------	------	----	-----

2.F.1.c Industriekälte

R-12	26,6	25,5	27,6	40	0,6
R-22	24,2	22,6	25,8	63	53,1
R-134a	12,8	12,3	13,5	629	9,7
R-404A	17,3	15,7	18,7	103	48,4
R-407C	14,5	13,6	15,4	205	22,4
R-410A	7,7	6,4	9,0	28	5,7
R-422D	23,4	19,6	27,0	25	53,8

2.F.1.f Stationäre Klimaanlage - Dezentrale Split-Geräte (single/multi)

R-22	18,4	17,6	19,3	226	2,9
R-134a	12,6	11,4	13,9	75	1,0
R-407C	15,0	14,6	15,4	608	4,1
R-410A	8,9	8,7	9,2	1512	2,7

2.F.1.f Stationäre Klimaanlage - Dezentrale VRF-Geräte

R-407C	14,9	13,4	16,5	37	9,6
R-410A	8,2	7,3	9,1	124	12,6

2.F.1.f Stationäre Klimaanlage - Zentrale Raumluftechnik-Geräte

R-22	21,7	19,4	24,4	32	12,8
R-407C	16,8	15,7	18,0	79	23,0
R-410A	7,9	6,9	9,0	54	5,1

Kältemittel	Mittlere Betriebsjahre	Unteres 95 %-KI (Betriebsjahre)	Oberes 95 %-KI (Betriebsjahre)	Anzahl Anlagen	Mittlere Erstfüllmenge (kg)
-------------	------------------------	---------------------------------	--------------------------------	----------------	-----------------------------

2.F.1.f Stationäre Klimaanlage - Sonstige zentrale Klimaanlage

R-22	19,7	17,9	21,4	53	15,0
R-134a	10,1	8,9	11,2	125	9,9
R-407C	14,8	13,9	15,6	121	12,7
R-410A	9,3	8,5	10,1	84	4,6

2.F.1.f Stationäre Klimaanlage - Wärmepumpen (Direktverdampfung)

R-410A	7,6	5,7	9,4	25	10,9
--------	-----	-----	-----	----	------

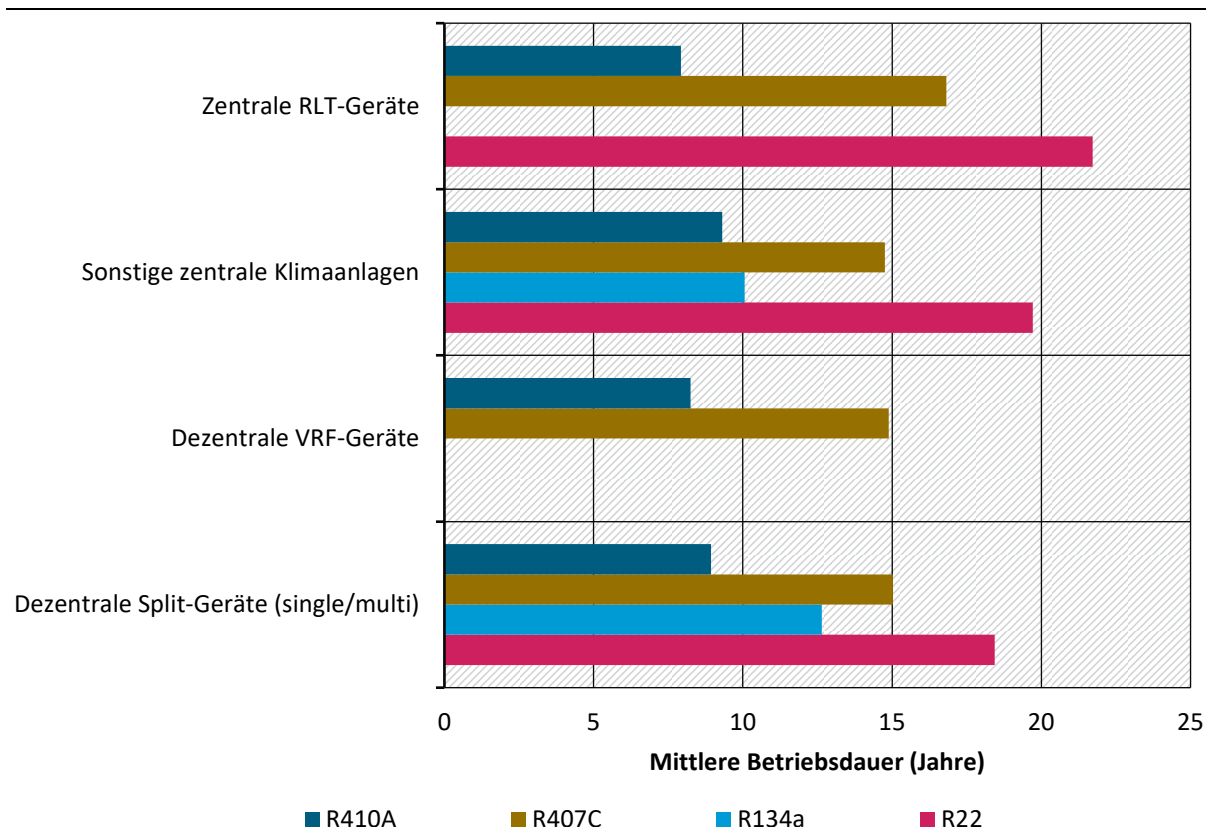
Unbekannt

R-134a	12,8	11,6	14,0	142	2,1
R-404A	19,9	16,8	23,4	33	14,6
R-407C	16,7	14,9	18,4	44	24,6

Anmerkung: 95 % KI ist das 95 %-Bootstrap-Konfidenzintervall des Mittelwerts basierend auf 1.000 Resamplings.

Quelle: VDKF (2023)

Für stationäre Klimaanlage war der Unterschied in der Betriebsdauer je Kältemittel ebenfalls zu finden (Abbildung 10). In jedem Teilssektor gab es im Mittel über die Jahre 2017 bis 2021 einen deutlichen Unterschied zwischen der Lebensdauer stillgelegter Anlagen in Abhängigkeit vom rückgewonnenen Kältemittel. R-22-Anlagen wiesen in allen Teilssektoren die längste Lebensdauer auf. Auffallend war die deutlich längere Lebensdauer von Anlagen mit R-407C im Vergleich zu solchen mit R-410A, der in allen Teilssektoren zu finden war. Der Unterschied in der Lebensdauer lag hier je nach Teilssektor bei ca. fünf bis neun Jahren.

Abbildung 10: Mittlere Anzahl der Betriebsjahre von stillgelegten stationären Klimaanlage in der VDKF-LEC Datenbank über die Jahre 2017 bis 2021 nach Teilsektor und Kältemittel

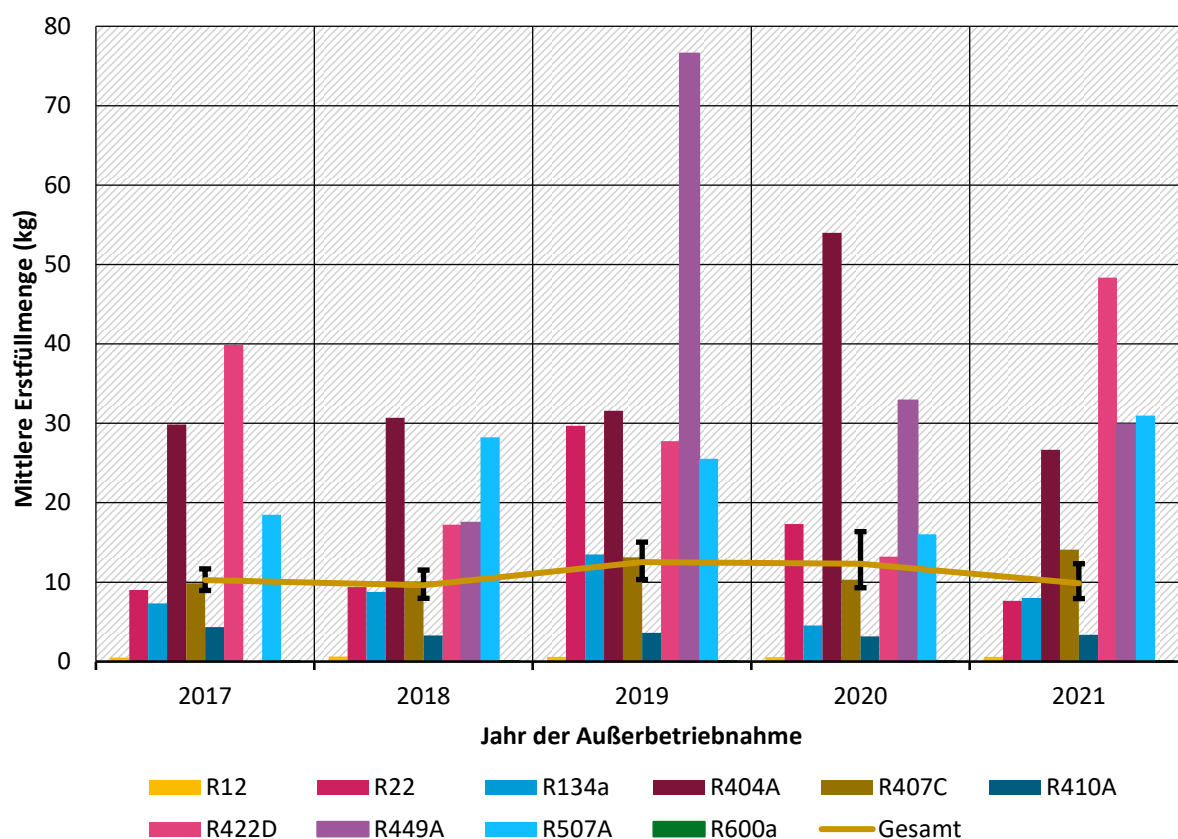
Anmerkung: Wärmepumpen (Direktverdampfung) sind nicht gezeigt, da es hier nur ein Kältemittel gab.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den ausgewerteten Daten aus VDKF (2023)

Zumindest für zentrale RLT-Geräte und in geringerem Umfang für sonstige zentrale Klimaanlage könnte sich der Unterschied in der Rückgewinnungsrate mit dem Gerätetyp erklären lassen. In diesen Teilsektoren haben die Anlagen mit R-407C eine deutlich höhere mittlere Erstfüllmenge als Anlagen mit R-410A (Abbildung 10). Dieser Effekt ist jedoch in den anderen Teilsektoren weniger erkennbar. Als weitere Erklärung kann die Anzahl der Geräte angeführt werden, die in die Berechnung eingegangen ist. Betrachtet man diese, so lässt sich tatsächlich ein Unterschied in den Teilsektoren Split- und VRF-Geräte erkennen (Tabelle 31). Hier überwiegen die Geräte mit R-410A im Verhältnis zu jenen mit R-407C. Für die anderen Teilsektoren ist der Unterschied jedoch deutlich geringer, und in jedem Teilsektor sind alle Kältemittel mit diversen Anlagen vertreten, sodass sich ein vertrauenswürdiger Mittelwert ableiten lassen sollte, der für alle Kältemittel Gültigkeit hat.

7.2.4 Erstfüllmenge stillgelegter Anlagen

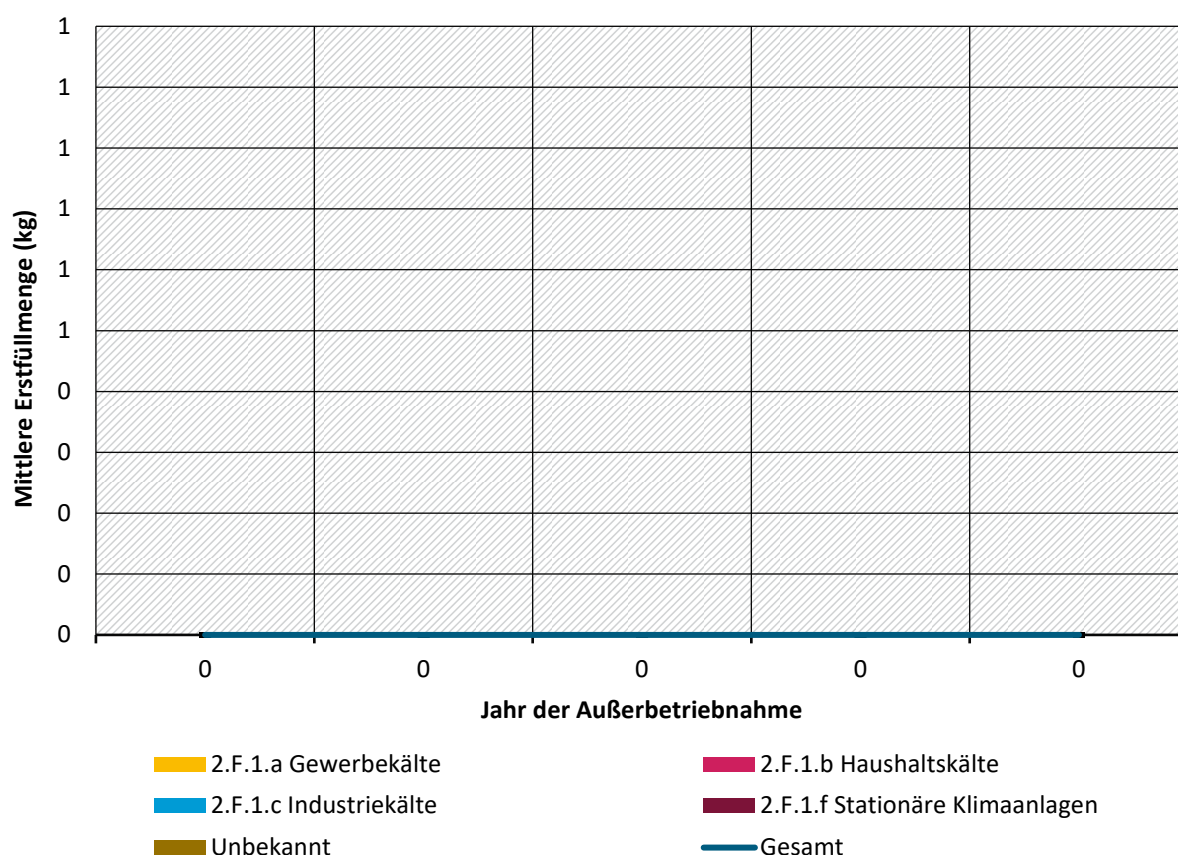
Die mittlere Erstfüllmenge stillgelegter RAC-Anlagen war über die Jahre relativ stabil (Abbildung 11 und Abbildung 12). In den Jahren 2019 und 2020 waren die Mengen im Mittel etwas höher, da hier einzelne Anlagen mit größeren Erstfüllmengen entsorgt wurden. Im Jahr 2019 war es maßgeblich eine R-449A-Anlage aus der Gewerbekälte mit einer Erstfüllmenge von 210 kg und im Jahr 2020 eine R-404-Anlage aus der Industriekälte mit 1.800 kg Erstfüllmenge.

Abbildung 11: Mittlere Erstfüllmenge stillgelegter RAC-Anlagen im VDKF-LEC Datensatz nach Jahr der Außerbetriebnahme und Kältemittel

Anmerkung: Fehlerbalken sind 95 %-Bootstrap-Konfidenzintervalle für den Gesamtmittelwert basierend auf 1.000 Resamplings.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den ausgewerteten Daten aus VDKF (2023)

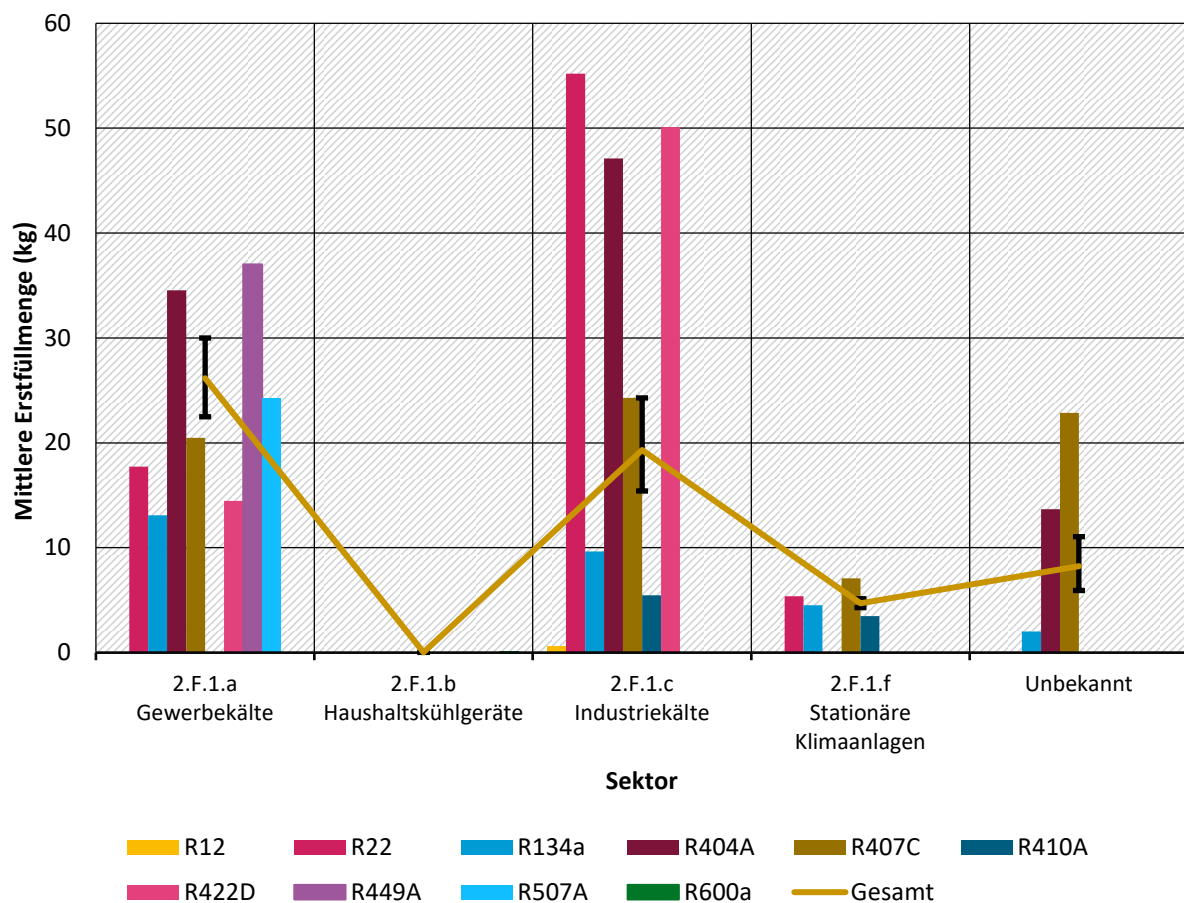
Abbildung 12: Mittlere Erstfüllmenge stillgelegter RAC-Anlagen [kg] im VDKF-LEC Datensatz nach Jahr der Außerbetriebnahme und Sektor



Anmerkung: Fehlerbalken sind 95 %-Bootstrap-Konfidenzintervalle für den Gesamtmittelwert basierend auf 1.000 Resamplings.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den ausgewerteten Daten aus VDKF (2023)

Zwischen den Sektoren und Kältemitteln gab es sehr große Unterschiede in der Erstfüllmenge der Anlagen. Dies war zu erwarten, da es sich hierbei um unterschiedliche Equipment-Typen handelte (Abbildung 13). Betrachtet man den Unterschied im Mittelwert und Median der Füllmengen der Anlagen in den unterschiedlichen Sektoren und Teilsektoren nach Kältemittel zeigt sich ein systematischer Unterschied (Tabelle 32). Die Mediane lagen in den allermeisten Fällen erheblich unter den jeweiligen Mittelwerten, was zeigt, dass die Verteilung der Füllmengen stark rechtsschief war, also die Mehrheit der Anlagen je Teilsektor und Kältemittel kleinere Füllmengen hatten und nur sehr wenige Anlagen größere Füllmengen.

Abbildung 13: Mittlere Erstfüllmenge stillgelegter RAC-Anlagen im VDKF-LEC Datensatz nach Sektor und Kältemittel

Anmerkung: Fehlerbalken sind 95 %-Bootstrap-Konfidenzintervalle für den Gesamtmittelwert basierend auf 1.000 Resamplings.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den ausgewerteten Daten aus VDKF (2023)

Tabelle 32: Statistische Parameter zu Erstfüllmengen in kg von Altanlagen im VDKF-LEC Datensatz

Sektor	Teilsektor	Kälte-mittel	Anzahl Anlagen	Füllmenge (kg)			
				Mittelwert	Unteres 95 %-KI	Oberes 95 %-KI	Median
2.F.1.a Gewerbe-kälte	Ortsmontierte Anlagen	R-22	75	17,740	12,435	23,740	10,000
		R-134a	178	16,640	10,638	24,193	3,600
		R-404A	419	41,049	33,792	48,840	10,000
		R-407C	67	20,476	14,655	26,782	9,000
		R-422D	33	14,461	8,911	21,568	8,000
		R-449A	26	37,015	20,583	57,398	14,150
		R-507A	45	24,257	16,977	33,000	15,000

Sektor	Teilsektor	Kälte- mittel	Anzahl Anlagen	Füllmenge (kg)			
				Mittelwert	Unteres 95 %-KI	Oberes 95 %-KI	Median
2.F.1.b Haushalts- kälte	Steckerfertige Geräte	R-134a	52	0,957	0,698	1,269	0,700
		R-404A	83	1,704	1,306	2,246	1,000
	Haushalts- kühlgeräte	R-600a	25	0,029	0,022	0,041	0,020
2.F.1.c Industrie- kälte	-	R-12	40	0,597	0,557	0,637	0,600
		R-22	65	55,192	33,920	80,242	12,000
		R-134a	639	9,633	6,449	13,455	0,800
		R-404A	106	47,123	20,501	90,040	5,500
		R-407C	217	24,292	19,939	29,615	9,500
		R-410A	34	5,480	3,562	8,058	3,250
		R-422D	34	50,118	31,881	71,816	32,500
2.F.1.f Stationäre Klimaan- lagen	Dezentrale Split-Geräte (single/multi)	R-22	291	2,667	2,327	3,061	1,750
		R-134a	179	0,782	0,668	0,910	0,600
		R-407C	703	4,095	3,329	5,071	2,000
		R-410A	1792	2,641	2,498	2,798	1,700
	Dezentrale VRF-Geräte	R-407C	40	10,106	6,005	16,251	5,800
		R-410A	140	12,019	9,708	15,123	8,000
	Sonstige dezentrale Klimaanlagen	R-407C	36	1,643	1,436	1,859	1,700
		R-410A	30	1,625	1,405	1,850	1,400
	Zentrale RLT- Geräte	R-22	39	11,791	7,947	16,297	5,000
		R-407C	88	24,010	18,671	30,066	12,000
		R-410A	56	4,930	3,255	7,134	3,000
	Sonstige zentrale Klimaanlagen	R-22	54	15,373	8,393	23,737	2,600
		R-134a	128	9,736	2,706	19,261	0,625
		R-407C	126	12,511	8,862	16,750	3,725
		R-410A	87	4,529	3,355	6,076	2,800

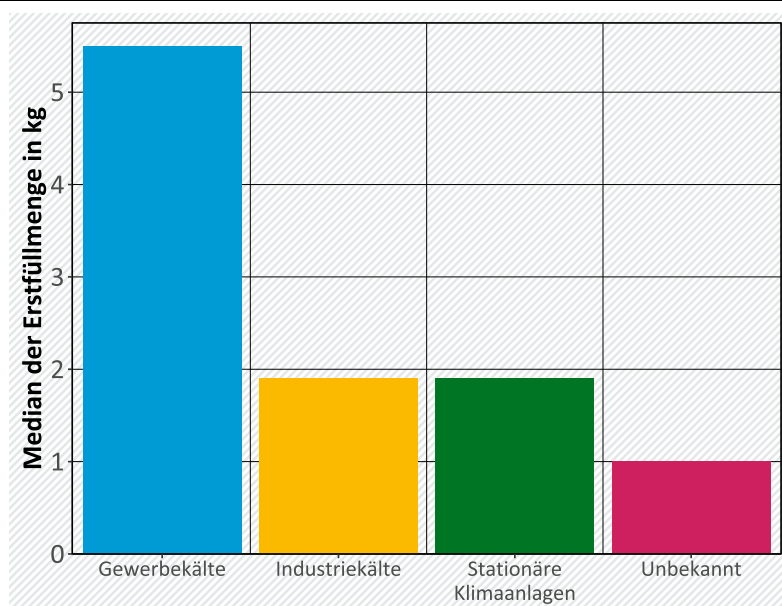
Sektor	Teilsektor	Kältemittel	Anzahl Anlagen	Füllmenge (kg)			
				Mittelwert	Unteres 95 %-KI	Oberes 95 %-KI	Median
	Wärmepumpen (Direktverdampfung)	R-410A	27	11,824	7,613	17,228	6,500
Unbekannt	-	R-134a	151	2,026	1,025	3,377	0,650
		R-404A	36	13,678	5,300	29,586	4,000
		R-407C	51	22,863	17,119	29,091	14,000

Anmerkung: 95 %-KI ist das 95 %-Bootstrap-Konfidenzintervall des Mittelwerts basierend auf 1.000 Resamplings.

Quelle: VDKF (2023)

Betrachtet man jedoch die Mediane der Füllmengen der Anlagen in den verschiedenen Teilsektoren, fällt auf, dass diese in aller Regel sehr niedrig waren (Abbildung 14 und Tabelle 33). Besonders auffallend ist der Sektor der Industriekälte, der im Median eine Füllmenge von 1,9 kg aufwies, wobei 75 % der Anlagen weniger als 10 kg Füllmenge enthielten, 67 % weniger als 5 kg und 37 % weniger als 1 kg. Damit ist der Industriekältesektor nicht repräsentativ, da hier in aller Regel große bis sehr große Anlagen Verwendung finden. Es ist anzunehmen, dass der VDKF-LEC Datensatz für diesen Sektor auch kleine Klimageräte einschließt, die fälschlicherweise als Industriekälteanlagen in die Datenbank eingegeben wurden. Diese Vermutung wird durch die Tatsache erhärtet, dass der Industriekältesektor im VDKF-LEC Datensatz auch Anlagen mit R-410A und R-407C, beides klassische Klimaanlage-Kältemittel, enthält (siehe).

Abbildung 14: Mediane der Erstfüllmengen von außer Betrieb genommenen Anlagen im VDKF-LEC Datensatz



Quelle: Eigene Abbildung basierend auf Daten aus VDKF (2023)

Anmerkung: Haushaltskühlgeräte nicht dargestellt

Tabelle 33: Füllmengenparameter der Anlagen im VDKF-LEC Datensatz

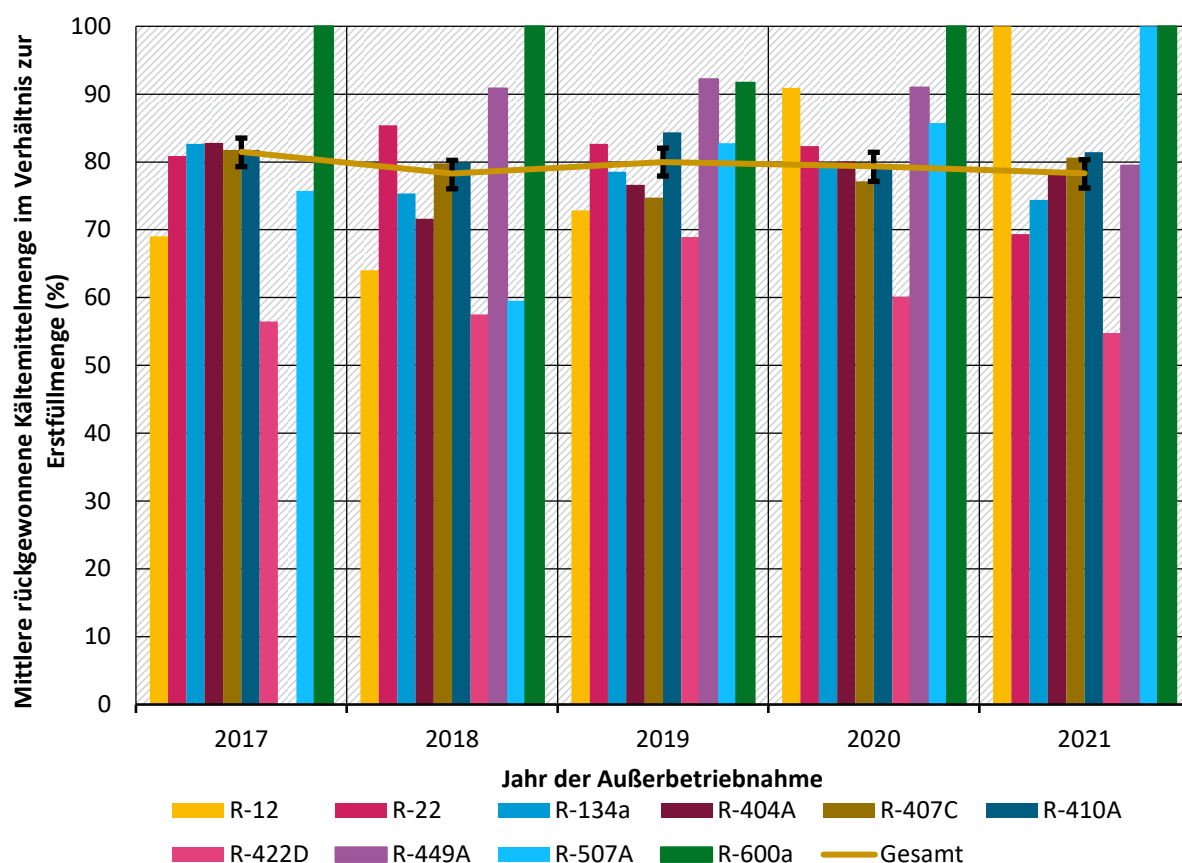
Sektor	Teilsektor	Median der Füllmenge (kg)	Anteil an der Anzahl der Anlagen		
			<10 kg	<5 kg	<1 kg
2.F.1.a Gewerbekälte	Ortsmontierte Anlagen	8,0	56 %	37 %	6 %
	Steckerfertige Geräte	1,0	99 %	95 %	41 %
2.F.1.b Haushaltskälte	Haushaltskühlgeräte	0,02	100 %	100 %	100 %
2.F.1.c Industriekälte	Industriekälte	1,9	75 %	67 %	37 %
2.F.1.f Stationäre Klimaanlage	Dezentrale Split-Geräte (single/multi)	1,7	98 %	90 %	18 %
	Dezentrale VRF-Geräte	7,5	63 %	35 %	5 %
	Sonstige dezentrale Klimaanlage	1,5	100 %	100 %	11 %
	Zentrale RLT-Geräte	6,6	62 %	44 %	12 %
	Sonstige zentrale Klimaanlage	2,0	83 %	75 %	33 %
	Wärmepumpen (Direktverdampfung)	6,5	67 %	22 %	0 %
Unbekannt	Unbekannt	1,0	80 %	72 %	49 %

Quelle: VDKF (2023)

7.2.5 Rückgewinnungsraten

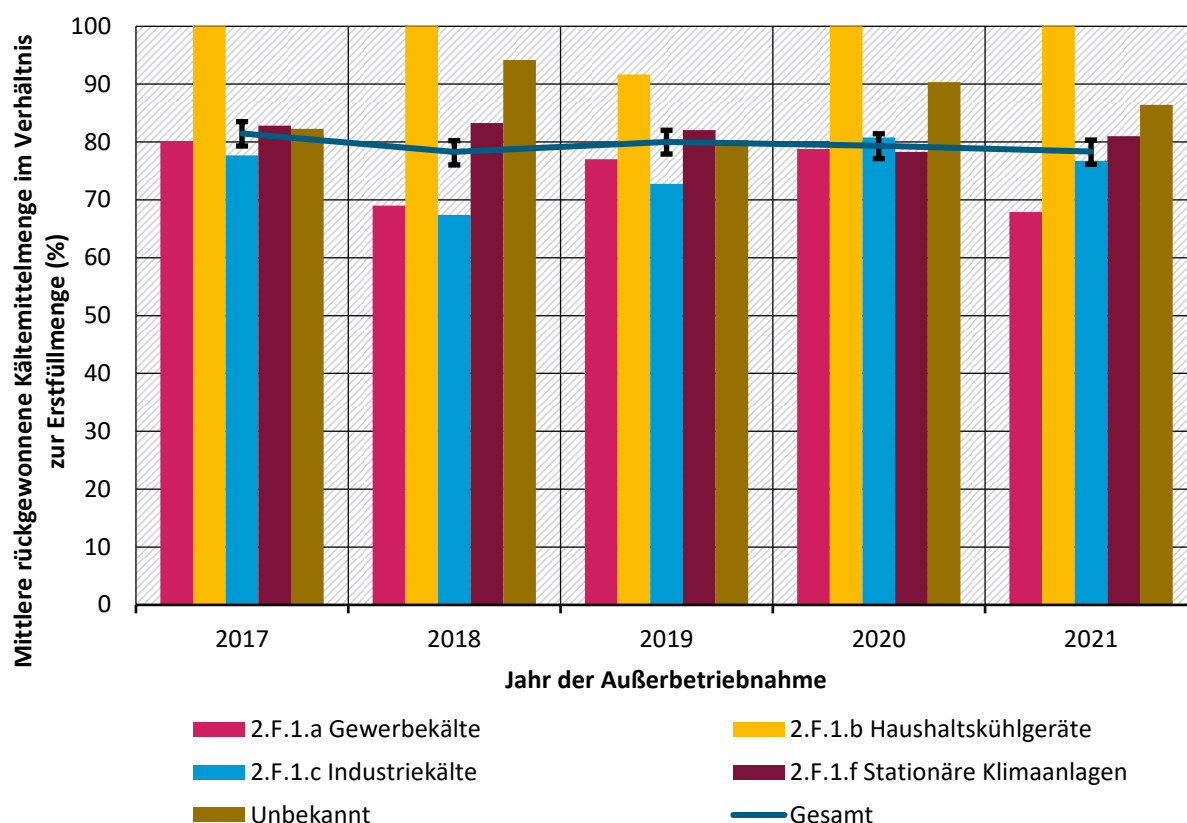
Die Menge des zurückgewonnenen Kältemittels im Verhältnis zur ursprünglichen Füllmenge (Erstfüllmenge) aus stillgelegten Anlagen (im Folgenden als „Rückgewinnungsrate“ bezeichnet) zeigte in der VDKF-LEC Datenbank keine klaren Trends über die Jahre nach Kältemittel (Abbildung 15) oder Sektor (Abbildung 16). Da es keine klaren Unterschiede zwischen den Jahren hinsichtlich der relevanten Parameter gab, wird im Folgenden stets über alle Jahre gemittelt.

Abbildung 15: Mittlere Rückgewinnungsrate von Kältemitteln aus stillgelegten RAC-Anlagen nach Kältemittel im VDKF-LEC Datensatz



Anmerkung: Fehlerbalken sind 95 %-Bootstrap-Konfidenzintervalle für den Gesamtmittelwert basierend auf 1.000 Resamplings.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den ausgewerteten Daten aus VDKF (2023)

Abbildung 16: Mittlere Rückgewinnungsrate von Kältemitteln aus stillgelegten RAC-Anlagen nach Sektor im VDKF-LEC Datensatz

Anmerkung: Fehlerbalken sind 95 %-Bootstrap-Konfidenzintervalle für den Gesamtmittelwert basierend auf 1.000 Resamplings.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den ausgewerteten Daten aus VDKF (2023)

Tabelle 34: Statistische Parameter zu Rückgewinnungsraten von Kältemitteln aus Altanlagen im VDKF-LEC Datensatz

Sektor	Teilsektor	Kälte-mittel	Anzahl Anlagen	Rückgewinnungsrate		
				Mittelwert (%)	Unteres 95 %-KI (%)	Oberes 95 %-KI (%)
2.F.1.a Gewerbekälte	Ortsmontierte Anlagen	R-22	75	79,7	71,2	87,4
		R-134a	178	73,2	67,2	79,3
		R-404A	419	77,5	73,6	81,4
		R-407C	67	63,1	51,7	73,6
		R-422D	33	63,6	47,4	78,7
		R-449A	26	88,1	76,6	97,5
		R-507A	45	72,4	59,6	83,9
		R-134a	52	58,8	45,1	71,5

Sektor	Teilsektor	Kälte- mittel	Anzahl Anlagen	Rückgewinnungsrate		
				Mittelwert (%)	Unteres 95 %-KI (%)	Oberes 95 %-KI (%)
	Steckerfertige Geräte	R-404A	83	75,7	66,0	84,0
2.F.1.b Haushaltskälte	Haushalts- kühlgeräte	R-600a	25	96,7	92,0	100,0
2.F.1.c Industriekälte	-	R-12	40	70,3	59,9	79,9
		R-22	65	78,0	69,5	86,5
		R-134a	639	76,7	73,6	79,6
		R-404A	106	76,7	68,7	84,2
		R-407C	217	75,3	69,9	80,8
		R-410A	34	57,2	40,8	73,1
		R-422D	34	54,1	39,3	67,9
2.F.1.f Stationäre Klimaanlagen	Dezentrale Split- Geräte (single/multi)	R-22	291	83,2	78,5	87,4
		R-134a	179	96,2	93,4	98,7
		R-407C	703	84,1	81,4	86,7
		R-410A	1792	83,0	81,3	84,6
	Dezentrale VRF- Geräte	R-407C	40	73,8	60,7	85,4
		R-410A	140	78,2	72,1	84,5
	Sonstige dezentrale Klimaanlagen	R-407C	36	88,3	77,9	96,8
		R-410A	30	86,4	73,8	96,4
	Zentrale RLT- Geräte	R-22	39	85,0	74,4	94,9
		R-407C	88	75,0	66,2	83,2
		R-410A	56	68,7	58,3	78,6
	Sonstige zentrale Klimaanlagen	R-22	54	77,2	65,5	86,7
		R-134a	128	56,9	48,5	65,6
		R-407C	126	69,4	61,8	77,3
		R-410A	87	72,1	63,0	81,3
	Wärmepumpen (Direktver- dampfung)	R-410A	27	78,0	63,0	92,6

Sektor	Teilsektor	Kälte- mittel	Anzahl Anlagen	Rückgewinnungsrate		
				Mittelwert (%)	Unteres 95 %-KI (%)	Oberes 95 %-KI (%)
Unbekannt	-	R-134a	151	90,7	85,7	94,8
		R-404A	36	90,2	80,2	98,2
		R-407C	51	69,3	57,7	80,3

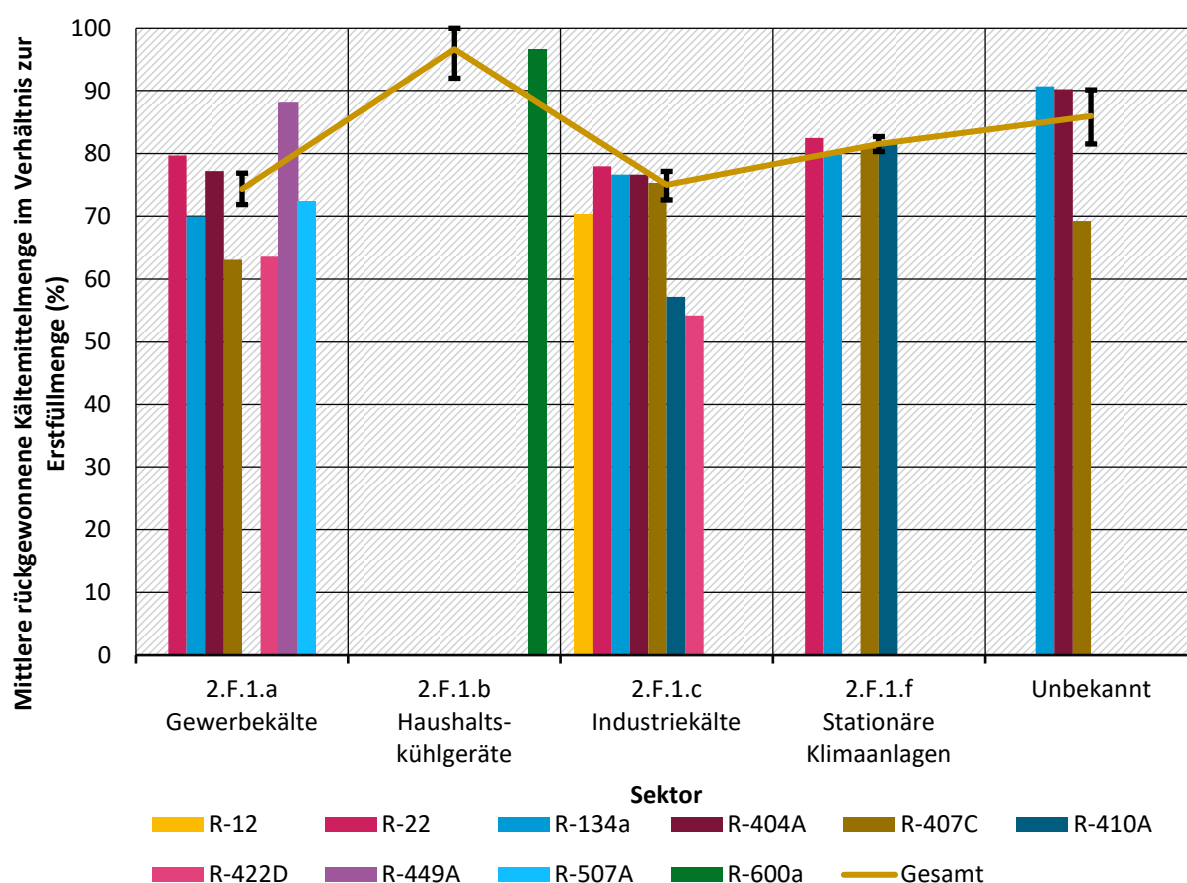
Anmerkung: 95 % KI ist das 95 %-Bootstrap-Konfidenzintervall des Mittelwerts basierend auf 1.000 Resamplings.

Quelle: VDKF (2023)

Zwischen den Sektoren gab es teilweise größere Unterschiede, wobei die Haushaltskühlgeräte mit 96,7 % die höchste mittlere Rückgewinnungsrate verzeichneten (Abbildung 16 und Tabelle 34). Allerdings handelte es sich hier nur um das Kältemittel Isobutan (R-600a), was einen Vergleich erschwerte, da in keinem anderen Sektor natürliche Kältemittel in genügender Anzahl zur Analyse vorlagen. Weiterhin waren nur wenige Haushaltskühlgeräte im VDKF-LEC-Datensatz vorhanden und werden dort auch nicht regelhaft berichtet (siehe Tabelle 35). Die wenigen Geräte waren somit nicht repräsentativ. Unbekannte Anlagen wiesen mit 84,3 % die zweithöchste Rückgewinnungsrate auf. Da der Anlagentyp hier aber unbekannt ist, kann keine weitere Analyse erfolgen. Es fällt jedoch auf, dass in diesem Sektor die Kältemittel R-22 und R-407C eine deutlich niedrigere mittlere Rückgewinnungsrate aufwiesen als R-134a und R-404A.

Stationäre Klimaanlage hatten im Mittel über alle Teilsektoren eine höhere Rückgewinnungsrate als Industrie- und Gewerbekälteanlagen. Die niedrigste Rückgewinnungsrate im gesamten VDKF-LEC Datensatz hatte allerdings der Teilsektor der undefinierten zentralen Klimaanlage.

Für stationäre Klimaanlage fällt auf, dass die Art des Kältemittels nahezu keinen Einfluss auf die Rückgewinnungsrate hatte, während es bei Industrie- und Gewerbekälteanlagen größere Unterschiede gab. Für Industriekälteanlagen gab es keine Information zu Teilsektoren, daher könnte die niedrigere Rückgewinnungsrate von R-410A und R-422D, und in geringerem Umfang R-22, im Verhältnis zu anderen Kältemitteln, mit der Art des Equipments erklärbar sein. Für Gewerbekälteanlagen war der Unterschied zwischen R-134a und R-404A maßgeblich in steckerfertigen Anlagen zu finden, obwohl der Trend der höheren Rückgewinnungsrate für R-404A in beiden Teilsektoren vorlag. Auffallend war die höhere Rückgewinnungsrate von R-449A sowie die niedrigere Rate für R-407C und R-422D im Vergleich zu anderen Kältemitteln in ortsmontierten Anlagen.

Abbildung 17: Mittlere Rückgewinnungsraten über alle Jahre von Kältemitteln aus stillgelegten RAC-Anlagen nach Sektor im VDKF-LEC Datensatz

Anmerkung: Fehlerbalken sind 95 %-Bootstrap-Konfidenzintervalle für den Gesamtmittelwert basierend auf 1.000 Resamplings.

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den ausgewerteten Daten aus VDKF (2023)

Tabelle 35: Mittlere Rückgewinnungsraten über alle Kältemittel und Jahre im VDKF-LEC Datensatz nach Sektor und Teilsektor

Sektor und Teilsektor	Anzahl Anlagen	Mittlere Rückgewinnungsrate (%)	Unteres 95 %-KI (%)	Oberes 95 %-KI (%)
2.F.1.a Gewerbekälte	978	74,3	71,9	76,9
Steckerfertige Geräte	135	69,2	62,0	76,2
Ortsmontierte Anlagen	843	75,2	72,5	77,6
2.F.1.b Haushaltskühlgeräte	25	96,7	92,0	100
2.F.1.c Industriekälte	1135	75,0	72,6	77,2
2.F.1.f Stationäre Klimaanlage	3.816	81,6	80,3	82,7
Dezentrale Split-Geräte (single/multi)	2.965	84,1	82,8	85,4
Dezentrale VRF-Geräte	180	77,2	71,3	83,0
Sonstige zentrale Klimaanlage	395	67,0	62,7	71,3

Sektor und Teilsektor	Anzahl Anlagen	Mittlere Rückgewinnungsrate (%)	Unteres 95 %-KI (%)	Oberes 95 %-KI (%)
Zentrale RLT-Geräte	183	75,2	69,3	80,6
Sonstige dezentrale Klimaanlage	66	87,5	79,2	94,3
Wärmepumpen (Direktverdampfung)	27	78,0	63,2	92,8
Unbekannt	238	86,0	81,6	90,1
Gesamt (nur FCKW)	40	70,3	60,5	79,5
Gesamt (nur HFCKW)	524	81,6	78,5	84,5
Gesamt (nur HFKW)	5.603	79,2	78,2	80,2
Gesamt (nur Natürliche)	25	96,7	91,3	100
Gesamt	6.192	79,4	78,4	80,3

Anmerkung: 95 % KI ist das 95 %-Bootstrap-Konfidenzintervall des Mittelwerts basierend auf 1.000 Resamplings.

Quelle: VDKF (2023)

In den Fällen, in denen die ursprüngliche Füllmenge die zurückgewonnenen Mengen überstieg, ist nicht bekannt, zu welchem Zeitpunkt des Lebenszyklus das „fehlende“ Kältemittel emittiert wurde, da keine weiteren Informationen über den Rückgewinnungsprozess verfügbar waren. Der größte Teil des bei der Stilllegung in der Anlage verbliebenen Kältemittels wurde wahrscheinlich zurückgewonnen, so dass der größte Teil der Emissionen wahrscheinlich während der Lebensdauer der Anlage entstanden ist. Dennoch können Emissionen bei der Entsorgung nicht ausgeschlossen werden. Eine Quantifizierung ist anhand der verfügbaren Daten nicht möglich.

7.2.6 Vergleich mit UNFCCC-Daten und Daten aus dem tschechischen Phoenix-Modell

Vergleicht man die entsprechenden Abschnitte der UNFCCC-CRF-Tabellen für Deutschland (UNFCCC 2023a) mit dem VDKF-LEC Datensatz, so wird deutlich, dass die VDKF-LEC Datenbank nur etwa 0,7 % der bei der Stilllegung in den Anlagen verbliebenen fluorierten Kältemittel, die in den Nationalen Inventarberichten (NIR) und den dazugehörigen CRF-Tabellen Deutschlands unter UNFCCC berichtet werden, erfasst (Tabelle 36). Um eine Vergleichbarkeit herzustellen, wurden die Gemische im VDKF-LEC Datensatz nach Einzelgasen aufgeschlüsselt und nur HFKW verwendet, die in beiden Datensätzen vorhanden waren.

Zur Darstellung auf Sektorebene wurden die Mediane der Anteile des VDKF-LEC Datensatzes an den UNFCCC-Mengen berechnet, da Mittelwerte durch die schiefe Verteilung der Daten nicht repräsentativ wären (einige wenige Kältemittel waren im VDKF-LEC Datensatz deutlich überrepräsentiert, beispielsweise HFKW-143a in stationären Klimaanlage, wobei die Mengen aus dem Gemisch R-404A stammten, das i.d.R. nur in der Industrie- und Gewerbekälte zu finden ist). Die Abdeckung war für den Sektor der Industriekälte am besten (Abbildung 18), aber im Allgemeinen schien der VDKF-LEC Datensatz einen relativ konsistenten, wenn auch kleinen Anteil der stillgelegten Anlagen abzubilden. Wie bereits erwähnt, war der unerwartet hohe Wert der zurückgewonnenen HFKW im Industriekältesektor im Jahr 2020 hauptsächlich auf einige wenige Anlagen mit sehr großen Füllmengen zurückzuführen, die zu sehr großen zurückgewonnenen Mengen führten.

Auf disaggregierter HFKW-Ebene gab es deutliche Unterschiede hinsichtlich des Anteils des VDKF-LEC Datensatzes an den UNFCCC-Mengen (Abbildung 19). HFKW-32 war in der Gewerbe- und Industriekälte stark überrepräsentiert und entstammte dabei den Gemischen R-407C, R-410A und R-449A. Da R-407C und R-410A, wie oben erwähnt, maßgeblich in Klimaanlage eingesetzt werden, erklärt sich die Überrepräsentation wahrscheinlich durch Fehleinträge im VDKF-LEC Datensatz. Für den Sektor der stationären Klimaanlage war HFKW-143a im VDKF-LEC Datensatz überrepräsentiert. Die Erklärung wurde hier bereits oben vorweggenommen. HFKW-143a entstammte hauptsächlich dem Gemisch R-404A, dass in aller Regel nicht in Klimaanlage zum Einsatz kommt.

Einige HFKW waren nicht in beiden Datensätzen enthalten. HFKW-227ea war im UNFCCC-Datensatz aufgeführt, wenn auch mit geringen Mengen von 0,7 bis 1,4 t für die Jahre 2017 bis 2020, aber nicht im VDKF-LEC Datensatz. HFKW-152a hingegen war in der VDKF-LEC Datenbank im Bereich Gewerbekälte mit sehr geringen Mengen von wenigen kg als Teil des Gemisches R-401A in den Jahren 2018 und 2020 enthalten, jedoch nicht im UNFCCC Datensatz. R-401A ist ein Gemisch, das die ozonabbauenden Stoffe HFCKW-22 (CHClF_2) und HFCKW-124 ($\text{C}_2\text{HF}_4\text{Cl}$) enthält, deren Verwendung in Klimaanlage seit 2015 gemäß der Verordnung (EG) Nr. 1005/2009 verboten ist. Folglich wurden die Geräte, die diese Mischung enthalten, zwischen 1983 und 1997 installiert und im Datensatz nach UNFCCC, nach Ablauf der im Modell angenommenen durchschnittlichen Lebensdauer, bereits entsorgt.

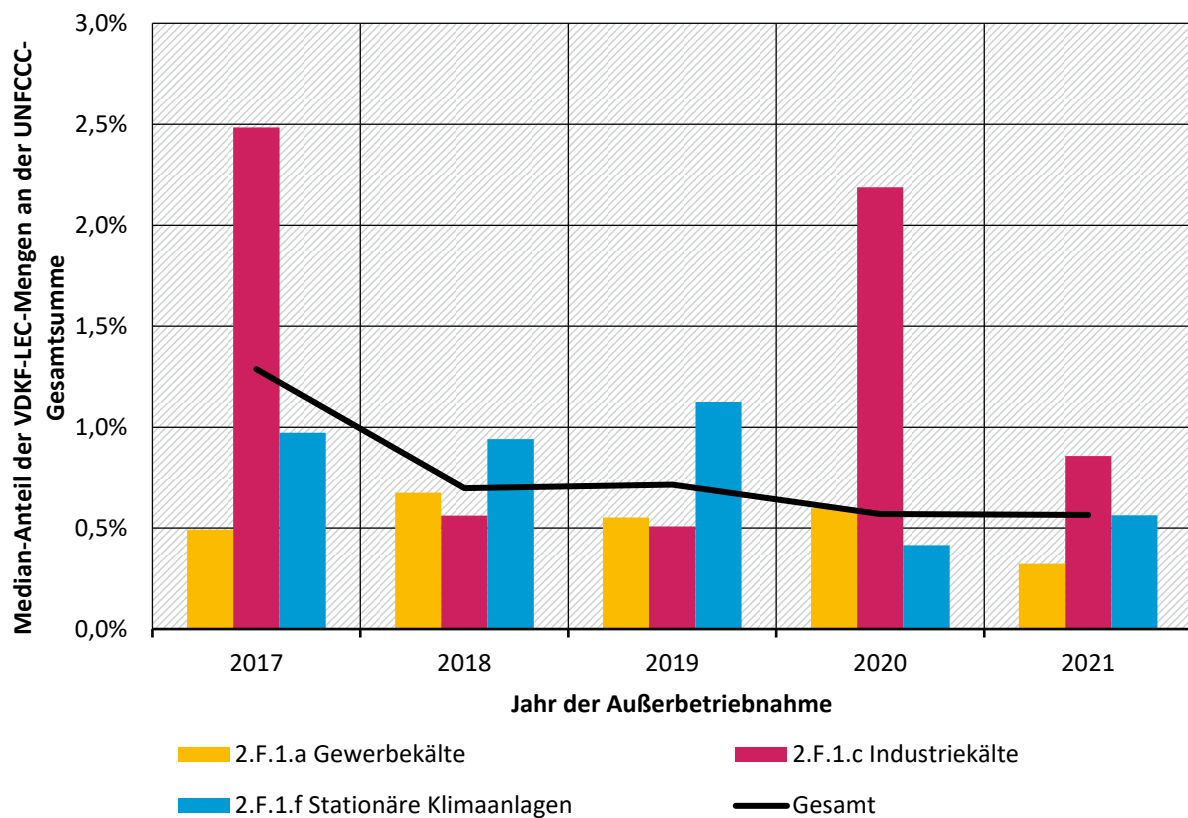
Tabelle 36: Vergleich der HFKW-Mengen in der VDKF-LEC Datenbank und den berichteten Mengen unter UNFCCC

Sektor	Quelle	2017	2018	2019	2020	2021
2.F.1.a Gewerbekälte	UNFCCC (t)	690,6	732,1	740,4	761,7	760,7
	VDKF-LEC (t)	3,2	4,9	3,2	4,4	2,1
	VDKF-LEC Anteil an UNFCCC	0,5 %	0,7 %	0,4 %	0,6 %	0,3 %
2.F.1.c Industriekälte	UNFCCC (t)	83,6	175,9	176,0	175,2	181,7
	VDKF-LEC (t)	2,2	2,1	1,9	4,8	2,9
	VDKF-LEC Anteil an UNFCCC	2,5 %	1,2 %	1,1 %	2,7 %	1,6 %
2.F.1.f Stationäre Klimatisierung	UNFCCC (t)	386,0	386,5	404,2	511,7	565,3
	VDKF-LEC (t)	2,3	2,3	3,7	2,2	2,6
	VDKF-LEC Anteil an UNFCCC	0,6 %	0,6 %	0,9 %	0,4 %	0,5 %
Gesamt	UNFCCC (t)	1.160,2	1.294,4	1.320,5	1.448,6	1507,7
	VDKF-LEC (t)	7,8	9,4	9,0	11,5	7,6
	VDKF-LEC Anteil an UNFCCC	0,7 %	0,7 %	0,7 %	0,8 %	0,5 %

Anmerkungen: Die Angaben zu den HFKW-Mengen beziehen sich nur auf übereinstimmende HFKW in beiden Datensätzen pro Sektor. Die unter UNFCCC berichteten HFKW-Mengen berechnen sich aus „Verbleib in Produkten bei der Stilllegung“ abzüglich „Emissionen aus der Entsorgung“ in Tabelle 2(II)B-Hs2 für Deutschland.

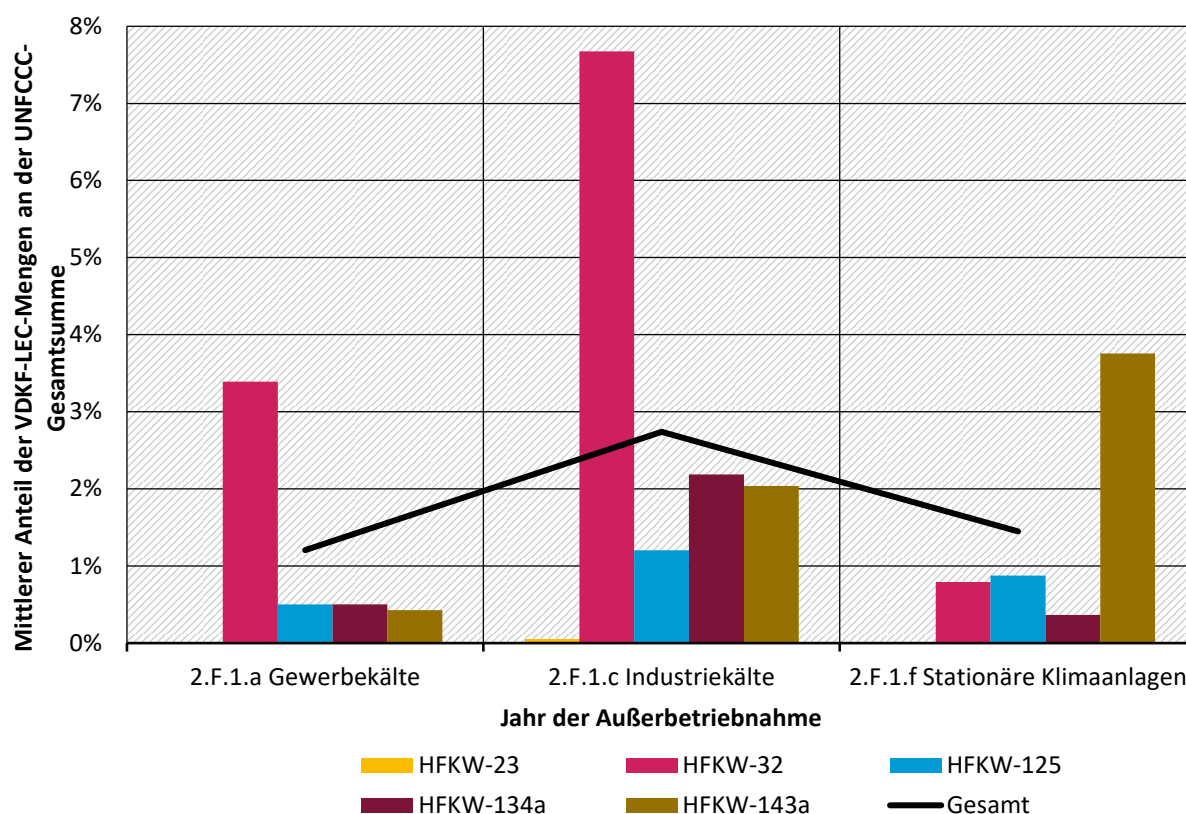
Quellen: UNFCCC (2023a) und VDKF (2023)

Abbildung 18: Mediane der Anteile der rückgewonnenen HFKW-Mengen aus dem VDKF-LEC Datensatz an den berichteten Mengen unter UNFCCC nach Jahr (%)



Anmerkung: Anteil der rückgewonnenen HFKW-Mengen aus dem VDKF-LEC Datensatz mit den HFKW-Mengen, die in der Tabelle des Gemeinsamen Berichterstattungsformats (CRF) des UNFCCC unter der Kategorie „Verbleib in Produkten bei der Stilllegung“ abzüglich „Emissionen aus der Entsorgung“ in Tabelle 2(II)B-Hs2 für Deutschland gemeldet wurden, aufgeschlüsselt nach einzelnen Sektoren und Jahren

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den ausgewerteten Daten aus VDKF (2023) und UNFCCC (2023a)

Abbildung 19: Mittlerer Anteil der rückgewonnenen HFKW-Mengen aus dem VDKF-LEC Datensatz mit den berichteten Mengen unter UNFCCC nach Sektor (%)

Anmerkung: Anteil der rückgewonnenen HFKW-Mengen aus dem VDKF-LEC Datensatz mit den HFKW-Mengen, die in der Tabelle des Gemeinsamen Berichterstattungsformats (CRF) des UNFCCC unter der Kategorie „Verbleib in Produkten bei der Stilllegung“ abzüglich „Emissionen aus der Entsorgung“ in Tabelle 2(II)B-Hs2 für Deutschland gemeldet wurden, aufgeschlüsselt nach einzelnen HFKW und Sektor über die Jahre 2017 bis 2021

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den ausgewerteten Daten aus VDKF (2023) und UNFCCC (2023a)

Um die durchschnittlichen Rückgewinnungsraten von HFKW bezogen auf die Erstbefüllung sowie die durchschnittlichen Betriebsjahre von Anlagen aus der VDKF-LEC Datenbank mit den Annahmen des deutschen und tschechischen F-Gas Modells zu vergleichen, wurden für das deutsche Modell Durchschnittswerte für die angenommenen Rückgewinnungsraten und Betriebsjahre berechnet und für das tschechische Phoenix Modell aus Müllerová et al. (2020) übernommen (Tabelle 37).

Der VDKF-LEC Datensatz wies für alle Sektoren höhere Raten auf als das deutsche Modell, war aber für die Gewerbekälte sehr ähnlich. Die Abweichungen für Industriekälte und stationäre Klimaanlage waren größer, aber deutlich geringer im Vergleich zu den Raten des tschechischen Modells, die in allen Sektoren mit 38,5 % identisch waren.

Hinsichtlich der Betriebsjahre der Geräte waren die Ergebnisse je nach Sektor unterschiedlich. Für die gewerbliche Kälteerzeugung ergab der VDKF-LEC Datensatz eine längere Lebensdauer der Anlagen im Vergleich zu den deutschen und tschechischen Annahmen, wobei das Phoenix Modell die kürzeste Lebensdauer aufwies. Das Gegenteil gilt für die Industriekälte, wo das Phoenix Modell die längste Lebensdauer der Anlagen annimmt. Für den Bereich der stationären Klimatisierung ging das deutsche Modell von der längsten Lebensdauer der Anlagen aus.

Es ist jedoch Vorsicht geboten, da die Durchschnittswerte in Tabelle 37 über die Teilsektoren ohne Berücksichtigung ihrer relativen Bedeutung berechnet wurden. Die Berechnung eines

gewichteten Durchschnitts, z. B. unter Berücksichtigung der Anzahl der Geräte und der durchschnittlichen Füllmenge, würde wahrscheinlich zu anderen durchschnittlichen Sektorenraten führen. Für die tschechischen Modellraten wurden Annahmen auf der Grundlage von Expertenmeinungen innerhalb der in Tabelle 7.9 der IPCC-Guidelines von 2006 vorgeschlagenen Standardbereiche getroffen (IPCC 2006, Müllerová et al. 2020).

Interessanterweise lag der Wert für die Betriebsjahre für gewerbliche Kälteanlagen im VDKF-LEC Datensatz mit 15,7 Jahren über dem oberen Schätzwert der IPCC-Guidelines, aber mit 11,6 Jahren am unteren Schätzwert für stationäre Klimaanlageanlagen und mit 14,8 Jahren unter dem geschätzten Bereich für Industriekälteanlagen. Die durchschnittlichen Rückgewinnungsraten in Bezug auf die Erstbefüllung waren sowohl für den VDKF-LEC Datensatz als auch für das deutsche F-Gas-Modell für gewerbliche Kälteanlagen und stationäre Klimaanlageanlagen deutlich höher, lagen aber für industrielle Kälteanlagen innerhalb des angenommenen Bereichs der IPCC-Guidelines.

Tabelle 37: Vergleich der durchschnittlichen Rückgewinnungsraten und Betriebsjahre aus verschiedenen Quellen

Sektor	VDKF-LEC		Deutsches F-Gas Modell		Tschechisches Phoenix Modell		2006 IPCC-Guidelines	
	$\eta_{\text{rec,d}} * p$ (%)	d (a)	$\eta_{\text{rec,d}} * p$ (%)	d (a)	$\eta_{\text{rec,d}} * p$ (%)	d (a)	$\eta_{\text{rec,d}} * p$ (%)	d (a)
2.F.1.a Gewerbekälte	74,3	15,7	73,5	11,5	38,5	10,5	<63 ¹	7-15
2.F.1.c Industriekälte	75,0	14,8	66,3	15,8	38,5	17,0	<92 ²	15-30
2.F.1.f Stationäre Klimaanlageanlagen	81,6	11,6	70,7	14,3	38,5	13,5	<64 ³	10-20

¹ Mittelwert von 80 % * 70 % für steckerfertige Geräte und 70 % * 100 % für mittlere und große Geräte.

² Mittelwert von 90 % * 100 % für industrielle Kälte einschließlich Anlagen zur Lebensmittelverarbeitung und Kühlagerung und 95 % * 100 % für Kaltwassersätze.

³ 80 % * 80 % für private und gewerbliche Klimaanlageanlagen einschließlich Wärmepumpen.

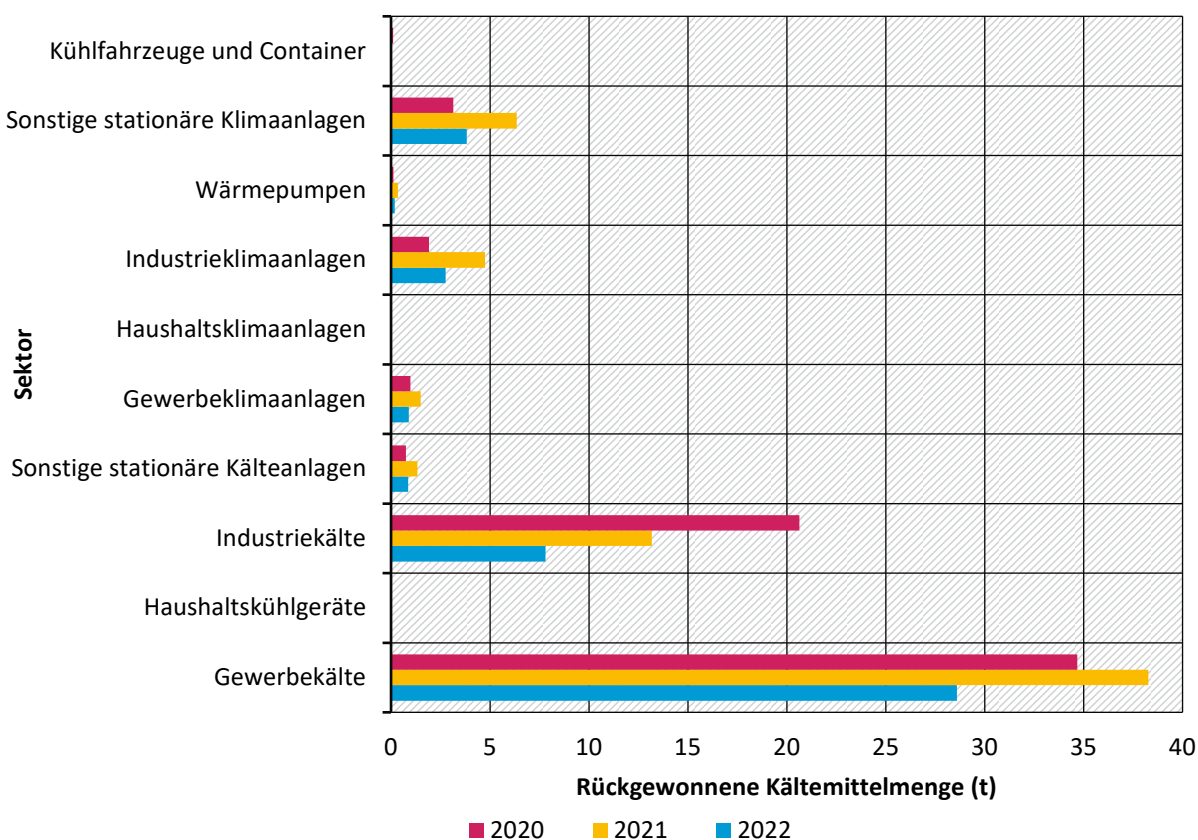
Anmerkungen: Rückgewinnungsraten bezogen auf die Erstbefüllung mit F-Gasen ($\eta_{\text{rec,d}} * p$) und die durchschnittlichen Betriebsjahre der Anlagen (d) im VDKF-LEC Datensatz (Durchschnittswerte für die Jahre 2017-2021), dem deutschen F-Gas Modell (Annahmen für 2020 (UNFCCC 2023a)), dem tschechischen Phoenix Modell (Annahmen für 2018 (Müllerová et al. 2020)) und den IPCC-Guidelines von 2006 (IPCC 2006) auf Sektorebene.

7.3 CRO-Datensatz aus Polen

Der polnische Datensatz enthielt Informationen zu rückgewonnenen F-Gasen aus Equipment für die Jahre 2020, 2021 und 2022. Rückgewinnung war hier definiert als finale Entnahme des Kältemittels bei Außerbetriebnahme der Anlage oder Aggregatersatz. Retrofitting, Änderungen an der Anlage und Verkauf oder Standortverlegungen der Anlage waren hier nicht erfasst. In einzelnen Fällen wurde kein F-Gas in Altanlagen bei Außerbetriebnahme gefunden. Diese Fälle waren im Datensatz nicht enthalten und konnten somit nicht quantifiziert werden. Der Datensatz bestand maßgeblich aus rückgewonnenen F-Gasmengen aus Kälte- und Klimaanlageanlagen. Zahlen zu Feuerlöschanlagen waren ebenfalls enthalten, wurden für das vorliegende Projekt jedoch nicht ausgewertet.

Rückgewinnung von F-Gasen in Polen erfolgte in den letzten Jahren mengenmäßig insbesondere im Bereich der stationären Kälteanlagen (Gewerbe- und Industriekälte) mit R-404A als dem häufigsten Kältemittel (Abbildung 20 und Tabelle 38). Die übrigen Sektoren trugen nur in sehr geringem Umfang zur gesamten rückgewonnenen Menge bei. Grundsätzlich zeigte sich jedoch für nahezu alle Sektoren ein Rückgang in der Rückgewinnung im Jahr 2022.

Abbildung 20: Rückgewonnene Mengen an F-Gasen für verschiedene Sektoren in der polnischen Datenbank



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den Daten aus CRO (2023)

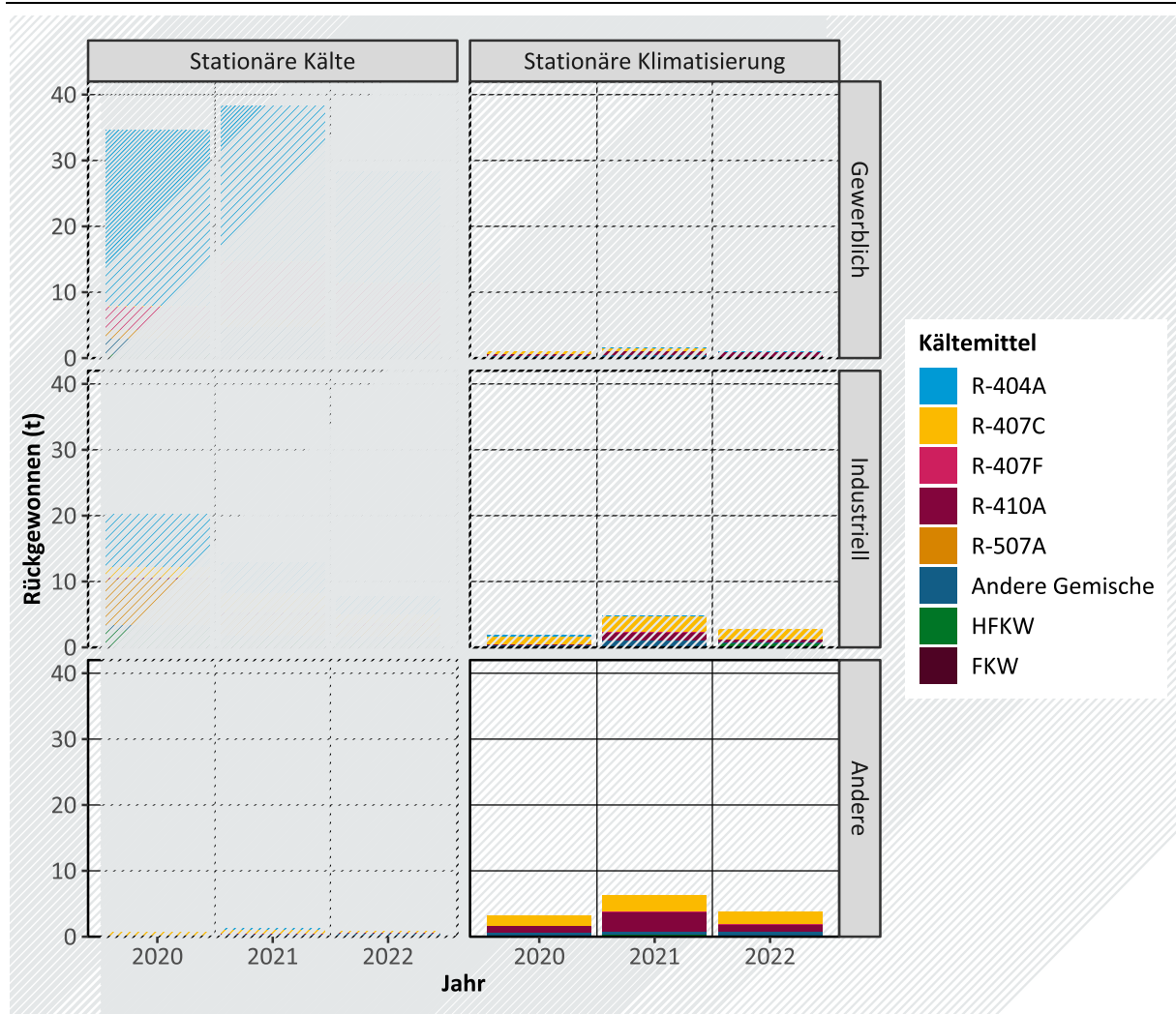
Tabelle 38: Rückgewonnene Mengen an F-Gasen in Tonnen für verschiedene Sektoren mit Information zur Füllmenge des entsprechenden Equipments in der polnischen Datenbank für verschiedene Jahre

Sektor	Ursprüngliche Gesamtfüllmenge der Anlagen	2020	2021	2022
Stationäre Kälteanlagen	Unter 3 kg	0,184	0,348	0,182
	3 kg bis unter 30 kg	6,052	7,196	5,538
	30 kg bis unter 300 kg	31,161	37,591	22,671
	Über 300 kg	18,246	7,411	8,648
Stationäre Klimaanlage	Unter 3 kg	0,094	0,133	0,060
	3 kg bis unter 30 kg	3,823	7,003	4,540
	30 kg bis unter 300 kg	1,878	5,449	2,873

Sektor	Ursprüngliche Gesamtfüllmenge der Anlagen	2020	2021	2022
Wärmepumpen	Über 300 kg	0,247	0,000	0,000
	Unter 3 kg	0,012	0,000	0,000
	3 kg bis unter 30 kg	0,234	0,170	0,438
	30 kg bis unter 300 kg	0,319	0,474	0,000
Kühlfahrzeuge und Container	Unter 3 kg	0,013	0,001	0,000
	3 kg bis unter 30 kg	0,089	0,014	0,021
Gesamt	-	62,352	65,790	44,972

Quelle: CRO (2023)

Abbildung 21: Rückgewonnene Mengen an F-Gasen nach Kältemittel in der polnischen Datenbank



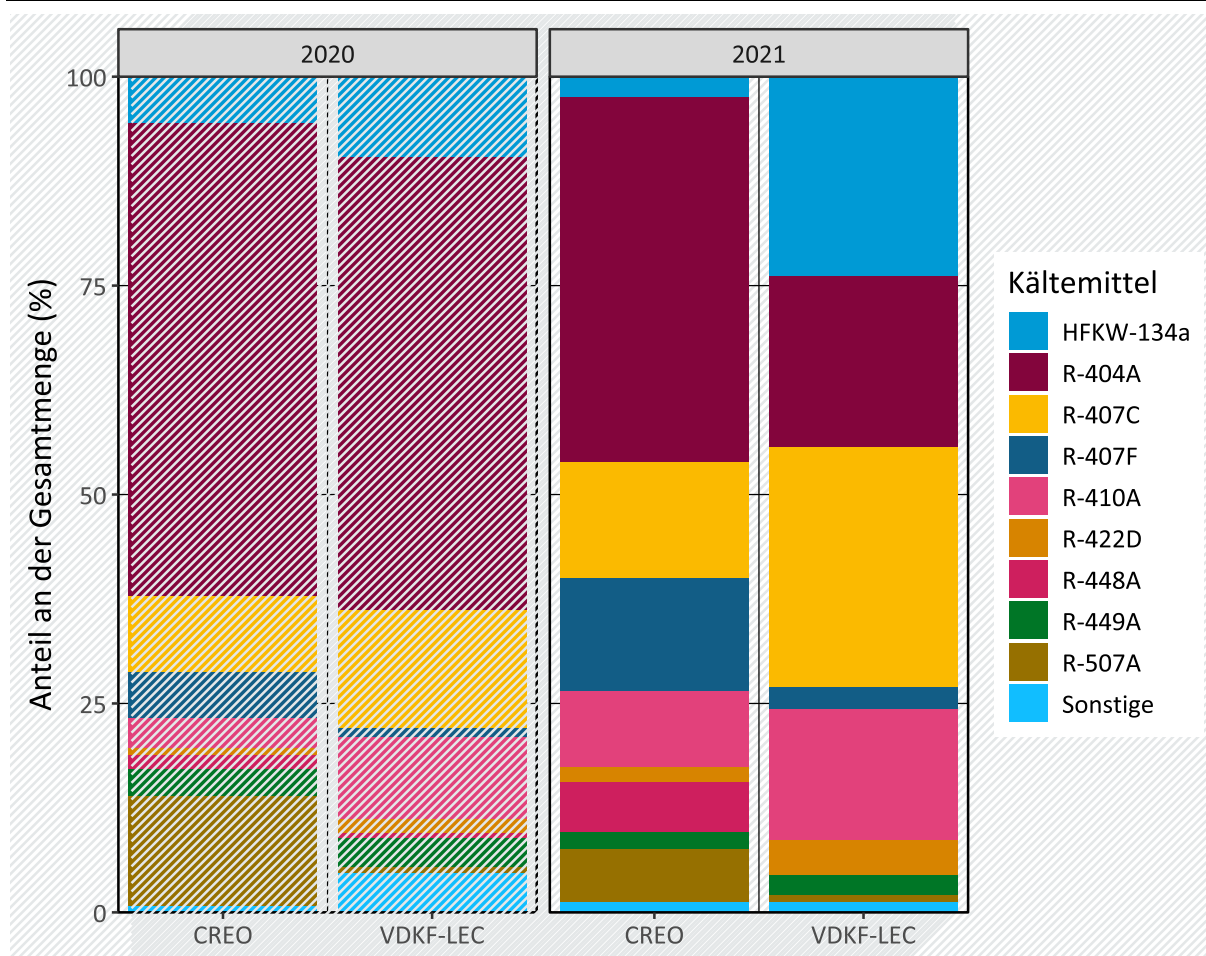
Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den Daten aus CRO (2023)

Anmerkung: Transportkälte und Wärmepumpen sind nicht gezeigt, da die Mengen insignifikant klein waren

Verglichen mit dem VDKF-LEC Datensatz waren ähnliche Kältemittel in den außer Betrieb genommenen Kälte- und Klimaanlageanlagen in den Jahren 2020 und 2021 (Abbildung 22). Der größte Anteil im Jahr 2020 war in beiden Fällen R-404A. In 2021 wurde in Polen zumeist R-404A

rückgewonnen, während im VDKF-LEC Datensatz R-407C, gefolgt von HFKW-134a in größter Menge rückgenommen wurde. Ansonsten war zu erkennen, dass der Anteil von R-407F, R-507A, R-4498A und R-449A in Polen höher war. Rückgenommene Mengen an R-134a, R-407C und R-410A waren dagegen im VDKF-LEC Datensatz höher.

Abbildung 22: Anteil der einzelnen Kältemittel an der gesamten jeweiligen rückgenommenen Kältemittelmenge aus der polnischen (CRO) und deutschen (VDKF-LEC) Datenbank



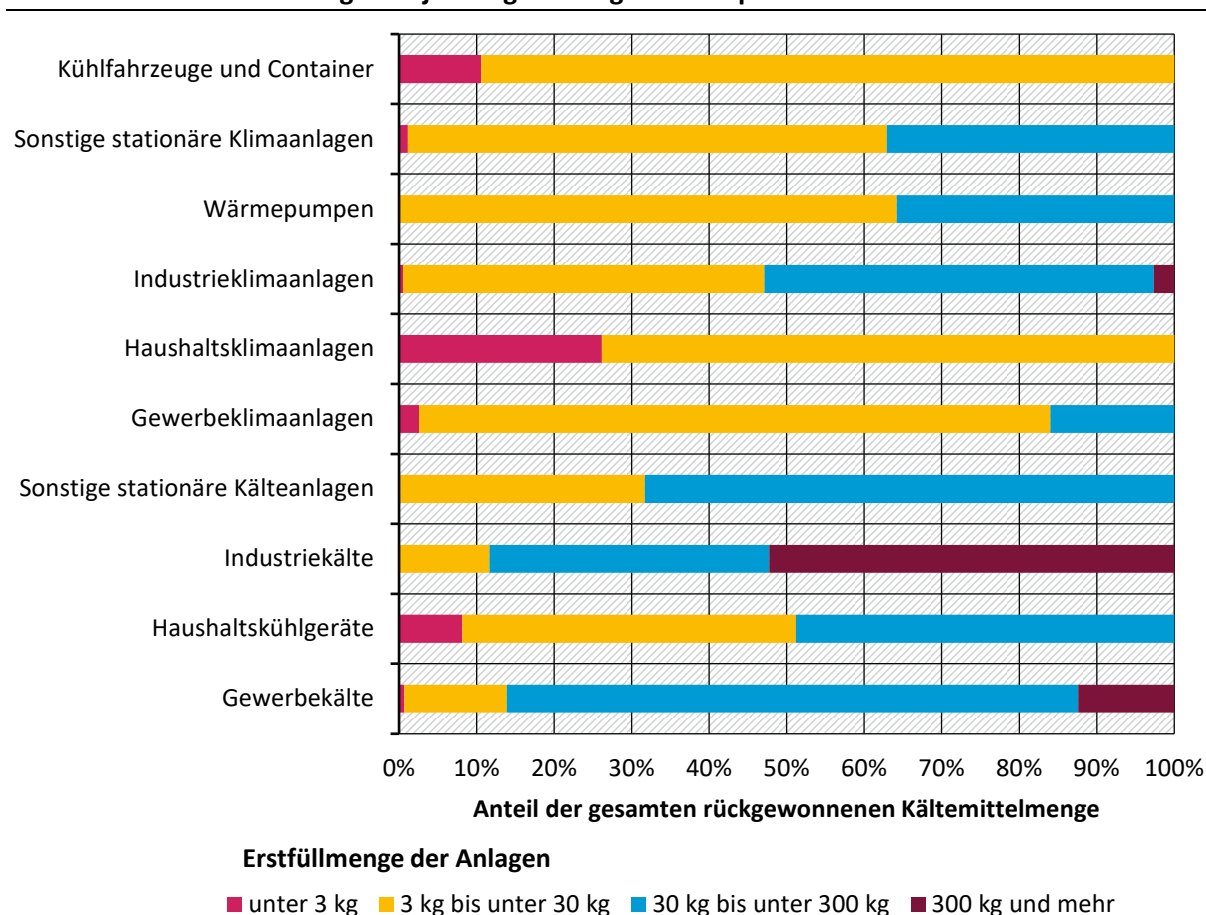
Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den Daten aus CRO (2023) und VDKF (2023)

Bezogen auf die Erstfüllmenge der stillgelegten Anlagen entstammten die rückgewonnenen Kältemittelmengen je nach Sektor meist Anlagen mit 3 kg bis unter 30 kg Erstfüllmenge und 30 kg bis unter 300 kg (Abbildung 23). Nur im Bereich der Industriekälte, und in geringerem Umfang der Gewerbekälte und Industrieklimatisierung, entstammten Mengen auch sehr großen Anlagen mit mehr als 300 kg. Sehr kleine Anlagen mit unter 3 kg Füllmenge wurden maßgeblich im Bereich der Haushaltsklimatisierung und -kühlung sowie der Transportkälte entsorgt.

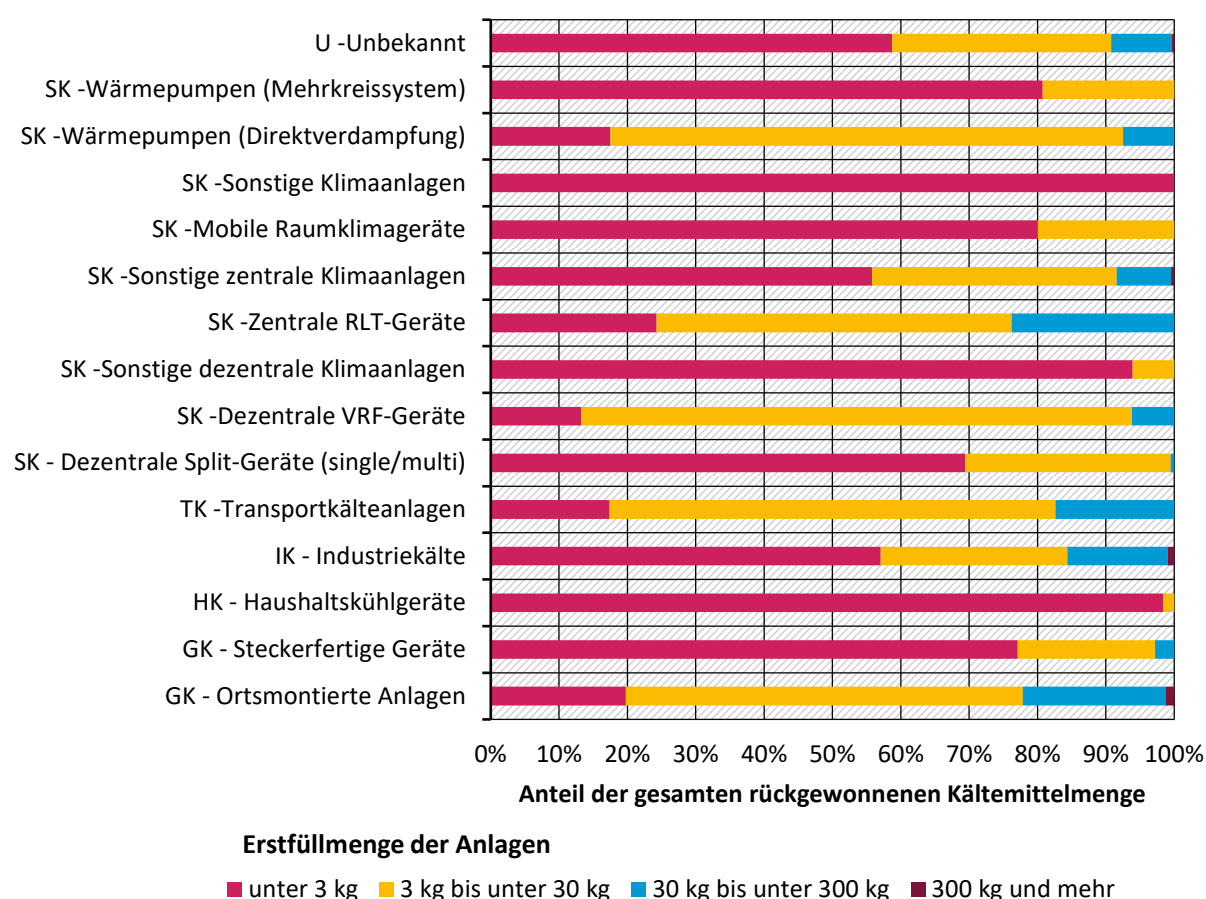
Insbesondere der Sektor der Industriekälte bietet sich hier für einen Vergleich mit dem VDKF-LEC Datensatz an. Während die rückgenommenen Kältemittelmengen für Polen zu 52 % aus Anlagen mit Füllmengen von mehr als 300 kg stammten, hatten im gesamten VDKF-LEC Datensatz nur 0,8 % der Anlagen eine Füllmenge größer 300 kg (Abbildung 24 und Tabelle 39). Weiterhin gab es in der polnischen Datenbank keine Industriekälteanlagen mit Füllmengen kleiner 3 kg, während im VDKF-LEC Datensatz 57 % der Anlagen derartig kleine Füllmengen hatten. Industriekälteanlagen mit Füllmengen zwischen 30 und 300 kg waren in Polen mit 36 % vertreten, im VDKF-LEC Datensatz nur zu 15 %.

Auch im Bereich der Gewerbekälte hatten Anlagen in der polnischen CRO-Datenbank deutlich größere Füllmengen, selbst wenn man als Vergleich nur die größeren ortsmontierten Anlagen aus dem VDKF-LEC Datensatz betrachtet. Vergleiche für andere Sektoren sind schwierig, da die Einteilung in den beiden Datensätzen nicht identisch waren. So enthielt der VDKF-LEC Datensatz nur sehr wenige und nicht repräsentative Haushaltskühlgeräte und Transportkälteanlagen. Weiterhin waren in der CRO-Datenbank, im Gegensatz zum VDKF-LEC Datensatz, Klimaanlage aus der Gewerbe-, Haushalts- und Industriekälte gesondert gelistet. Insgesamt enthielt die CRO-Datenbank in nahezu allen Sektoren einen höheren Anteil größerer Anlagen im Vergleich zum VDKF-LEC Datensatz. Einzige Ausnahme war der Sektor Transportkälte, wobei hier aber nicht weiter erörtert werden konnte welche Anlagen genau erfasst waren.

Abbildung 23: Anteil der gesamten rückgewonnenen Kältemittelmenge über alle Jahre nach Erstfüllmenge der jeweiligen Anlagen in der polnischen Datenbank



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den Daten aus CRO (2023)

Abbildung 24: Anteil der gesamten rückgewonnenen Kältemittelmenge über alle Jahre nach Erstfüllmenge der jeweiligen Anlagen im deutschen VDKF-LEC Datensatz

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den Daten aus VDKF (2023)

Anmerkung: GK – Gewerbekälte, HK – Haushaltskälte, IK – Industriekälte, TK – Transportkälte, SK – Stationäre Klimatisierung, U – Unbekannt

Tabelle 39: Anteile der Anlagen mit Füllmengen im vollen VDKF-LEC Datensatz entsprechend der Einteilung in der polnischen CRO-Datenbank und Füllmengen aus der CRO-Datenbank

Sektor	Teilsektor	<3 kg	3-30 kg	30-300 kg	>300 kg
Gewerbekälte: VDKF-LEC	Ortsmontierte Anlagen	20 %	58 %	21 %	1 %
	Steckerfertige Geräte	77 %	20 %	3 %	0 %
Gewerbekälte: CRO		1 %	13 %	74 %	12 %
Haushaltskälte: VDKF-LEC	Haushaltskühlgeräte	98 %	2 %	0 %	0 %
Haushaltskälte: CRO		8 %	43 %	49 %	0 %
Industriekälte: VDKF-LEC		57 %	27 %	15 %	1 %
Industriekälte: CRO		0 %	12 %	36 %	52 %

Sektor	Teilsektor	<3 kg	3-30 kg	30-300 kg	>300 kg
Transportkälte: VDKF-LEC	Transportkälteanlagen	17 %	65 %	17 %	0 %
Transportkälte: CRO		11 %	89 %	0 %	0 %
Stationäre Klimaanlage: VDKF-LEC	Dezentrale Split-Geräte (single/multi)	69 %	30 %	1 %	0 %
	Dezentrale VRF-Geräte	13 %	81 %	6 %	0 %
	Sonstige dezentrale Klimaanlage	94 %	6 %	0 %	0 %
	Zentrale RLT-Geräte	24 %	52 %	24 %	0 %
	Sonstige zentrale Klimaanlage	56 %	36 %	8 %	0 %
	Mobile Raumklimageräte	80 %	20 %	0 %	0 %
	Sonstige Klimaanlage	100 %	0 %	0 %	0 %
	Wärmepumpen (Direktverdampfung)	11 %	81 %	7 %	0 %
	Wärmepumpen (Mehrkreisssystem)	81 %	19 %	0 %	0 %
Unbekannt: VDKF-LEC		59 %	32 %	9 %	0 %
Gewerbeklimaanlagen: CRO		3 %	81 %	16 %	0 %
Haushaltsklimaanlagen: CRO		26 %	74 %	0 %	0 %
Industrieklimaanlagen: CRO		0 %	47 %	50 %	3 %
Wärmepumpen: CRO		0 %	64 %	36 %	0 %
Sonstige stationäre Klimaanlage: CRO		1 %	62 %	37 %	0 %

Quelle: VDKF (2023), CRO (2023)

Anmerkung: Der jeweils größte Anteil pro Kategorie ist fett hervorgehoben

7.4 Rückgenommene Kältemittelmengen über Gasehändler in Deutschland

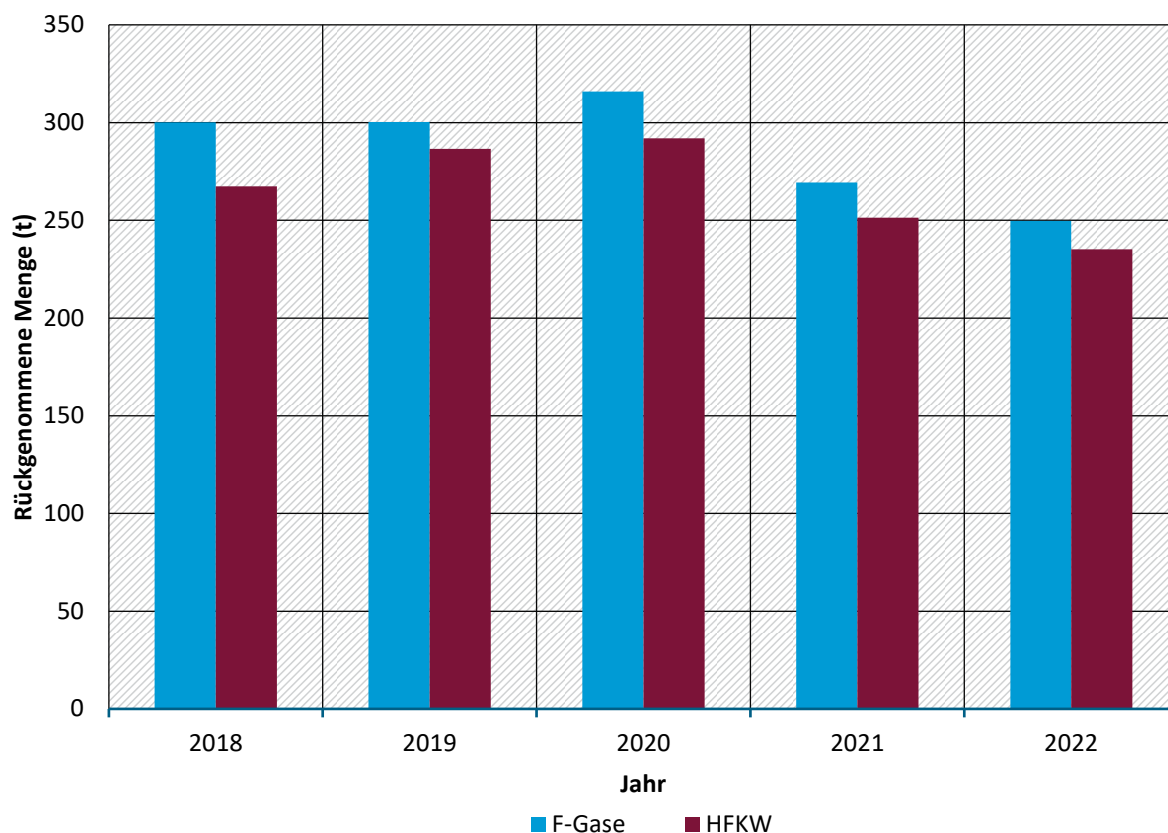
Größere Gasehändler in Deutschland wurden im Rahmen dieses Vorhabens kontaktiert, wobei jedoch nur ein kleiner Teil bereit war, Daten zur Rücknahme von Kältemitteln zu übermitteln. Aufgrund der Vertraulichkeit der Einzeldaten werden diese hier nur aggregiert und ohne Nennung einzelner Händler wiedergegeben. Es konnten nur Daten von vier großen deutschen Gasehändlern ausgewertet werden, was die Repräsentativität der Auswertung einschränkt.

Betrachtet man die rückgenommenen Kältemittelmengen, die ausgehend von berichteten Mengen vier größerer Gasehändler geschätzt wurden, lässt sich ein abnehmender Trend für den Zeitraum 2020 bis 2022 erkennen (Abbildung 25 und Tabelle 40). Während die

rückgenommene Kältemittelmenge von 2018 auf 2019 mit 300 t noch gleich blieb, und im Jahr 2020 um 5 % anstieg, ging sie zwischen den Jahren 2020 und 2022 um 21 % auf 250 t zurück.

Der Anteil der HFKW an den gesamten F-Gasen war nicht für alle Gasehändler verfügbar und wurde anhand dieser Information geschätzt. Er betrug zwischen 89 % und 95 % (Tabelle 40). Die restlichen 5 % bis 11 % waren geringe Mengen an FKW, HFCKW und uHFKW.

Abbildung 25: Geschätzte rückgenommene F-Gasmenge vier größerer Gasehändler in Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Daten von vier größeren Unternehmen, Öko-Recherche

Anmerkung: Für die Jahre 2018 und 2022 sowie für den HFKW-Anteil an der gesamten F-Gasmenge wurden Daten teilweise geschätzt.

Tabelle 40: Geschätzte rückgenommene F-Gasmenge vier größerer Gasehändler in Deutschland

Rückgenommene Kältemittelmenge	2018	2019	2020	2021	2022
F-Gase (t)	300	300	316	269	250
HFKW (t)	267	287	292	251	235
Andere (FCKW, HFCKW, uHFKW)	33	13	24	18	15
HFKW-Anteil	89 %	95 %	92 %	93 %	94 %
Anteil Andere	11 %	5 %	8 %	7 %	6 %

7.5 Rücknahme, Wiederaufbereitung und Entsorgung von F-Gas-Kältemitteln in Deutschland

Laut Deutschem F-Gas Modell, das die Grundlage für die deutsche F-Gas-Berichterstattung unter dem UNFCCC bildet, verblieben in Kälte- und Klimaanlage an deren Lebensende ca. 1.788 t HFKW im Jahr 2021. Diese Zahl ist niedriger als die zuletzt offiziell berichtete Menge (UNFCCC 2023a), was auf eine Modellverbesserung zurückzuführen ist, die im Berichtsjahr 2024 rückwirkend, auch für das Jahr 2021, vorgenommen werden wird. Die Emissionen aus der Entsorgung beliefen sich laut UNFCCC auf 415 t (23 % der Gesamtmenge). Diese Mengen wurden als Grundlage für die Abschätzung der Entsorgung von HFKW aus stationären Kälte- und Klimaanlage verwendet. Mittels der Daten von vier größeren Gasehändlern und zwei Zerstörungsfirmen konnten die Mengen, die von Gasehändlern in Deutschland rückgenommen wurden sowie die zerstörten Mengen abgeschätzt werden. Auf Basis von Schätzungen einiger Industrievertreter im Rahmen der durchgeführten Interviews, wurde im Folgenden angenommen, dass bei Umfüllungen von Gas ca. 5 % der Menge entweicht und damit emittiert. Diese Emissionsrate wurde konservativ bei allen Transaktionsschritten zwischen Entnahme und Senke von HFKW angerechnet. Also bei der Entnahme des Kältemittels aus dem Altgerät, der Analyse und Umfüllung bei den Gasehändlern und Kältefachbetrieben und bei der Umfüllung durch Zerstörungsfirmen. Etwaige Emissionen aus der Zerstörung der Gase wurden nicht berücksichtigt.

Der Berechnung lag die Annahme zugrunde, dass rückgenommene HFKW-Mengen von Gasehändlern maßgeblich der Wiederaufbereitung (Reclamation) oder der Zerstörung zugeführt werden. Für vier größere Gasehandelsunternehmen lagen Daten vor, die als Basis genutzt wurden, um auf den übrigen Teil der größeren Gasehandelsunternehmen in Deutschland hochzurechnen. Dies ergab eine rückgenommene HFKW-Menge aus stationären Kälte- und Klimaanlage von ca. 605 t, was 34 % der HFKW-Menge in Altanlagen laut UNFCCC entspricht (Abbildung 26 und Tabelle 41). Handhabungsverluste beliefen sich auf ca. 30 t (5 % der Menge). Es wurde angenommen, dass die verbliebenen 574 t entweder der Zerstörung oder der Wiederaufbereitung zugeführt wurden. Da keine genauen Zahlen zur Wiederaufbereitung vorlagen, jedoch ungefähre Mengen der Zerstörung sowie der Zerstörung zugeführten Mengen, wurde angenommen, dass ca. 291 t – und damit 80 % der gesamten zerstörten Menge im Jahr 2021 – der Zerstörung zugeführt wurden, während 283 t wiederaufbereitet wurden. Damit ergab sich eine geschätzte Maximalmenge der Wiederaufbereitung. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass dies auf der Annahme beruht, dass nur größere Gasehändler Wiederaufbereitung durchführen.

Die verbliebenen 61 % der Restmenge laut UNFCCC (1.094 t) konnten nicht zugeordnet werden. Lediglich die ausstehenden 20 % der zerstörten HFKW-Menge von 74 t, die nicht von größeren Gasehändlern stammte, wurde der Zerstörung zugeordnet. Da nur wenige Daten verfügbar waren, konnten nur 180 t der insgesamt laut UNFCCC anfallenden 415 t an HFKW-Emissionen aus Altanlagen quantifiziert werden. Die verbleibenden 235 t wurden den Gesamtemissionen daher in Abbildung 26 aus dem Anteil unbekannter Quelle zugerechnet.

Insgesamt wurden 16 % (283 t) der rückgenommenen HFKW aufbereitet und damit wiederverwendet, 19 % (347 t) wurden zerstört, 23 % (415 t) emittierten (davon waren 180 t Handhabungsverluste und 235 t weitere Emissionen bei der Entsorgung) und 42 % (744 t) konnten nicht weiter zugeordnet werden. Diese unbekannte Fraktion enthielt mit hoher Sicherheit größere recycelte Mengen, möglicherweise zusätzliche wiederaufbereitete Mengen sowie möglicherweise weitere Emissionen.

Abbildung 26: Sankey-Diagramm des möglichen Verbleibs von HFKW aus außer Betrieb genommenen stationären Kälte- und Klimaanlage in Deutschland im Jahr 2021

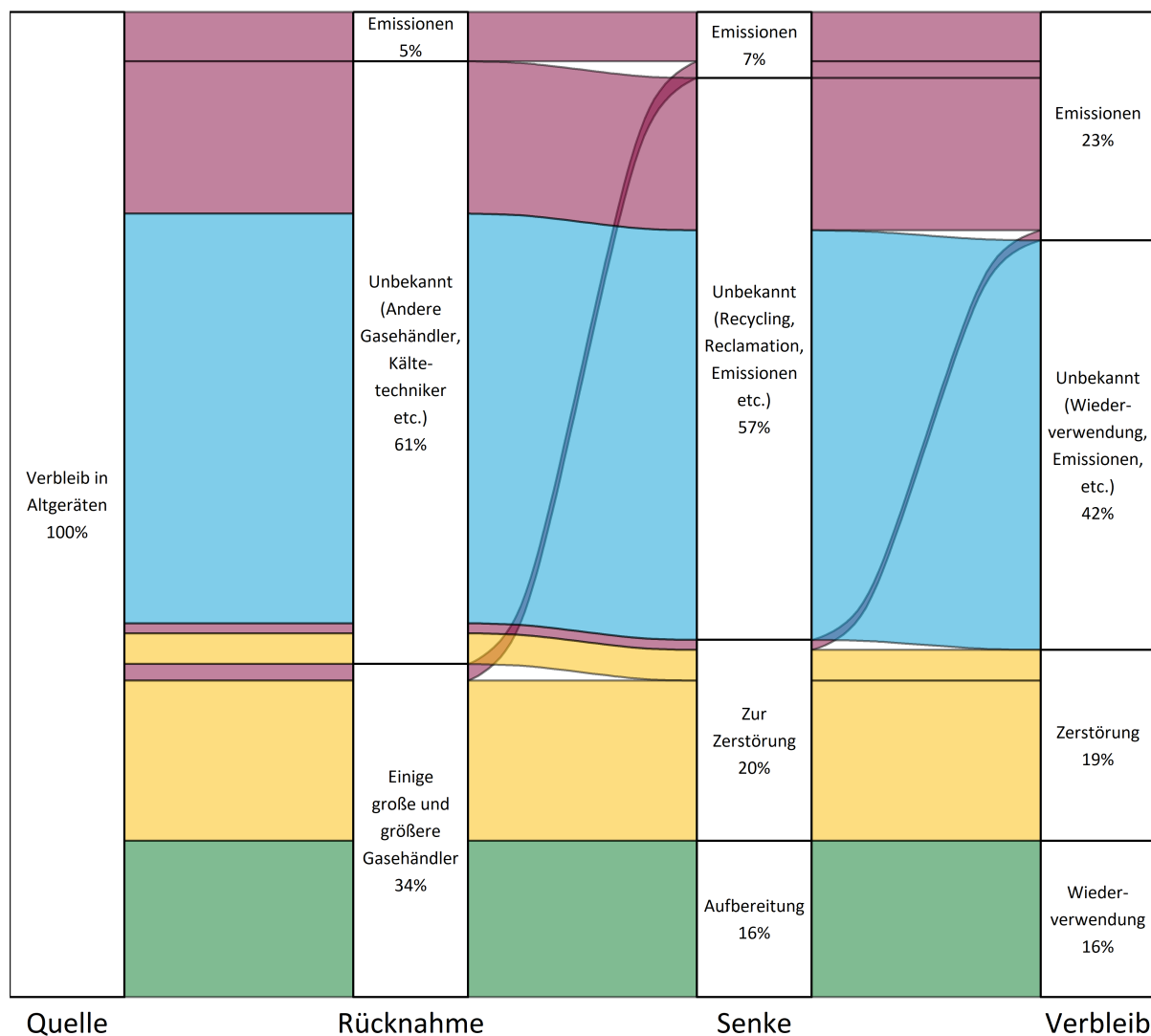


Tabelle 41: Möglicher Verbleib von HFKW aus außer Betrieb genommenen stationären Kälte- und Klimaanlage in Deutschland im Jahr 2021

Quelle	Rücknahme	Senke	Verbleib	Tonnen	Anteil an der Gesamtsumme
Verbleib in Altgeräten	Emissionen	Emissionen	Emissionen	89	5 %
	Einige große und größere Gasehändler	Emissionen	Emissionen	30	2 %
		Zur Zerstörung	Zerstörung	291	16 %
		Aufbereitung	Wiederverwendung	283	16 %
	Unbekannt (Andere Gasehändler, Kältetechniker etc.)	Zur Zerstörung	Zerstörung	56	3 %
			Emissionen	18	1 %
		Unbekannt (Recycling, Reclamation, Emissionen etc.)	Unbekannt (Wiederverwendung, Emissionen, etc.)	744	42 %
			Emissionen	277	15 %

8 Ableitung neuer Modellannahmen für Kälte- und Klimaanlage (2.F.1)

Die nachfolgende Tabelle 42 enthält die verfügbaren Informationen zu Parametern von Kälte- und Klimaanlage aus den deutschen, tschechischen, französischen und US-amerikanischen F-Gas Modellen sowie dem VDKF-LEC Datensatz. Gezeigt sind für die VDKF-Daten die Zahlen für Geräte mit HFKW und Gemischen. Die Struktur ist gemäß den Sektoren im VDKF-Datensatz aufgebaut, der nicht immer mit den Modellsektoren übereinstimmt. Ein Vergleich ist daher nicht immer sinnvoll möglich. Für die fett markierten und unterstrichenen Zahlen in den Spalten für Deutschland (D), schlagen wir Anpassungen im deutschen Modell vor.

Tabelle 42: Vergleich der bisherigen Modellannahmen (D) mit den Daten aus der VDKF-LEC Datenbank (VDKF) sowie den tschechischen (CZ), französischen (F) und US-amerikanischen (USA) Modellannahmen

Sektor	Teilsektor	Betriebsjahre (a)					Erstfüllmenge (kg)					Rückgewinnungsrate (%)				
		D	VDKF ¹	CZ	F	USA	D	VDKF ¹	CZ	F	USA	D	VDKF ¹	CZ	F	USA
Gewerbe- kälte	Steckerfertige Geräte	10	14,0 (0-29)	10,5	15	10	0,3-5	1,4 (0,1-18)	-	-	0,4-0,5	60,0	69,2 (0-100)	55	25	0
	Ortsmontierte Anlagen ²	14 ³ , <u>10</u> ⁴ , 12 ⁵	15,1 (0-50)		15	15-20	1-80 ⁶ , 230 ⁷	31,3 (0,1-600)	-	-	2,6-25	80,0	74,7 (0-100)	55	60-94	66-80
Haushalts- kühl-geräte ⁸	-	15	-	13,5	15	-	0,1	-	-	0,23/l ⁹	-	73,3	-	55	56	23
Industrie- kälte	-	<u>10-30</u> ¹⁰	13,8 (0-43)	17,0	20	20-27	2-8 ¹¹	17,8 (0,03- 1.800) ¹²	-	-	0,1- 9100	80	75,0 (0-100)	55	90-95	80
Raumklima	Dezentrale Split- Geräte (single/multi)	<u>10-13</u>	10,8 (0-33)	13,5	15	10-15	1,5-6	2,9 (0,08-256)	-	0,6-9	2,6-3,7	60/80	84,1 (0-100)	55	50	20-44
	Dezentrale VRF- Geräte	<u>13</u>	9,8 (0-29)	13,5	15	10-15	11,7-13	11,6 (0,4-156)	-	9-18	2,6-3,7	80	77,2 (0-100)	55	85	20-44

Sektor	Teilsektor	Betriebsjahre (a)					Erstfüllmenge (kg)					Rückgewinnungsrate (%)				
		D	VDKF ¹	CZ	F	USA	D	VDKF ¹	CZ	F	USA	D	VDKF ¹	CZ	F	USA
Wärme- pumpen	Bewegliche Klimageräte	10	-	13,5	10	10-15	0,75	-	-	0,5	2,6-3,7	40	-	55	-	0
	Sonstige dezentrale Klimaanlage		-	13,5	-	10-15	-	1,6 (0,3-3,4)	-	-	2,6-3,7	-	87,5 (0-100)	55	-	20-44
	Zentrale RLT-Geräte		13,2 (1-36)	13,5	-	10-15	-	16,6 (0,4-145)	-	-	2,6-3,7	-	72,6 (0-100)	55	-	20-44
	Sonstige zentrale Klimaanlage		11,6 (0-32)	13,5	-	10-15	-	9,4 (0,1-318)	-	-	2,6-3,7	-	65,4 (0-100)	55	-	20-44
	Direktverdampfung	15	7,6 (0-20)	-	15 Allg. WP	20 Allg. WP	0,9-4,6 Allg. WP	11,8 (1,3-60)	-	2,5-15 Allg. WP	3,5-3,6 Allg. WP	65 (2020)- 85 (ab 2040) Allg. WP	78,0 (0-100)	55	45 Allg. WP	-
Sonderanlagen	-	-	14,6 (0-44)	-	-	-	-	8,3 (0,1-228)	-	-	-	-	86,0 (0-100)	55	-	-

Quellen: Für Deutschland (D und VDKF): Eigene Daten aus dem deutschen F-Gas Modell, VDKF (2023); Daten der Ländermodelle für Tschechien (CZ): Müllerová et al. (2020), für Frankreich (F): AFCE & Citepa (2022), für die USA: EPA (2023).

Anmerkungen:

¹ Mittelwert und Minimum und Maximum in Klammern

² Zentralanlagen & Verflüssigungssätze

³ Supermarkt

⁴ Discounter

⁵ Verflüssigungssätze

⁶ Verflüssigungssätze und Discounter

⁷ Supermärkte je 1.000 m²

⁸ Nur R-600a (Isobutan)

⁹ Die Quelle nennt 230 g/l mit einem Verweis auf ein durchschnittliches Volumen von 244 l. Daraus ergeben sich unrealistisch große Füllmengen.

¹⁰ Je nach Anwendung (z.B. Bierkühlung, Tiefkühlkost oder Molkereien) unterschiedlich

¹¹ kg/kW

¹² Leistung (kW) nicht verfügbar

Im Folgenden wird ermittelt, welcher Anpassungsbedarf für die verschiedenen Sektoren der Kälte- und Klimatechnik besteht. Auf die Erstfüllmenge wird in einigen Sektoren dabei nicht eingegangen, da dieser Parameter aufgrund der sehr unterschiedlichen Kategorisierungen teilweise schwierig zu vergleichen ist.

8.1 Gewerbekälte

Der Bereich der Gewerbekälte setzt sich im deutschen (dt.) Modell aus steckerfertigen Geräten, Verflüssigungssätzen und ortsmontierten Anlagen zusammen. Nicht alle Vergleichsmodelle machen diese Unterscheidung, generell werden steckerfertige Geräte aber separat erfasst bzw. modelliert.

Lebensdauer

Das dt. Modell liegt im Bereich der Lebensdauer für steckerfertige Geräte mit zehn Jahren im selben Bereich wie die USA und Tschechien. Die VDKF-Daten und das französische Modell liegen mit 14 bzw. 15 Jahren darüber. Aufgrund der größeren Übereinstimmung der anderen Modelle sehen wir in diesem Bereich keinen Anpassungsbedarf und empfehlen, die Lebensdauer für steckerfertige Geräte bei 10 Jahren zu belassen. Die Lebensdauer von Verflüssigungssätzen mit 12 Jahren sowie ortsmontierten Anlagen mit 10 (Discounter) und 14 (Supermärkte) Jahren ist im deutschen Modell etwas niedriger als in den anderen Modellen. Wir schlagen daher vor, die Lebensdauer von ortsmontierten Anlagen in Discountern um zwei Jahre, auf 12 Jahre, zu erhöhen, um der Realität gerecht zu werden.

Erstfüllmenge

Für steckerfertige Geräte liegt das deutsche Modell mit 0,3 bis 5 kg im Bereich der anderen Vergleichsdaten. Daher ist keine Anpassung erforderlich. Dies gilt ebenso für den Bereich ortsmontierte Anlagen (Discounter: 80 kg/Markt, Supermärkte: 70 bis 230 kg/1000 m² Gesamtfläche) und Verflüssigungssätze (0,5 bis 20 kg).

Rückgewinnungsrate

Im Bereich steckerfertige Geräte liegt das dt. Modell mit 60 % nahe an den gemeldeten Daten des VDKF. Frankreich geht nur von einer Rückgewinnungsrate von 25 % aus. Die USA nehmen hier sogar eine Quote von Null an. Allerdings ist die Kategorisierung nicht speziell auf den Bereich Gewerbekälte bezogen und daher nicht vergleichbar. Da die Quote des dt. Modells sich zwischen den zu vergleichenden Daten bewegt, schlagen wir keine Änderung vor. Dies gilt ebenso für die Rückgewinnungsrate im Bereich ortsmontierte Anlagen und Verflüssigungssätze (80%), die durch die anderen Daten, gestützt wird. Eine Ausnahme bilden hier nur die aus Tschechien stammenden Werte, die aber für alle Sektoren eine Rückgewinnungsrate von 55 % annehmen.

8.2 Haushaltskühlgeräte

Das dieser Sektor in Bezug auf die Gesamtemissionen einen sehr geringen Bereich ausmacht und die Daten durch unterschiedliche Kategorisierung kaum zu vergleichen sind, schlagen wir für diesen Sektor keine Anpassung vor.

8.3 Industriekälte

Lebensdauer

Der Datenvergleich zeigt, dass sich die 30 Jahre Lebensdauer im Bereich der Industriekälte nicht mit den F-Gas-Modellen der anderen Länder bzw. dem VDKF-LEC Datensatz deckt. Die VDKF-

Daten zeigen hier nur eine durchschnittliche Lebensdauer von knapp 14 Jahren. Da das VDKF-LEC Tool im Bereich der Industriekälte aber nicht zwischen Lebensmittelproduktion und anderen Bereichen der Industriekälte differenziert, sind die Daten mit Vorsicht zu betrachten. Dennoch scheinen die 30 Jahre eine etwas überschätzte Zahl zu sein, die auch von Experten von Herstellern von Industriekälteanlagen eher nicht bestätigt werden kann. Wir schlagen daher vor, die Lebensdauer Großkälteanlagen der Industriekälte auf 25 Jahre zu verkürzen. Dies gilt für die Bereiche Bierproduktion, Fleischverarbeitung, Molkereien, Kühlhäuser, Schokoladenproduktion, Weinkühlung, Fruchtsaftproduktion, Tiefkühlkost und sonstige Industrie, die zu 80 % der chemischen Industrie zugerechnet werden kann. Die Lebensdauer für Milchviehbetriebe und Eisbahnen bleibt bei 20 Jahren und auch die Tieftemperaturanwendungen bleiben bei der ursprünglichen Lebensdauer von 10 Jahren.

Erstfüllmenge

Aufgrund der unterschiedlichen Kategorisierung der Länder-Modelle ist ein Vergleich nicht möglich. Wir schlagen keine Anpassung vor.

Rückgewinnungsrate

Die Rückgewinnungsrate von 80 % deckt sich, bis auf die aus Tschechien, die aber für alle Sektoren 55 % annehmen, mit den weiteren Datensätzen und sollte beibehalten werden.

8.4 Raumklimaanlagen

Lebensdauer

Das dt. Modell unterscheidet zwischen Single-Split-Geräten und Multi-Split-Anlagen, VRF-Anlagen und beweglichen Klimageräten. Es zeigt sich, dass die Lebensdauer von 10 Jahren für den Bereich Single-Split-Geräte sowie den beweglichen Klimageräten durch die anderen Datensätze gestützt wird, weshalb wir keine Anpassung vorschlagen. Im Bereich der größeren Anlagen, also Multi-Split- und VRF-Anlagen decken sich die Daten mit 13 Jahren Lebensdauer im Wesentlichen mit den anderen Modelldaten. Allerdings liegt der VDKF-Wert bei nur knapp 10 Jahren. Da hier, im Gegensatz zur Industriekälte die Kategorisierung recht eindeutig ist und wir davon ausgehen, dass Betriebe mit gewissenhafter Betriebsführung das VDKF-LEC Tool nutzen, schlagen wir vor, die Lebensdauer für Multi-Split- und VRF-Anlagen auf 10 Jahre zu verkürzen.

Erstfüllmenge

Die Füllmengen decken sich in allen Kategorien mit den der anderen Datensätze und sollen beibehalten werden.

Rückgewinnungsrate

Auch hier ist eine Unterscheidung der Anlagentypen unabdingbar. Kleine Single-Split-Geräte werden auch in privaten Haushalten verbaut, und die Chance einer nicht ordnungsgemäßen Entsorgung ist deutlich höher. Da diese dann nicht durch Fachbetriebe durchgeführt wird, ist der VDKF-Wert von 84,1 % in der Praxis weniger aussagekräftig. Dies gilt ebenso für bewegliche Raumklimageräte. Im Bereich der größeren Raumklimaanlagen (Multisplit- und VRF) sind Fachbetriebe bei der Entsorgung involviert. Die Daten, sowohl aus dem französischen Modell als auch dem VDKF-Datensatz, decken sich mit denen des deutschen Modells von 80 % und sollten daher beibehalten werden.

8.5 Wärmepumpen

Die Daten des VDKF-Datensatzes beziehen sich nur auf Anlagen aus der Direktverdampfung und sind daher nur eingeschränkt zum Vergleich geeignet. Alle anderen Vergleichsdaten bewegen

sich im dt. Modell in allen drei Kategorien (Lebensdauer, Erstbefüllung und Rückgewinnungsrate) innerhalb der anderen Modellannahmen. Ein Blick sei allerdings auf die Rückgewinnungsrate zu werfen. Da hier die Unterscheidung der Direktverdampfung nicht so sehr ins Gewicht fällt, macht ein Vergleich zwischen VDKF-Daten und dt. Modell Sinn. Der Wert ist in ersterem mit 78 % deutlich höher als die 65 % des dt. Modells. In der Überarbeitung des Wärmepumpenmodells im Jahr 2024 wurde der Wert geprüft und an die Professionalisierung und den technischen Fortschritt in diesem Sektor angepasst. Die Rate wird sukzessive erhöht, und zwar auf 75 % ab dem Jahr 2025 und auf 85% ab dem Jahr 2040.

8.6 Übersicht

Tabelle 43 zeigt eine Übersicht der umgesetzten Änderungen im deutschen F-Gas Modell für die Sektoren der Kälte und Klimatisierung (inkl. Wärmepumpen).

Tabelle 43: Übersicht der Modelländerungen für Kälte- und Klimaanlage inkl. Wärmepumpen

Sektor	Teilsektor	Vorheriger Wert	Neuer Wert
Gewerbekälte	Ortsmontierte Anlagen: Discounter	Lebensdauer 10 Jahre	Lebensdauer 12 Jahre
Industriekälte	-	Lebensdauer 30 Jahre	Lebensdauer 25 Jahre
Raumklima	Dezentrale Split-Geräte (multi)	Lebensdauer 13 Jahre	Lebensdauer 10 Jahre
	Dezentrale VRF-Geräte	Lebensdauer 13 Jahre	Lebensdauer 10 Jahre
Wärmepumpen	-	Rückgewinnungsrate 65%	Rückgewinnungsrate 65% (2020) bis 85% (ab 2040)

9 Ableitung neuer Modellannahmen für elektrische Betriebsmittel (2.G.1)

In den geführten Interviews und auch im Fachgespräch wurde deutlich, dass es Verbesserungspotenziale hinsichtlich sowohl der Entsorgungspraxis allgemein, als auch des Monitorings gibt.

Da die Erhebung der Emissionsdaten durch das Monitoring der Selbstverpflichtung (SV) abgedeckt ist, stellen wir im Folgenden Vorschläge vor, wie eine Verbesserung der Datenbasis im Hinblick auf die Rückgewinnung stattfinden könnte.

9.1 Verbesserungspotenziale des Monitorings der Rückgewinnung von SF₆

Folgende Änderungen könnten zur Verbesserung des Monitorings zur Rückgewinnung von SF₆ beitragen:

1. **Erfassung von Havarien im Fragebogen:** Havarien, also die teilweise komplette Entweichung des SF₆ aus einer Anlage, werden bisher nicht separat erfasst. Da sie von den Netzbetreibern intern sowieso dokumentiert werden, könnte es sinnvoll sein, den Fragebogen um den Punkt Havarien zu erweitern und dort nach der entwichenen Menge zu fragen. Diese Menge würde dann den allgemeinen Emissionen zugerechnet. Zwar würden so nur Daten von Havarien der im Monitoring erfassten Netzbetreiber vorliegen, ggf. könnte aber auf dieser Datengrundlage eine prozentuale Annahme für Havarien im Allgemeinen erstellt werden, die dann stattdessen den Eingang in das Monitoring findet.
2. **Erfassung von Entsorgungsbetrieben:** Wie erwähnt, sind Entsorgungsbetriebe nicht Teil des Monitorings. Zwar gibt es keine Interessenvereinigung wie bei den Netzbetreibern, aber die Anzahl bzw. die wichtigsten Unternehmen sind generell in der Branche bekannt. Sie könnten in eine Datenerfassung mitaufgenommen werden und die jeweiligen Mengen und Entsorgungswege (Verbrennung oder ReUse Solvay) melden.
3. **Nutzung der Abfallbilanzen:** Unternehmen, die SF₆ entsorgen wollen, müssen entsprechende Betriebszertifizierungen vorweisen (Sachkundenachweis und Bundes-Immissionsschutzgesetz-Genehmigung). Diese liegen den jeweiligen Landratsämtern vor und könnten daher über eine Abfrage dieser genutzt werden, um bei den Betrieben eine Erhebung der Mengen durchzuführen. Eine einmalige Erfassung dieser Mengen könnte einen Überblick, sowohl über die Mengen, als auch die Anzahl und Namen der Entsorgungs(fach)betriebe geben, deren Ergebnisse in die Anpassung des Monitorings einfließen könnten.

9.2 Verbesserungspotenziale zur Entsorgung/Rückgewinnung von SF₆

Auch abseits des Monitorings ist eine ordnungsgemäße Entsorgung von SF₆ im Interesse des Umweltschutzes. Die Vorschläge seitens der Industrie, welche in Interviews und dem Workshop erwähnt worden sind, sind im Folgenden gelistet. Folgende Maßnahmen wurden entweder explizit erwähnt oder basieren auf Aussagen zu Problemen hinsichtlich der Entsorgung.

1. **Öffentliches Register von Entsorgungs(fach)betrieben:** Ein öffentliches Register aller Betriebe, die zertifiziert sind, Schaltanlagen und SF₆ zu entsorgen, würde den Zugang für Betreiber mit geringem Fachwissen erleichtern und eine fachgerechte Entsorgung wahrscheinlicher machen. Auf welcher Plattform ein solches Register Sinn machen könnte bzw. rechtlich möglich wäre, müsste diskutiert werden.

2. **Anzahl der Entsorger erhöhen:** Die Entsorgung wird in den kommenden Jahren nicht nur durch das Erreichen des Endes der Lebensdauer vieler Anlagen an Relevanz gewinnen, sondern auch durch das Verbot des Verwendens von Frischware ab 2035. In Interviews wurde deutlich, dass die bisherige Kapazität der Entsorgung diesen Anstieg nicht bewältigen wird. Es wäre also wichtig, Entsorgungsbetriebe, die bisher nicht auf elektrische Betriebsmittel spezialisiert sind, zu motivieren, in dieses Geschäftsfeld einzusteigen. Es gibt einige Entsorger, die neben dem Metall auch die Entsorgung der Schaltanlagen und des SF₆ übernehmen. Es wäre also denkbar Entsorgungsbetriebe, die bisher ausschließlich die anderen Rohstoffe der Anlagen entsorgt haben, über die Entsorgung von SF₆ zu informieren, um ein neues Geschäftsfeld aufzuzeigen.
3. **Informationskampagne für Betreiber:** Betreiber von Schaltanlagen (insbesondere MS) sind sehr divers und haben häufig keine Fachkenntnis zur fachgerechten Entsorgung einer Schaltanlage. Eine großanlegte Aktion, die speziell auf diese Betreiber zugeschnitten ist, könnte hier Abhilfe schaffen. So könnte z.B. in Kooperation mit dem Bundesverband Windenergie, der über 13 Landesverbände verfügt, überlegt werden, wie eine Informationskampagne aussehen muss, die ihre Mitglieder erreichen könnte. Dabei gilt es im Prinzip nur auf die schon vorhandenen Informationen des ZVEI aufmerksam und diese leicht zugänglich zu machen. Andere Interessenvertretungen sollten ebenfalls einbezogen werden.

9.3 Modellannahmen

Kapitel 7.1.5.3 beschreibt die derzeitigen Emissionsfaktoren und Modellannahmen. Die Modellannahmen wurden zuletzt grundlegend durch (Schwarz 2007) bearbeitet und angepasst. Auch wenn diese Überarbeitung schon länger zurückliegt, haben sich die wesentlichen Faktoren nicht geändert. Die Emissionsfaktoren sind in den meisten Fällen bereits so niedrig bzw. genau, dass einfache Anpassungen nicht mehr möglich sind. Die Faktoren aus Herstellung und Bestand werden sich in den nächsten Jahren kaum verändern. Allein die Überprüfung der Referenzanlagen aus der Hochspannung wäre zukünftig nochmal anzudenken. Diese hat erst vor wenigen Jahren stattgefunden und ist laut Aussagen des Forum Netztechnik/Netzbetrieb (FNN) zu dem Ergebnis gekommen, dass die Auswahl weiterhin eine geeignete Datenbasis bietet.

Allerdings sollten die Emissionsfaktoren aus der Außerbetriebnahme, Entsorgung, des ReUse und der Zerstörung spätestens 2030 geprüft werden. Zunächst sollte das Monitoring um Entsorgungs(fach)betriebe erweitert werden. Dies ist relevant, da sie in der Entsorgung eine maßgebliche Rolle spielen. In wenigen Jahren wird die Entsorgung von elektrischen Betriebsmitteln am Ende ihrer Lebensdauer, wie bereits beschrieben, stark an Relevanz gewinnen. Auch werden die Aufbereitung und das Recycling spätestens nach 2035, mit dem Verbot von Frischware, unabdingbar sein. Bis dahin sollten alle Emissionsfaktoren, die sich auf die Entnahme, die Wiederaufbereitung, das ReUse-Verfahren und die Zerstörung von SF₆ beziehen, überprüft werden. Bis dato ist die Überprüfung allerdings noch nicht sinnvoll, da zum einen nicht alle Beteiligten Teil des Monitorings sind, und zum anderen laut Angaben aus der Industrie sowohl die erwarteten Mengen als auch die Preisentwicklung von wiederaufbereitetem SF₆ noch nicht stattgefunden haben.

10 Ausblick

Aus den durchgeführten Recherchen und Datenauswertungen lassen sich folgende Rückschlüsse ziehen:

Auf europäischer Ebene ist in absehbarer Zeit mit umfassenderen Informationen zu Aufbereitungsmengen und beteiligten Unternehmen zu rechnen, da die Berichtspflichten entsprechend ausgeweitet wurden. Die Datenlage wird sich dadurch verbessern.

Für Deutschland ist nach derzeitiger Gesetzeslage nicht mit besseren Daten zu Rücknahme und Wiederaufbereitung von F-Gasen zu rechnen, da zwar Aufzeichnungspflichten bestehen und diese Aufzeichnungen auf Verlangen auch den zuständigen Behörden vorgelegt werden müssen. Durch den Föderalismus sind die Zuständigkeiten für den Vollzug der ChemKlimaschutzV jedoch auf Landes- und zum Teil Kreisebene zersplittert. Es besteht keinerlei behördlicher Auftrag, die Daten aus Aufzeichnungen einzelner Unternehmen zusammenzutragen und auszuwerten, so dass keine bundesweite Gesamtübersicht besteht. Die Revision der ChemKlimaschutzV ist nicht abgeschlossen, lässt allerdings in diesem Punkt keine Änderung erwarten. Auch die Datenerhebung nach UStatG unterscheidet nicht nach Frischware und aufbereiteten Mengen, so dass sich auch in den statistischen Daten keine weitere Aufgliederung finden lassen wird.

Hinsichtlich der Kapazitäten und technischen Möglichkeiten ist davon auszugehen, dass die Relevanz von HFKW-Wiederaufbereitung in den nächsten Jahren zunehmen wird. Der HFKW-Phase down wird zu einer weiteren Verknappung der verfügbaren Mengen an Frischware und weiteren Preissteigerungen führen, so dass die Rückgewinnung und Aufbereitung von HFKW außerhalb der Quote eine legale Möglichkeit zur Weiternutzung von F-Gasen darstellen. Marktüberwachung und staatliche Kontrollmaßnahmen sollten sich auch auf den Verbleib rückgewonnener F-Gase bzw. die Herkunft aufbereiteter F-Gase beziehen.

Die Rückgewinnung und Wiederaufbereitung von SF₆ wird unseres Erachtens nicht im gleichen Maße zunehmen, da kein vergleichbarer Marktanreiz besteht, außerdem viele Netzbetreiberunternehmen und Privatunternehmen nicht über ausreichende Kenntnisse über die gesetzlichen Verpflichtungen verfügen und hohe Entsorgungskosten anfallen.

Die in Kapitel 8 und 9 hergeleiteten Modellannahmen beinhalten auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse keine gravierenden Veränderungen der Rückgewinnungsfaktoren. Im Gegenteil, die vor Jahren hergeleiteten Annahmen werden durch die Ergebnisse der Studie weitgehend bestätigt und zeigen, dass in Deutschland zwar von relevantem Ausmaß, aber nicht von umfassender Rückgewinnung von F-Gasen aus Anwendungen der Kälte-, Klima- und Wärmepumpentechnik sowie elektrischen Betriebsmitteln ausgegangen werden kann.

Weitere Maßnahmen von politischer Seite, aber auch durch Industrie und Verbände sind wünschenswert, um die Rückgewinnung bzw. Rücknahme von F-Gasen sowie die Wiederaufbereitung bzw. Zuführung zur geregelten Zerstörung zu fördern. Diese könnten folgende Punkte beinhalten:

- ▶ Informationskampagne zu den gesetzlichen Verpflichtungen zur Rückgewinnung und Rücknahme von F-Gasen sowie praktische Empfehlungen für Unternehmen.
- ▶ Auswertung von vorliegenden Daten auf Ebene der Bundesländer und Kreise zur Rücknahme von gebrauchten Kältemitteln, Zuführung zur Wiederaufbereitung und Zerstörung. Eine solche Auswertung könnte vom BLAC (Bund-Länder-Arbeitskreis Chemikaliensicherheit) in Zusammenarbeit mit der Servicestelle Marktüberwachung (SMÜ) durchgeführt werden.

- ▶ Erneute Erhebung zu rückgewonnenen und wiederaufbereiteten F-Gasmengen von Seiten der Industrie und/oder Verbände. Dies könnte zu detaillierteren Informationen in einzelnen Sektoren führen.
- ▶ Verbesserte Zusammenarbeit zwischen Abfallbehörden und Institutionen zum Vollzug der ChemKlimaschutzV, um die Problematik bestehender Andienungspflichten an Sonderabfallverbrennungsanlagen in manchen Bundesländern aufzulösen. Die gebrauchten F-Gase sollten nicht zwangsläufig der thermischen Verwertung zugeführt werden, sofern die Möglichkeit zur Aufbereitung besteht.

Quellenverzeichnis

Abfallverzeichnis-Verordnung (2001): Abfallverzeichnis-Verordnung vom 10. Dezember 2001 (BGBl. I S. 3379), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 30. Juni 2020 (BGBl. I S. 1533) geändert worden ist, <https://www.gesetze-im-internet.de/avv/AVV.pdf> (20.11.2025).

AFCE & Citepa (2022): Inventaire des émissions de fluides frigorigènes pour la France métropole. Résultats 2020 et estimation provisoire 2021. <https://www.afce.asso.fr/wp-content/uploads/2022/07/Rapport-AFCE-2022-08-31.pdf> (20.11.2025).

AHRI (2019): AHRI standard 700: 2019 Standard for Specification for Refrigerants. Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute, https://www.ahrinet.org/system/files/2023-06/AHRI_Standard_700_2019.pdf (21.06.2024).

Altfahrzeug-Verordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. Juni 2002 (BGBl. I S. 2214), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 18. November 2020 (BGBl. I S. 2451) geändert worden ist, <https://www.gesetze-im-internet.de/altautov/AltfahrzeugV.pdf> (11.04.2024).

Barmparitsas, N.; Karellas, S.; Pallis, P.; Thanopoulos, S.; Kobelt, D. (2023): An Innovative Heating, Ventilation, Air Conditioning and Refrigeration Circular Economy System for Reducing Carbon Dioxide Emissions in Europe via Extensive Reuse of Existing Fluorinated Gases. *Energies* 16, 7705. <https://doi.org/10.3390/en16237705> (21.06.2024).

Barraut, S.; Saba, S.; Clodic, D. (2010): Inventaires des émissions des fluides frigorigènes et leurs prévisions d'évolution jusqu'en 2022. Institut National du Froid, Frankreich, <https://iifiir.org/fr/fridoc/inventaires-des-emissions-des-fluides-frigorigenes-et-leurs-previsions-4303> (11.04.2024).

Behringer, D.; Martens, K.; Gschrey, B. (2024): Recovery of Fluorinated Refrigerants from Decommissioned RAC Equipment in Germany—Implications for National Emission Reporting under the UNFCCC. *Atmosphere*, 15, 35, <https://www.mdpi.com/2073-4433/15/1/35> (06.06.2024).

Beschluss der Kommission vom 18. Dezember 2014 zur Änderung der Entscheidung 2000/532/EG über ein Abfallverzeichnis gemäß der Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014D0955&from=ET> (29.06.2024).

Birchby, D.; Dubey, J.; Johansen, B.; Hekman, J.; Gschrey, B.; Behringer, D.; Kleinschmidt, J.; Jörß, W.; Liste, V.; Ludig, S.; Wissner, N. (2022): Support contract for an Evaluation and Impact assessment for amending Regulation (EU) No 517/2014 on fluorinated greenhouse gases. CLIMA.A2/ETU/2019/0016, https://climate.ec.europa.eu/document/download/1162616a-4368-4aa0-ba9c-849f5f5a0541_en?filename=f-gas_evaluation_report_en.pdf (01.12.2022).

BWP (2023): Branchenstudie 2023: Marktentwicklung – Prognose – Handlungsempfehlungen. Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e. V., Berlin, Deutschland, https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/waermepumpe/05_Presse/01_Pressemitteilungen/BWP_Branchenstudie_2023_DRUCK.pdf (17.04.2024).

Chemikalien-Klimaschutzverordnung vom 02. Juli 2008 (BGBl. I S. 1139), die zuletzt durch Artikel 299 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist, <https://www.gesetze-im-internet.de/chemklimaschutzv/BJNR-113900008.html> (11.04.2024).

Chemikalien-Ozonschichtverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Februar 2012 (BGBl. I S. 409), die zuletzt durch Artikel 298 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist (ChemOzonSchichtV), <https://www.gesetze-im-internet.de/chemozonschichtv/BJNR263800006.html> (26.06.2024).

Clodic, D., Barrault, S. (2011): 1990 to 2010 Refrigerant inventories for Europe. Previsions on banks and emissions from 2006 to 2030 for the European Union. Final report. Part B – Refrigerant emission scenarios - F-Gas Scenario. Paris, 18. Oktober 2011.

Conrad, H. (2017). Gebrauchte Kältemittel entsorgen oder verwerten?. Haustec.de, <https://www.haustec.de/klima-lueftung/klimatechnik/gebrauchte-kaeltemittel-entsorgen-oder-verwerten> (26.06.2024).

CRO (2023): Auszug aus der Central Registry of Operators für die Jahre 2020 bis 2022, <http://www.cro.ichp.pl/en/about-cro> (04.06.2024).

Daikin (2013a): Loop by Daikin, https://www.daikin.at/de_at/ueber-daikin/umweltverantwortung/loop-by-daikin.html (30.06.2024).

Daikin (2013b): Retradeables - Reclaimed F-gas online trading platform, DAIKIN Airconditioning Central Europe Handels GmbH, <https://retradeables.com/> (21.11.2024).

Daikin (2021): Entsorgung illegaler Kältemittel. In: Kälte Klima Aktuell, Heft 2/2021, https://www.kka-online.info/artikel/kka_Entsorgung_illegaler_Kaeltemittel-3633651.html (30.06.2024).

Destatis (2022): Statistischer Bericht - Abfallentsorgung 2022, Statistisches Bundesamt, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/statistischer-bericht-abfallentsorgung-2190100227005.html> (21.11.2024).

DILO GmbH (2024): SF₆-GAS, <https://dilo.eu/certified-gas/sf6-gas-services/standard-titel> (27.06.2024).

DIN Deutsches Institut für Normung (1998): Kältemittel - Anforderungen und Kurzzeichen (Referenznummer DIN 8960: 1998-11). Beuth Verlag, Berlin.

Dupont, J.L.; Oudart, L. (2024): CO₂ emissions from air conditioning, 57th Informatory Note on Refrigeration Technologies. Methodological Annex. IIF-IIR, <http://dx.doi.org/10.18462/iif.NItec57.07.2024> (30.10.2024).

Durchführungsverordnung (EU) 2024/2195 der Kommission vom 4. September 2024 zur Festlegung der Form der Übermittlung der Berichte über Angaben gemäß Artikel 26 der Verordnung (EU) 2024/573 des Europäischen Parlaments und des Rates über fluoriierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Durchführungsverordnung (EU) Nr. 1191/2014 der Kommission, Amtsblatt der Europäischen Union, Reihe L, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32024R2195> (22.11.2024).

Durchführungsverordnung (EU) 2024/2473 der Kommission vom 19. September 2024 mit Durchführungsbestimmungen zur Verordnung (EU) 2024/573 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Registrierung im F-Gas-Portal und zur Aufhebung der Durchführungsverordnung (EU) 2019/661 der Kommission, Amtsblatt der Europäischen Union, Reihe L, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32024R2473> (22.11.2024).

EEA (2023): Ozone-depleting substances 2023, European Environment Agency, <https://www.eea.europa.eu/themes/climate/ozone-depleting-substances-and-climate-change-1/ozone-depleting-substances> (21.07.2024).

eEFBV (2025): eEFBV Entsorgungsfachbetriebsregister. <https://fachbetriebsregister.gadsys.de/fachbetriebsregister/> (25.11.2025).

Elektro- und Elektronikgerätegesetz vom 20. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1739), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 8. Dezember 2022 (BGBl. I S. 2240) geändert worden ist, https://www.gesetze-im-internet.de/elektrog_2015/ElektroG.pdf (11.04.2024).

Europäische Kommission (2024). F-Gas-Berichterstattung – neues Format, https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/14268-F-Gas-Berichterstattung-neues-Format_de (18.06.2024).

EPA (2023) Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2021. U.S. Environmental Protection Agency, EPA 430-R-23-002 <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks-1990-2021> (30.07.24).

Jörß, W.; Ludig, S.; Liste, V. (2022): Fluorinated greenhouse gases 2022 Data reported by companies on the production, import, export and destruction of fluorinated greenhouse gases in the European Union, 2007-2021. European Environment Agency (EEA), European Topic Centre on Climate change mitigation, <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-cm/products/etc-cm-report-2022-03> (17.04.2024).

Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz KrWG), <https://www.bmu.de/gesetz/kreislaufwirtschaftsgesetz> (26.06.2024).

Guallar-Herrero, E. (2021): Kältemittel-Aufbereitung in drei Schritten erklärt - Ressourcenschonung und Umweltschutz. Kälte Klima Aktuell, https://www.kka-online.info/artikel/kka_Kaeltemittel-Aufbereitung_in_drei_Schritten_erklaert-3612501.html (21.06.2024).

Harrell, F. Jr (2023): Hmisc: Harrell Miscellaneous. R package version 5.1-0, <https://CRAN.R-project.org/package=Hmisc> (17.04.2024).

Heckmann, W.; Valov, M.; Reimann, T. (2020): Impact assessment of F-gas free medium voltage GIS applications. Fraunhofer I Institute for Energy Economics and Energy System Technology, https://www.iee.fraunhofer.de/en/research_projects/search/laufende/f-gas-free.html (29.06.2024).

IPCC (2006): IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC, Kanagawa, Japan, ISBN 4-88788-032-4, <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html> (11.04.2024).

IPCC (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, <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/> (14.04.2024).

IPCC (2019): Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC, Kanagawa, Japan, ISBN 978-4-88788-232-4, <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html> (11.04.2024).

IPCC (2021): 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, USA, S. 2391ff.

IPCC (2022): Emission Factor Database, DFDB. Intergovernmental Panel on Climate Change, <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php> (01.12.2022).

Kim, S.; Kim, E.-K. (2015): Regular emission characteristics of HFC-134a from mobile air conditioners. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 21, 489–493.

Klostermann, N. (2023): mündliche Mitteilung vom 22.06.2023. Leiter Business Management Kältemittel, Industrial Gases & Services, Westfalen AG.

LAGA (2023): Bericht über die Rückgewinnung von Kälte- und Treibmitteln bei der Behandlung von FCKW-, HFCKW-, HFKW- und KW-haltigen Kühlgeräten und anderen Wärmeüberträger-Geräten. Bericht an die UMK vom 27.02.2023 https://www.laga-online.de/documents/bericht-an-umk-zur-rueckgewinnung-von-kaeltemittel-2022-02-27_1683281751.pdf (07.11.2024).

LAG GADSYS, Fachbetriebsregister – Entsorgungsfachbetriebe: <https://www.zks-abfall.de/entsorgungsfachbetriebeverordnung/fachbetriebsregister-entsorgungsfachbetriebe> (17.10.2024).

Langhirt, M. (2023): mündliche Mitteilung vom 22.06.2023. Verkaufsleiter Nachhaltige Kältemitteltechnologien, TEGA – Technische Gase und Gastechnik GmbH.

Ludig, S.; Jörß, W.; Liste, V. (2023): Fluorinated greenhouse gases 2023 - Data reported by companies on the production, import, export and destruction of fluorinated greenhouse gases in the European Union, 2007-2022, <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-cm/products/etc-cm-report-2023-04/> (21.11.2024).

Müllerová, M.; Krtková, E.; Rošková, Z. (2020): F-Gases: Trends, Applications and Newly Applied Gases in the Czech Republic. Atmosphere, 11(5), 455, <https://doi.org/10.3390/atmos11050455> (10.12.22).

Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 18. August 2021, https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_18082021_Igi25025005.htm (11.04.2024).

Ondrušová, B.; Krtková, E. (2018): The Phoenix calculation model for emission estimates of F-gases used in refrigeration and air conditioning. Meteorologické Zprávy, 71, 24–29.

R Core Team (2023): R: A Language and Environment for Statistical Computing, <https://www.R-project.org/> (17.04.2024).

Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 269/34, https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:02fa83cf-bf28-4afc-8f9f-eb201bd61813.0003.02/DOC_1&format=PDF (11.04.2024).

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. Amtsblatt der Europäischen Union, L161/12, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0040> (11.04.2024).

Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. Amtsblatt der Europäischen Union, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:02008L0098-20251016> (20.11.2025).

Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 04. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte. Amtsblatt der Europäischen Union, L 197/38, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019> (11.04.2024).

Schwarze, T. (2023): mündliche Mitteilung vom 19.01.2022. Technical Marketing Manager, Solvay GmbH.

Schwarz, W. (2005): Emissionen, Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren von fluorierten Treibhausgasen (F-Gasen) in Deutschland für die Jahre 1995-2002 – Anpassung an die Anforderungen der internationalen Berichterstattung und Implementierung der Daten in das zentrale System Emissionen (ZSE) – FKZ 201 41 261/01. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/2902.pdf> (24.04.2024).

Schwarz, W. (2007): Effektivere Datenerhebung für das SF₆-Monitoring der Netzbetreiber in der Hochspannung. Gutachten für den Verband der Netzbetreiber – VDN e.V. beim VDEW und den VIK Verband der industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V., Juni 2007, Frankfurt am Main, Öko-Recherche.

Schwarz, W.; Kimmel, T.; Gschrey, B.; Leisewitz, A.; Sauer, J. (2013): Modelle für die Inventarerhebung von F-Gasen – Modelle zur Ermittlung der Inventardaten für die Emissionsberichterstattung fluoriierter Treibhausgase (HFKW, FKW und SF₆) in ausgewählten Quellgruppen - FKZ 363 01 351. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Umweltstatistikgesetz vom 16. August 2005 (BGBl. I S. 2446), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 22. September 2021 (BGBl. I S. 4363) geändert worden ist, https://www.gesetze-im-internet.de/ustatg_2005/UStatG.pdf (11.04.2024).

UNEP TEAP (2018): Volume 2: Decision XXIX/4 TEAP Task Force Report on Destruction Technologies for Controlled Substances, S.30 – 31. <https://ozone.unep.org/sites/default/files/2019-04/TEAP-DecXXIX4-TF-Report-April2018.pdf> (29.06.2024).

UNFCCC (2023a): Nationale Inventarberichterstattung für Deutschland unter der Klimarahmenkonvention. Common Reporting Format (CRF) Table, <https://unfccc.int/documents/627938> (08.03.2024).

UNFCCC (2023b): Nationale Inventarberichterstattung für Österreich unter der Klimarahmenkonvention. National Inventory Report (NIR), <https://unfccc.int/documents/226418> (17.04.2024).

VDKF (2023): Auszug von rückgewonnenen Kältemittelmengen aus stillgelegten Kälte- und Klimaanlage für die Jahre 2017 bis 2021 aus der VDKF-LEC Datenbank, <https://www.vdkf-lec.de/download/download-branchensoftware/> (18.04.2024).

VDN; VIK; ZVEI; SOLVAY (2005): Selbstverpflichtung der SF₆-Produzenten, Hersteller und Betreiber von elektrischen Betriebsmitteln > 1kV zur elektrischen Energieübertragung und -verteilung in der Bundesrepublik Deutschland zu SF₆ als Isolier- und Löschgas, https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Luft/sv_sf6_bf.pdf (24.04.2024).

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. Amtsblatt der Europäischen Union, L 150/195, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32014R0517> (11.04.2024).

Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen, zur Änderung und Aufhebung der Richtlinien 67/548/EWG und 1999/45/EG und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (CLP-Verordnung). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A32008R1272> (30.10.2024).

Verordnung (EU) Nr. 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates, der Richtlinien 94/22/EG, 98/70/EG, 2009/31/EG, 2009/73/EG, 2010/31/EU, 2012/27/EU und 2013/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates, der Richtlinien 2009/119/EG und (EU) 2015/652 des Rates und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates (Governance-Verordnung), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R1999> (30.10.2024).

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 (19.06.2024).

Verordnung (EU) 2024/590 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Februar 2024 über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen, und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1005/2009. Amtsblatt der Europäischen Union, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202400590 (19.06.2024).

Warncke, K.; Gschrey, B. (2021): Inventarermittlung der F-Gase 2019/2020 - Daten von HF(C)KW, FKW, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE und PFPME für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für die Berichtsjahre 2019 und 2020. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/inventarermittlung-der-f-gase-20192020> (30.10.2024).

Warncke, K.; Gschrey, B. (2024): Inventarermittlung der F-Gase 2021/2022 - Daten von HF(C)KW, FKW, SF₆, NF₃, SF₅CF₃, H(C)FE und PFPME für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für die

Berichtsjahre 2021 und 2022. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau,
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/inventarermittlung-der-f-gase-20212022> (18.04.2024).

Westfalen (2019): Rücknahme und Aufarbeitung gebrauchter Kältemittel – Das nachhaltige Aufarbeitungskonzept von Westfalen,
https://web.archive.org/web/20240712081317/https://westfalen.com/fileadmin/user_upload/dateien-de/pdf/igs/kaeltemittel-westfalen-ifp4-ruecknahme-aufbereitung-gebrauchter-kaeltemittel.pdf (21.06.2024).

ZVEI (2018): Leitfaden Hinweise zu Verwendung, Transport und Entsorgung von SF₆ und SF₆-befüllten Betriebsmitteln aus der elektrischen Energieversorgung,
https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2018/Oktober/SF6_Anwenderleitfaden/ZVEI-Anwenderleitfaden-final.pdf (26.06.2024).

ZVEI (2023): Leitfaden Umweltgerechte Außerbetriebnahme von SF₆-isolierten Betriebsmitteln. Verband der Elektro- und Digitalindustrie, <https://www.zvei.org/presse-medien/publikationen/umweltgerechte-ausserbetriebnahme-von-sf6-isolierten-betriebsmitteln> (26.06.2024).

Anhang

A.1 Angaben zum VDKF-LEC-Datensatz

Tabelle A 1: Anzahl der stillgelegten Kälte- und Klimaanlage im VDKF-LEC Datensatz für die verschiedenen Sektoren und Teilsektoren nach Kältemittel und Jahr

Sektor, Teilsektor und Kältemittel	2017	2018	2019	2020	2021	Summe
2.F.1.a Gewerbekälte - Ortsmontierte Anlagen						
R-12	4	0	0	0	0	4
R-22	17	29	13	8	8	75
R-134a	27	39	43	26	43	178
R-143a	0	1	0	0	0	1
R-401A	0	3	0	3	0	6
R-402A	1	2	0	2	0	5
R-403B	0	1	0	0	0	1
R-404A	91	92	70	101	65	419
R-407C	20	15	11	3	18	67
R-407F	0	5	1	4	1	11
R-409A	1	0	0	0	0	1
R-410A	5	5	4	6	3	23
R-413A	1	5	1	1	0	8
R-417A	0	1	0	1	0	2
R-422A	2	1	0	0	0	3
R-422D	8	7	7	6	5	33
R-437A	0	0	0	1	0	1
R-448A	0	0	0	0	1	1
R-449A	0	3	4	12	7	26
R-450A	0	0	6	0	1	7
R-452A	0	1	0	2	2	5
R-502	1	0	0	0	0	1
R-504	1	0	0	0	0	1

Sektor, Teilsektor und Kältemittel	2017	2018	2019	2020	2021	Summe
R-507A	8	20	8	7	2	45
R-744	0	0	1	0	0	1

2.F.1.a Gewerbekälte - Steckerfertige Geräte

R-12	0	0	0	0	1	1
R-22	1	4	1	1	1	8
R-134a	17	12	5	4	14	52
R-401A	0	0	0	2	0	2
R-404A	9	21	22	12	19	83
R-407A	0	1	0	0	0	1
R-407C	2	1	3	1	1	8
R-409A	10	0	1	0	0	11
R-410A	0	0	2	1	1	4
R-413A	0	1	0	0	1	2
R-422D	0	0	0	1	1	2
R-448A	0	0	2	0	0	2
R-449A	0	0	0	0	1	1
R-507A	1	1	0	0	0	2

2.F.1.b Haushaltskälte

R-12	4	3	4	0	4	15
R-22	0	0	0	1	0	1
R-134a	0	4	4	2	1	11
R-404A	6	0	2	0	0	8
R-407C	0	1	0	0	1	2
R-290	0	1	0	0	0	1
R-600a	5	3	10	3	4	25

2.F.1.c Industriekälte

R-12	6	14	18	1	1	40
R-22	20	16	7	13	9	65

Sektor, Teilsektor und Kältemittel	2017	2018	2019	2020	2021	Summe
R-23	0	1	7	4	3	15
R-134a	120	149	79	146	145	639
R-143a	0	0	0	1	0	1
R-402A	0	0	2	0	0	2
R-404A	22	19	16	30	19	106
R-407C	40	58	35	34	50	217
R-407F	0	1	0	0	3	4
R-410A	4	9	7	8	6	34
R-417A	2	0	0	2	1	5
R-422A	0	0	0	1	1	2
R-422D	12	3	4	4	11	34
R-448A	0	1	0	1	0	2
R-449A	0	0	0	2	1	3
R-452A	0	0	0	1	2	3
R-507A	4	5	7	7	1	24
R-718	0	6	0	0	0	6

2.F.1.d Transportkälte

R-404A	9	6	1	0	1	17
R-407C	0	1	0	0	0	1
R-452A	0	3	0	0	0	3
R-507A	0	0	2	0	0	2

2.F.1.f Stationäre Klimaanlage - Dezentrale Split-Geräte (single/multi)

R-22	78	84	50	48	31	291
R-23	0	0	0	0	1	1
R-32	0	2	5	8	7	22
R-134a	35	44	30	45	25	179
R-404A	3	4	2	2	8	19
R-407B	0	1	0	0	0	1

Sektor, Teilsektor und Kältemittel	2017	2018	2019	2020	2021	Summe
R-407C	147	186	167	117	86	703
R-407D	0	0	0	0	1	1
R-407F	1	0	0	0	1	2
R-410A	290	396	388	361	357	1792
R-417A	2	2	8	0	2	14
R-422D	8	5	7	1	2	23
R-427A	0	1	0	0	0	1
R-450A	0	0	1	0	0	1
R-507A	0	0	1	0	0	1
R-290	0	0	0	1	0	1

2.F.1.f Stationäre Klimaanlage - Dezentrale VRF-Geräte

R-22	5	5	6	4	2	22
R-134a	0	2	2	1	2	7
R-407C	9	9	8	8	6	40
R-410A	17	28	25	33	37	140
R-422D	0	1	1	0	0	2
R-407C	14	8	6	4	4	36
R-410A	7	10	5	4	4	30

2.F.1.f Stationäre Klimaanlage - Zentrale RLT-Geräte

R-22	13	12	7	3	4	39
R-134a	1	2	1	3	4	11
R-404A	2	1	0	2	0	5
R-407C	17	18	19	20	14	88
R-410A	12	11	9	15	9	56
R-417A	1	0	1	0	0	2
R-422D	2	1	4	1	0	8
R-513A	0	0	1	0	0	1

2.F.1.f Stationäre Klimaanlage - Sonstige zentrale Klimaanlage

Sektor, Teilsektor und Kältemittel	2017	2018	2019	2020	2021	Summe
R-22	15	26	2	6	5	54
R-32	0	0	0	1	0	1
R-134a	7	17	14	55	35	128
R-404A	1	1	1	3	2	8
R-407C	26	34	18	33	15	126
R-410A	27	13	16	18	13	87
R-417A	0	1	0	0	1	2
R-422D	2	4	2	1	0	9
R-427A	0	0	1	0	0	1
2.F.1.f Stationäre Klimaanlage - Bewegliche Raumklimageräte						
R-22	2	1	3	1	1	8
R-134a	1	0	0	0	0	1
R-404A	3	0	0	0	0	3
R-407C	1	1	3	1	0	6
R-410A	1	2	2	4	3	12
2.F.1.f Stationäre Klimaanlage - Sonstige Klimaanlage						
R-134a	0	3	0	0	0	3
R-407C	1	0	1	0	0	2
R-410A	0	1	0	0	0	1
2.F.1.f Stationäre Klimaanlage - Wärmepumpen (Direktverdampfung)						
R-22	0	1	0	0	0	1
R-32	0	0	0	1	0	1
R-134a	0	1	1	2	1	5
R-407C	1	1	0	0	2	4
R-410A	4	4	12	2	5	27
R-422D	1	1	0	0	0	2
2.F.1.f Stationäre Klimaanlage - Wärmepumpen (Mehrkreisssystem)						
R-134a	2	5	1	3	1	12

Sektor, Teilsektor und Kältemittel	2017	2018	2019	2020	2021	Summe
R-407C	0	1	0	1	3	5
R-410A	1	2	0	3	2	8
R-290	0	1	0	0	0	1
Unbekannt						
R-12	1	1	1	1	0	4
R-22	8	9	2	4	0	23
R-23	2	6	2	1	0	11
R-134a	18	19	55	32	27	151
R-403B	1	0	0	0	0	1
R-404A	7	11	7	7	4	36
R-407C	3	8	13	7	20	51
R-408A	0	0	0	0	1	1
R-409A	0	1	0	0	0	1
R-410A	3	2	6	4	4	19
R-417A	1	0	0	0	0	1
R-422D	0	1	0	1	0	2
R-449A	0	1	0	0	0	1
R-452A	0	0	1	1	0	2
R-502	0	1	0	0	0	1
R-507A	2	2	4	0	0	8
R-513A	0	0	1	0	0	1
Gesamt	1.287	1.591	1.333	1.340	1.212	6.763

Quelle: VDKF (2023)

Tabelle A 2: Anzahl der stillgelegten Kälte- und Klimaanlage, gefiltert nach Anlagen für die Betriebsdauern verfügbar waren, im VDKF-LEC Datensatz für die verschiedenen Sektoren und Teilsektoren nach Kältemittel und Jahr

Sektor	Teilsektor	Kältemittel	2017	2018	2019	2020	2021	Summe
2.F.1.a Gewerbekälte	Ortsmontierte Anlagen	R-22	17	25	13	7	7	69
		R-134a	24	32	39	25	41	161
		R-404A	79	81	63	97	62	382
		R-407C	20	12	10	3	18	63
		R-449A	0	2	4	12	7	25
		R-507A	8	16	3	7	1	35
	Steckerfertige Geräte	R-134a	13	10	3	4	11	41
		R-404A	6	15	19	12	18	70
2.F.1.b Haushaltskälte	Haushaltskühlgeräte	R-600a	5	3	10	3	4	25
2.F.1.c Industriekälte	-	R-12	6	14	18	1	1	40
		R-22	19	16	7	12	9	63
		R-134a	119	146	78	142	144	629
		R-404A	22	19	16	28	18	103
		R-407C	37	57	32	33	46	205
		R-410A	4	9	4	6	5	28
		R-422D	9	1	2	4	9	25
2.F.1.f Stationäre Klimaanlage	Dezentrale Split-Geräte (single/multi)	R-22	54	60	44	43	25	226
		R-134a	3	16	10	32	14	75
		R-407C	126	165	137	103	77	608
		R-410A	237	332	322	305	316	1.512
	Dezentrale VRF-Geräte	R-407C	8	8	7	8	6	37
		R-410A	11	26	24	30	33	124
	Zentrale RLT-Geräte	R-22	11	12	6	2	4	35
		R-407C	14	18	19	17	11	79
		R-410A	11	11	9	14	9	54
		R-22	15	26	1	6	5	53

Sektor	Teilsektor	Kältemittel	2017	2018	2019	2020	2021	Summe
	Sonstige zentrale Klimaanlage	R-134a	7	16	13	55	34	125
		R-407C	25	34	16	31	15	121
		R-410A	26	13	15	17	13	84
	Wärmepumpen (Direktverdampfung)	R-410A	2	4	12	2	5	25
Unbekannt	-	R-134a	16	17	53	30	26	142
		R-404A	5	11	7	7	3	33
		R-407C	2	6	9	7	20	44
Gesamt	-	-	961	1.233	1.025	1.105	1.017	5.341

Quelle: VDKF (2023)