

TEXTE

164/2020

Implementierung des EU-HFKW-Phase-down in Deutschland

Realitätscheck und Projektion

TEXTE 164/2020

Projektnummer 108094

FB000298

Implementierung des EU-HFKW-Phase-down in Deutschland

Realitätscheck und Projektion

von

Barbara Gschrey, Steffi Osterheld, Julia Kleinschmidt
Öko-Recherche GmbH, Frankfurt/Main

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

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

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

Durchführung der Studie:

Öko-Recherche GmbH
Münchener Straße 23a
60329 Frankfurt/Main

Abschlussdatum:

November 2018

Redaktion:

Fachgebiet III 1.4 Stoffbezogene Produktfragen
Dr. Diana Thalheim

Publikationen als pdf:

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, September 2020

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

Kurzbeschreibung: Implementierung des EU HFKW-Phase-down in Deutschland

Die Verordnung (EU) Nr. 517/2014 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006 („F-Gas-VO“) gibt seit dem Jahr 2015 mittels des „Phase-down“ eine schrittweise Reduzierung der in der EU verwendeten Mengen an teilfluorierten Kohlenwasserstoffen (HFKW) um 79 % bis zum Jahr 2030 vor. Betrachtungen, in welchem Umfang die gesetzlichen Vorgaben zu einer Durchsetzung von HFKW-Alternativen in den einzelnen betroffenen Sektoren in Deutschland geführt haben, gab es bislang nicht.

Dieses Vorhaben beleuchtet den Stand der Umsetzung der F-Gas-VO in Deutschland und analysiert die aktuelle Verwendung von HFKW-Alternativen im Kälte-Klima-Sektor. Zudem zeigen Projektionen die Marktdurchdringung der Alternativen in den Sektoren Gewerbekälte, Industriekälte, Transportkälte sowie der stationären und mobilen Klimatisierung bis zum Jahr 2030, wobei Neu- und Bestandsanlagen betrachtet werden. Alle Daten werden mit Hilfe eines Modells berechnet, wobei detaillierte Annahmen zu den künftigen Verwendungsmengen von HFKW sowie deren Alternativen getroffen wurden.

Die Gegenüberstellung der in Deutschland zur Verfügung stehenden HFKW-Verwendungsmengen (SOLL-Mengen) und der projizierten HFKW-Mengen (IST-Mengen) in der Kälte- und Klimatechnik zeigt 2018 über alle Sektoren ein deutliches Überschreiten der insgesamt zur Verfügung stehenden HFKW-Mengen, ausgedrückt in CO₂-Äquivalenten. Zwar sinken entsprechend der getroffenen Annahmen die HFKW-Verwendungsmengen im IST-Szenario kontinuierlich, allerdings nicht in ausreichendem Maße, um in den Jahren der Reduktionsschritte das SOLL zu erfüllen. Dabei ist auch zu beachten, dass andere Anwendungen außerhalb der Kälte- und Klimatechnik, wie etwa der Einsatz von HFKW als Schaumtreibmittel, Aerosol, Lösemittel oder Feuerlöschmittel, noch nicht eingerechnet sind. Auch der HFKW-Bedarf für die Umrüstung von Bestandsanlagen ist im Modell nicht berücksichtigt. Daneben wird grundsätzlich angenommen, dass fortlaufend technische Innovationen stattfinden, die zur Verringerung der erforderlichen HFKW-Mengen führen.

In den einzelnen Anwendungssektoren stellt sich das Bild sehr unterschiedlich dar: Für viele Sektoren wird eine kontinuierliche Überschreitung der zur Verfügung stehenden HFKW-Mengen projiziert. In der Industriekälte ist jedoch mit einem deutlichen Rückgang der Verwendungsmengen zu rechnen und auch andere Sektoren können nach anfänglichem Überschreiten der Mengen ihren HFKW-Bedarf durch den Einsatz von Niedrig-GWP-Kältemitteln deutlich reduzieren (Flüssigkeitskühlsätze und PKWs). Insgesamt können gemäß diesen Berechnungen die EU HFKW-Phase-down Schritte nur zeitverzögert erfüllt werden.

Abstract: Implementation of the EU HFC phase-down in Germany

Regulation (EU) No 517/2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No 842/2006 (“F-gas Regulation”) stipulates a gradual reduction of quantities of hydrofluorocarbons (HFC) used in the EU through the “phase-down” by 79 % until 2030. So far, the status of implementation of the legal requirements regarding the market penetration of HFC alternatives in different application sectors in Germany have not been available.

Within this project, an assessment of the status of implementation of the F-gas Regulation in Germany and the current use of HFC alternatives in the refrigeration and air-conditioning application sectors is undertaken. Furthermore, projections of the potential market penetration of HFC alternatives in commercial refrigeration, industrial refrigeration, transport refrigeration as well as in the stationary and mobile air-conditioning application sector for the time period until 2030 are provided and refer to both new and existing installations.

A comparison of the HFC quantities available in Germany (SOLL Scenario) and the projected HFC quantities (IST Scenario) in refrigeration and air conditioning applications in 2018 show that the totally available quantities are exceeded. While in the IST scenario HFC quantities decrease steadily according to the assumptions made, the reduction does not keep pace with the steps of the EU HFC phase-down steps in the SOLL Scenario. It needs to be emphasized that other sectors outside of the refrigeration and air conditioning applications such as the use of HFCs as foam blowing agents, propellants, solvents and fire protection agents are not yet included in the model results. The detailed HFC demand for the retrofit of existing refrigeration and air conditioning systems is also not accounted for in the outcome. Besides, it is assumed that technical innovation leading to further reductions of the HFC demand is constantly taking place.

The situation varies between refrigeration and air conditioning applications: For many applications it is projected that the available HFC quantities will be exceeded several years. However, in industrial refrigeration a significant decrease of the HFC use is expected and HFC demand is reduced also in other application sectors via the enhanced use of low-GWP refrigerants (chillers and passenger cars). Overall, the EU HFC phase-down steps can only be reached with delay according to these modelling results.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis.....	11
Abkürzungsverzeichnis.....	14
Zusammenfassung.....	16
Summary	17
1 Hintergrund	18
2 Zielsetzung.....	20
3 Projektionen zur HFKW-Verwendung in Deutschland	21
3.1 Vorgehensweise.....	21
3.2 Aktualisierung und Anpassungen des Modells	22
3.3 Alternativtechnologien und Marktdurchdringungsraten	22
3.3.1 Mobile Kälte- und Klimaanwendungen	24
3.3.2 Stationäre Kälte- und Klimaanwendungen.....	28
3.4 SOLL- und IST-Szenario.....	39
3.4.1 SOLL-Szenario.....	39
3.4.2 IST-Szenario.....	39
4 Ergebnisse der Modellierung	40
4.1 HFKW-Verwendungsmengen im SOLL- und IST-Szenario	40
4.2 HFKW-Verwendungsmengen nach Neu- und Bestandsanlagen im IST-Szenario	43
4.3 HFKW-Verwendungsmengen nach Sektoren im IST-Szenario	46
4.3.1 Gewerbekälte.....	49
4.3.2 Industriekälte	52
4.3.3 Transportkälte.....	54
4.3.4 Stationäre Klimatisierung.....	56
4.3.5 Flüssigkeitskülsätze.....	57
4.3.6 Mobile Klimatisierung – PKW	59
4.3.7 Mobile Klimatisierung – Sonstige	60
5 Schlussfolgerungen.....	62
6 Quellenverzeichnis	65
A Hintergrundinformationen nach Anwendungssektoren.....	66
A.1 Gewerbekälte.....	66
A.2 Industriekälte	69
A.3 Transportkälte.....	69

A.4	Stationäre Klimatisierung.....	70
A.5	Mobile Klimatisierung – Pkw:	72
A.6	Flüssigkeitskühlsätze.....	72
A.7	Mobile Klimatisierung – Sonstige.....	74
B	Annahmen für die Berechnung	75
B.1	Annahmen zum Sektorwachstum im IST-Szenario 2018 - 2030	75
B.2	Emissionsfaktoren pro Sektor	76
C	Berechnete Ergebnisse.....	77
C.1	Verbrauchstabellen nach Sektoren.....	77
C.1.1	Gewerbekälte.....	77
C.1.2	Industriekälte	78
C.1.3	Transportkälte.....	78
C.1.4	Stationäre Klimatisierung.....	78
C.1.5	Flüssigkeitskühlsätze.....	79
C.1.6	Mobile Klimatisierung – PKW	79
C.1.7	Mobile Klimatisierung – Sonstige	79

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vergleich der HFKW-Verwendungsmengen in Deutschland im SOLL- und IST-Szenario auf Grundlage des deutschen F-Gas-Modells (in kt CO ₂ eq.)	41
Abbildung 2:	Aufteilung der HFKW-Verwendungsmengen nach stationären und mobilen Kälte- und Klimaanwendungen im IST-Szenario (in kt CO ₂ eq.).....	42
Abbildung 3:	Aufteilung der HFKW-Verwendungsmengen nach Neuanlagen (Erstfüllung) und Bestandsanlagen (Nachfüllung) im IST-Szenario (in kt CO ₂ eq.)	43
Abbildung 4:	Aufteilung der HFKW-Verwendungsmengen nach Neuanlagen (Erstfüllung) und Bestandsanlagen (Nachfüllung) im IST-Szenario nach Art der Anwendung (in kt CO ₂ eq.).....	44
Abbildung 5:	Entwicklung der IST-HFKW-Verwendungsmengen in Neuanlagen (Erstfüllung) und Bestandsanlagen (Nachfüllung) (in kt CO ₂ eq.).....	45
Abbildung 6:	Entwicklung der IST-HFKW-Verwendungsmengen nach Sektoren im Vergleich zum SOLL-Szenario (in kt CO ₂ eq.).....	46
Abbildung 7:	Darstellung der Abweichung der HFKW-Verwendungsmengen zwischen SOLL- und IST-Szenario nach Sektoren (in kt CO ₂ eq.)	47
Abbildung 8:	Entwicklung der IST-HFKW-Verwendungsmengen in der Gewerbekälte nach Verwendungsart im Vergleich zum SOLL-Szenario (in kt CO ₂ eq.)	49
Abbildung 9:	Darstellung der Abweichung der HFKW-Verwendungsmengen zwischen SOLL- und IST-Szenario in der Gewerbekälte nach Verwendungsart (in kt CO ₂ eq.).....	50
Abbildung 10:	Entwicklung der IST-HFKW-Verwendungsmengen in der Industriekälte nach Verwendungsart im Vergleich zum SOLL-Szenario (in kt CO ₂ eq.)	52
Abbildung 11:	Darstellung der Abweichung der HFKW-Verwendungsmengen zwischen SOLL- und IST-Szenario in der Industriekälte nach Verwendungsart (in kt CO ₂ eq.).....	53
Abbildung 12:	Darstellung der Abweichung der HFKW-Verwendungsmengen zwischen SOLL- und IST-Szenario in der Transportkälte nach Verwendungsart (in kt CO ₂ eq.).....	54
Abbildung 13:	Entwicklung der IST-HFKW-Verwendungsmengen in der Transportkälte nach Verwendungsart im Vergleich zum SOLL-Szenario (in kt CO ₂ eq.)	55
Abbildung 14:	Entwicklung der IST-HFKW-Verwendungsmengen in der stationären Klimatisierung (ohne Flüssigkeitskühlsätze) nach Verwendungsart im Vergleich zum SOLL-Szenario (in kt CO ₂ eq.).....	56

Abbildung 15:	Darstellung der Abweichung der HFKW-Verwendungsmengen zwischen SOLL- und IST-Szenario in der stationären Klimatisierung nach Verwendungsart (in kt CO ₂ eq.)	57
Abbildung 16:	Entwicklung der IST-HFKW-Verwendungsmengen bei Flüssigkeitskühlsätzen nach Verwendungsart im Vergleich zum SOLL-Szenario (in kt CO ₂ eq.)	58
Abbildung 17:	Darstellung der Abweichung der HFKW-Verwendungsmengen zwischen SOLL- und IST-Szenario in der Pkw-Klimatisierung (in kt CO ₂ eq.).....	59
Abbildung 18:	Darstellung der Abweichung der HFKW-Verwendungsmengen zwischen SOLL- und IST-Szenario in der mobilen Klimatisierung (ohne Pkw) (in kt CO ₂ eq.)	60
Abbildung 19:	Zu erwartende HFKW-Verwendungsmengen in Deutschland über alle Sektoren mit prozentualen Aufschlag gemäß Baseline für die in diesem Vorhaben nicht modellierten Sektoren 2018 - 2030.....	64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der am Markt verfügbaren oder kurz vor der Markteinführung stehenden Alternativen	22
Tabelle 2:	Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der mobilen Klimatisierung (Pkws) bis zum Jahr 2030	24
Tabelle 3:	Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der mobilen Klimatisierung (Nutzfahrzeuge) bis zum Jahr 2030	25
Tabelle 4:	Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der mobilen Klimatisierung (Schienenfahrzeuge) bis zum Jahr 2030	25
Tabelle 5:	Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der mobilen Klimatisierung (Busse) bis zum Jahr 2030	26
Tabelle 6:	Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der Transportkälte (Kühlfahrzeuge > 7,5 t und Kühlanhänger) bis zum Jahr 2030	27
Tabelle 7:	Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der Transportkälte (Kühlfahrzeuge < 7,5 t) bis zum Jahr 2030	27
Tabelle 8:	Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der Transportkälte (Kühlcontainer) bis zum Jahr 2030	28
Tabelle 9:	Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der Gewerbekälte (steckerfertige Geräte) bis zum Jahr 2030	29
Tabelle 10:	Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der Gewerbekälte (Zentralanlagen – ohne Discounter) bis zum Jahr 2030	29
Tabelle 11:	Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der Gewerbekälte (Zentralanlagen – Discounter) bis zum Jahr 2030	30
Tabelle 12:	Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der Gewerbekälte (Verflüssigungssätze) bis zum Jahr 2030	31
Tabelle 13:	Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der Industriekälte bis zum Jahr 2030	32
Tabelle 14:	Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der stationären Klimatisierung (Flüssigkeitskühlsätze – klein) bis zum Jahr 2030	33
Tabelle 15:	Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der stationären Klimatisierung (Flüssigkeitskühlsätze – groß) bis zum Jahr 2030	34
Tabelle 16:	Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der stationären Klimatisierung (Flüssigkeitskühlsätze mit Turboverdichter > 1500 kW) bis zum Jahr 2030.....	35

Tabelle 17:	Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der stationären Klimatisierung (Wärmepumpen) bis zum Jahr 2030.....	36
Tabelle 18:	Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der stationären Klimatisierung (mobile Raumklimageräte) bis zum Jahr 2030.....	36
Tabelle 19:	Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der stationären Klimatisierung (Single-Split-Geräte) bis zum Jahr 2030	37
Tabelle 20:	Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der stationären Klimatisierung (Multi-Split-Anlagen/VRF) bis zum Jahr 2030.....	38
Tabelle 21:	HFKW-Verwendungsmengen für Deutschland im SOLL-Szenario (Mt CO ₂ eq.) nach Jahren und gemäß den Reduktionsschritten der EU F-Gas-Verordnung.....	40
Tabelle 22:	Prozentuale Darstellung der HFKW-Verwendungsmengen im SOLL- und IST-Szenario von 2015 bis 2030.....	41
Tabelle 23:	Darstellung der zu erwartenden HFKW-Verwendungsmengen in Deutschland über alle Sektoren mit prozentualem Aufschlag gemäß Baseline für die in diesem Vorhaben nicht modellierten Sektoren 2018 - 2030	63
Tabelle 24:	Annahmen zu Wachstumsfaktoren für die Projektion von IST-HFKW-Verwendungsmengen für alle Sektoren bis zum Jahr 2030.....	75
Tabelle 25:	Darstellung der im Modell verwendeten Emissionsfaktoren gemäß NIR 2018 (Tabelle 198, S. 373).....	76
Tabelle 26:	Darstellung der HFKW-Verwendungsmengen in der Gewerbekälte nach Verwendungsart im IST- und SOLL-Szenario (in kt CO ₂ eq.)	77
Tabelle 27:	Darstellung der HFKW-Verwendungsmengen in der Industriekälte im IST- und SOLL-Szenario (in kt CO ₂ eq.)	78
Tabelle 28:	Darstellung der HFKW-Verwendungsmengen in der Transportkälte im IST- und SOLL-Szenario (in kt CO ₂ eq.)	78
Tabelle 29:	Darstellung der HFKW-Verwendungsmengen in der stationären Klimatisierung für Single-Split-, Multi-Split- und VRF-Anlagen im IST- und SOLL-Szenario (in kt CO ₂ eq.).....	78
Tabelle 30:	Darstellung der HFKW-Verwendungsmengen in der stationären Klimatisierung für Haushaltswärmepumpen im IST- und SOLL-Szenario (in kt CO ₂ eq.)	78
Tabelle 31:	Darstellung der HFKW-Verwendungsmengen in der stationären Klimatisierung für Flüssigkeitskühlsätze im IST- und SOLL-Szenario (in kt CO ₂ eq.)	79

Tabelle 32:	Darstellung der HFKW-Verwendungsmengen in der mobilen Klimatisierung für PKWs im IST- und SOLL-Szenario (in kt CO ₂ eq.).....	79
Tabelle 33:	Darstellung der HFKW-Verwendungsmengen in der mobilen Klimatisierung für sonstige Bereiche im IST- und SOLL-Szenario (in kt CO ₂ eq.).....	79

Abkürzungsverzeichnis

AR4	Vierter Sachstandsbericht des IPCC (IPCC 4 th Assessment Report)
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
ChemKlimaschutzV	Chemikalien-Klimaschutzverordnung
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ eq.	CO ₂ -Äquivalente
F-Gase	Fluorierte Treibhausgase
F-Gas-Verordnung („F-Gas-VO“)	Verordnung (EU) Nr. 517/2014
FKW	Perfluorierte Kohlenwasserstoffe
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
H(C)FE	(Chlor)fluorierte Ether
HFCKW	Teil(chlor)fluorierte Kohlenwasserstoffe
HFE	Hydrofluorether
HFKW	Teilfluorierte Kohlenwasserstoffe
HFO	Hydrofluorolefine (ungesättigte HFKW)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Weltklimarat der Vereinten Nationen)
IST	„Ist-Szenario“ im deutschen F-Gas-Modell
kt	Kilotonne
MAC	Mobile Air Conditioning
MIN	„Minimalszenario“ im deutschen F-Gas-Modell
Mio.	Millionen
Mt	Megatonne
NIR	National Inventory Report (nationaler Inventarbericht)
NF ₃	Stickstofftrifluorid
ODP	Ozone Depleting Potential (Ozonabbaupotenzial)
ODS	Ozone Depleting Substances (ozonzerstörende Substanzen)
PFPE	Perfluorpolyether
PFPMIE	Perfluorpolymethylisopropylether
PFTBA	Perfluortributylamin
RAC	Refrigeration and Air Conditioning
REF	„Referenzszenario“ im deutschen F-Gas-Modell
SF ₅ CF ₃	Trifluormethylschwefelpentafluorid
SF ₆	Schwefelhexafluorid
SOLL	„Soll-Szenario“ im deutschen F-Gas-Modell
UBA	Umweltbundesamt
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change

UNEP	United Nations Environment Programme
UStatG	Umweltstatistikgesetz
VRF	Variable Refrigerant Flow (variabler Kältemittelfluss)
WP	Wärmepumpe

Zusammenfassung

Die Verordnung (EU) Nr. 517/2014 („F-Gas-VO“) gibt seit dem Jahr 2015 mittels des „Phase-down“ eine schrittweise Reduzierung der in der EU verwendeten HFKW-Mengen um 79 % bis zum Jahr 2030 vor. Betrachtungen, in welchem Umfang die gesetzlichen Vorgaben zu einer Durchsetzung von HFKW-Alternativen in den einzelnen betroffenen Sektoren in Deutschland geführt haben, gab es bislang nicht.

Dieses Vorhaben hat sich zum Ziel gesetzt, den Stand der Umsetzung der F-Gas-Verordnung in Deutschland zu beleuchten und die aktuelle Verwendung von HFKW-Alternativen im Kälte-Klima-Sektor zu analysieren. Zudem sollen Projektionen die Marktdurchdringung der Alternativen in den Sektoren Gewerbekälte, Industriekälte, Transportkälte sowie stationärer und mobiler Klimatisierung bis zum Jahr 2030 zeigen, wobei Neu- und Bestandsanlagen betrachtet werden.

Hierfür werden zwei Szenarien gegenübergestellt: Das SOLL-Szenario (2015 – 2030) bildet auf der Basis der Daten des deutschen F-Gas-Modells (siehe Kapitel 3.4) und durch die Anwendung der durch den HFKW-Phase-down vorgegebenen Reduktionsschritte die in Deutschland zur Verfügung stehenden HFKW-Verwendungsmengen bis 2030 ab. Verglichen wird dieses mit dem IST-Szenario, das sowohl den aktuellen Stand der Verwendung von HFKW und möglichen Alternativen zeigt (2015 – 2017), als auch die potentielle Marktdurchdringung in Neu- und Bestandsanlagen dieser heute denkbaren Alternativen bis zum Jahr 2030 projiziert (2018 – 2030).

Grundlage für das IST-Szenario bilden Daten aus der deutschen Emissionsberichterstattung an das UN-Klimasekretariat sowie Literaturrecherchen, Experteninterviews und der Besuch von Fachmessen. Die Annahmen für zukünftige Marktdurchdringungsraten von HFKW-Kältemitteln und deren Alternativen wurden im Rahmen eines Fachgesprächs mit Industriexperten und -expertinnen aus allen Kälte- und Klimasektoren intensiv diskutiert. Das für die Berechnung der beiden Szenarien verwendete Modell wurde im Rahmen eines früheren Vorhabens entwickelt und für die aktuelle Fragestellung entsprechend modifiziert.

Für die zur Verfügung stehenden HFKW-Mengen wurden die in Deutschland im Referenzzeitraum des „Phase-down“ (2009 – 2012) verwendeten Mengen als Baseline herangezogen. Tatsächlich ist jedoch keine Zuordnung von HFKW-Mengen zu einzelnen Ländern im „Phase-down“ vorgesehen. Die modellierten HFKW-Verwendungsmengen überschreiten in der Hälfte der Jahre die Mengen, die Deutschland rechnerisch zur Verfügung stehen. Allerdings ist eine kontinuierliche Verringerung der benötigten CO₂-Äquivalente zu beobachten. In der Regel werden die Mengen in den Jahren, in denen ein Reduktionsschritt nach dem EU HFKW-Phase-down ansteht, überschritten. Gleichzeitig wird ein Großteil der benötigten Mengen für die Nachfüllung von Bestandsanlagen verwendet. Es scheint plausibel, dass mit mehr Anstrengung, um die zügigere Verbreitung von niedrig-GWP-Kältemittel zu ermöglichen, die Vorgaben des EU HFKW-Phase-down erfüllt werden können. Insbesondere das Jahr 2018 schlägt hier zu Buche, da die benötigte Menge an CO₂-Äquivalenten gemäß Projektionen um 11 % höher liegt (siehe Kapitel 4.1), als Deutschland theoretisch zur Verfügung steht.

Summary

Regulation (EU) No. 517/2014 ("F-gas Regulation") stipulates a gradual reduction of HFC quantities used in the EU through the "phase-down" by 79 % until 2030. So far, it has not been considered to what extent the legal requirements have led to the penetration of HFC alternatives in the individual sectors in Germany.

This project aims to assess the state of implementation of the F-gas Regulation in Germany and to analyse the current use of HFC alternatives in the refrigeration and air-conditioning sectors. In addition, projections show the potential market penetration of HFC alternatives in the commercial refrigeration, industrial refrigeration, transport refrigeration, stationary and mobile air-conditioning sector by 2030, taking into account new and existing installations.

For this purpose, two different scenarios are being compared: Firstly, the SOLL scenario (2015 – 2030) models the HFC quantities available in Germany up to 2030 (see chapter 3.4), based on both data from the German F-gas model and reduction steps of the EU HFC phase-down. This scenario is compared to an IST scenario, which illustrates the current state of the HFC use and the possible alternatives (2015 – 2017) as well as their potential market penetration by 2030 (2018 – 2030).

The IST scenario is based on data from the German emission reporting as well as literature research and information gained from expert interviews and trade fairs. The assumptions for future penetration rates of HFC refrigerants and their alternatives were intensively discussed during a meeting with industry experts from all refrigeration and air-conditioning sectors. The model used to calculate the two scenarios was developed as part of a previous project and accordingly modified to the current questioning.

For the available HFC quantities, the quantities used in Germany during the reference period of the HFC phase-down (2009-2012) are used as baseline. In fact, no allocation to individual countries is intended in the phase-down. The calculated HFC use exceeds in half of the years the quantities that are available for Germany.

However, a continuous reduction of the required quantities of CO₂ equivalents can be observed. Quantities are usually exceeded in the years in which a reduction step in accordance with the EU HFC phase-down is due. At the same time, most of the required quantities are needed to replenish existing plants. It seems plausible that, with a more effort to enable the faster spread of low-GWP refrigerants, the EU HFC phase-down requirements can be met. In particular, the year 2018 has an impact here, as the required amount of CO₂ equivalents is projected to be 11% higher than there is theoretically available for Germany (see Chapter 4.1).

1 Hintergrund

Als Vertragsstaat der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)) ist die Bundesrepublik Deutschland verpflichtet, jährlich Emissionsdaten von Treibhausgasen und die zu ihrer Berechnung verwendeten Basisdaten und Methoden zu übermitteln. Die für die nationale Emissionsberichterstattung relevanten fluorierten Treibhausgase (F-Gase) sind teil(chlor)fluorierte und perfluorierte Kohlenwasserstoffe (HF(C)KW und FKW), Schwefelhexafluorid (SF_6), Stickstofftrifluorid (NF_3), Trifluormethylschwefelpentafluorid (SF_5CF_3), (chlor)fluorierte Ether ($H(C)FE$) und Perfluorpolymethylisopropylether (PFPMIE). Seit 2005 bewegen sich die deutschen F-Gas-Emissionen auf relativ konstantem Niveau, auch wenn sie seit 2010 jedes Jahr leicht angestiegen sind. Im Jahr 2016 betragen sie 6.261 t, ausgedrückt in CO_2 -Äquivalenten waren dies 14,65 Mio. t [Martens (2018)]. Damit machen sie etwa 2 % an den Gesamtemissionen aller Treibhausgase in Deutschland aus. Die Anwendungen von fluorierten Gasen als Ersatzstoffe für Ozone Depleting Substances (ODS) bilden den größten Bereich und verursachen derzeit ca. 95 % aller F-Gas-Emissionen. Dieser Bereich umfasst die Gesamtheit der Kältemittelanwendungen in stationären und mobilen Kälte- und Klimaanlagen sowie Treibmittel für Schäume und Aerosole und außerdem Feuerlösch- und Lösemittel.

Die in der UNFCCC-Emissionsberichterstattung enthaltenen teilfluorierten Kohlenwasserstoffe (HFKW) werden auf europäischer Ebene durch die Verordnung (EU) Nr. 517/2014 über fluorierte Treibhausgase („F-Gas-VO“) [Europäische Kommission (2014)] reguliert. Ziel der F-Gas-VO ist die signifikante Verminderung von Emissionen fluorierte Treibhausgase in der EU. Dies soll vor allem durch verringerte Anwendung und weitgehenden Ersatz dieser Stoffe erreicht werden. Kernelement der F-Gas-VO ist der so genannte HFKW-Phase-down. Die auf dem EU-Markt verfügbaren HFKW-Mengen, in CO_2 -Äquivalenten ausgedrückt, werden bis zum Jahr 2030 schrittweise auf 21 % (verglichen zur Ausgangsmenge 2015 (100 %)) reduziert.

Mengenbeschränkungen für HFKW-Gebinde (Bulkware) gelten seit dem 1. Januar 2015: Der Markt sollte seitdem nicht weiterwachsen, sondern auf das Niveau der an die EU-Kommission berichteten durchschnittlichen HFKW-Mengen der Jahre 2009-2012 stabilisiert werden. Die Implementierung der HFKW-Mengenbeschränkungen in der EU erfolgt durch ein Quotensystem, dem alle Hersteller und Importeure von HFKW unterliegen. Die Gesamtmenge an Quoten wird entsprechend der Phase-down-Schritte verringert. Die erste Reduzierung der verfügbaren Quoten für HFKW-Mengen auf 93 % ist zum Januar 2016 eingetreten. Zu Beginn des Jahres 2018 trat mit der zweiten Stufe die erste große Reduzierung im Rahmen des Phase-down in Kraft, durch die 63 % der Referenzmenge an Quoten verfügbar sind.

Die Richtlinie 2006/40/EG (sog. „MAC-Richtlinie“) [Europäische Kommission (2006)] beinhaltet ein Verbot des bisher genutzten Kältemittels R134a in Pkw-Klimaanlagen in Neufahrzeugen (ausgenommen sind Exporte aus der EU) seit 2017, wobei die Einführung für neue Modelle bereits seit 2011 erfolgte. Diese Richtlinie stellt damit einen wichtigen Baustein für die zweite Reduktionsstufe des Phase-down dar.

Gegenwärtig ist unklar, in welchem Umfang diese gesetzlichen Vorgaben seit 2015 zu einer größeren Verbreitung von Alternativen zu HFKW bzw. F-Gasen in Deutschland geführt haben und in welchen Anwendungen. Derzeit sind Informationen zur Verwendung fluorierte Treibhausgase in der Vergangenheit verfügbar: Herstellung, Einfuhr, Ausfuhr und Verwendung von HFKW, FKW und SF_6 werden seit 2005 jährlich durch eine Befragung von Unternehmen gemäß Umweltstatistikgesetz (UStatG) durch das Statistische Bundesamt erhoben und veröffentlicht. Die Ergebnisse der Erhebung sind jeweils im Dezember eines Jahres für das jeweilige Vorjahr einsehbar. Auch die jährlich an das UN-Klimasekretariat erfolgende Emissionsberichterstattung

zu fluorierten Treibhausgasen enthält Emissionsabschätzungen für das jeweilige Vorjahr. Projektionen für zukünftige F-Gas-Emissionen in Deutschland wurden zuletzt vor einigen Jahren erstellt, als die Einführung des HFKW-Phase-down noch nicht absehbar war. Daher steht im Moment kein geeignetes Instrument zur Verfügung, um die Umsetzung des EU HFKW-Phase-down in Deutschland zu analysieren.

2 Zielsetzung

Um den Stand der Umsetzung der F-Gas-VO in Deutschland einschätzen zu können, soll eine Modellierung den Stand der derzeitigen Verwendung von F-Gasen und Alternativen darstellen. Ausgangspunkt hierfür bildet das u.a. von Öko-Recherche in Climate Change 06/2015 beschriebene Modell [Gschrey et al. (2015)]. Als Ausgangsdaten für die HFKW-Projektionen dienen die aktuellen nationalen Inventardaten, die bereits im Rahmen dieses Vorhabens ermittelt wurden.

Ziel dieses Sachverständigungsgutachtens ist es, anhand fundierter Daten und Projektionen für Deutschland qualitativ und quantitativ einschätzen zu können, in welchen Sektoren der Kälte- und Klimabranche die Umstellung auf klimafreundliche Alternativen bereits vorangeschritten ist und in welchen aktuell und in nächster Zukunft Handlungsbedarfe bestehen. Probleme bei der Umsetzung des HFKW-Phase-down können dadurch eingegrenzt und klar kommuniziert werden. Anhand der Analyse könnten außerdem zusätzliche nationale Maßnahmen geplant und umgesetzt werden, um die Implementierung des Phase-down voranzutreiben.

3 Projektionen zur HFKW-Verwendung in Deutschland

3.1 Vorgehensweise

Die Analyse der Implementierung des EU-HFKW-Phase-down in Deutschland basiert auf dem im Rahmen eines UFOPLAN-Vorhabens des Umweltbundesamtes [Gschrey et al. (2015)] entwickelten Modells für die HFKW-Nachfrage in verschiedenen Anwendungssektoren in Deutschland. Dieses Modell ist in 28 Sektoren gegliedert, für die jeweils spezifische Annahmen zur künftigen Entwicklung getroffen und mit Experten diskutiert wurden. Dieses Vorgehen erfolgte analog zu einer von Öko-Recherche für die EU-Kommission im Rahmen der Überarbeitung der F-Gas-VO durchgeführten Modellierung zur Einführung von Alternativtechnologien in der EU [Schwarz et al. (2011)].

Ein „Realitätscheck“ für Deutschland und damit eine Weiterentwicklung des Modells mit Blick auf die Umsetzung der F-Gas-VO sowie Projektionen bis zum Jahr 2030 sind Gegenstand der nachfolgenden Betrachtungen. Hierfür wurden die Szenarien des zuvor verwendeten Modells modifiziert und als SOLL- und IST-Szenario dargestellt.

Das SOLL-Szenario bildet die HFKW-Verwendungsmengen ab, die nach Anwendung der EU-HFWK-Phase-down-Schritte gemäß den getroffenen Annahmen in Deutschland bis 2030 zur Verfügung stehen. Das IST-Szenario stellt demgegenüber die bis 2017 in Deutschland verwendeten HFKW-Mengen dar und modelliert die zu erwartenden HFKW-Verwendungsmengen in den einzelnen Sektoren für die Jahre 2018 bis 2030. Hintergrund der Modellierung ist die erforderliche Abkehr von konventionellen HFKW-Kältemitteln hin zu Alternativen mit niedrigem Treibhausgaspotenzial (Global Warming Potential, GWP).

Zunächst erfolgten umfangreiche Recherchen in Fachzeitschriften und wissenschaftlichen Veröffentlichungen zur Einführung von HFKW-Alternativen (siehe Quellennachweise im Anhang). Parallel wurden Interviews mit Branchenexperten und -expertinnen geführt, um eine praxisnahe Einordnung der gewonnenen Erkenntnisse zu ermöglichen. Informationen zu Neuheiten in den verschiedenen Anwendungsbereichen wurden im Rahmen von Fachtagungen und Messebesuchen zusammengetragen. Folgende Veranstaltungen wurden während der Bearbeitungsdauer des Gutachtens besucht:

- Fachmesse „Automechanika“, 11. – 18. September 2018, Frankfurt
- Fachmesse „IAA Nutzfahrzeuge“, 20. – 27. September 2018, Hannover
- Leitmesse der Kälte- und Klimabranche „Chillventa“, 16. – 18. Oktober 2018, Nürnberg
- Fachtagung „Natürliche Kältemittel – sicher und effizient anwenden“, 12. November 2018, Nürnberg

Die Informationen zu HFKW-Alternativen und deren derzeitiger Marktdurchdringung sowie erste Einschätzungen zu künftigen Marktdurchdringungsraten wurden als Annahmen für die zu erstellenden Projektionen systematisiert und aufbereitet.

Ein Treffen mit Industrievertretern am 14. November 2018 wurde in Zusammenarbeit mit dem UBA in Berlin organisiert, um diese vorbereiteten Annahmen mit Branchenexperten zu diskutieren und so weit wie möglich abzusichern.

3.2 Aktualisierung und Anpassungen des Modells

Das verwendete Modell wurde in einem früheren UFOPLAN-Vorhaben entwickelt und für Berechnungen zur Ausgestaltung der F-Gas-VO eingesetzt. Eine allgemeine Modellbeschreibung wurde dem damaligen Abschlussbericht beigefügt ([Gschrey et al. (2015)], Anhang 7.1, S. 201ff).

Für die jetzigen Fragestellungen wurden die im Rahmen der Emissionsberichterstattung für die Jahre 2008 bis 2017 erhobenen Inventardaten eingepflegt [Umweltbundesamt (2018)] mit dem Ziel, die Marktdaten zu aktualisieren. Diese Daten dienen als Grundlage für das SOLL-Szenario (2015 bis 2030), das IST-Szenario (2015 bis 2017) sowie für die Projektionen innerhalb des IST-Szenarios (2018 bis 2030).

Eine Erweiterung des IST-Szenarios ab dem Jahr 2018 bis zum Jahr 2030 nutzt einige Eckdaten aus der Emissionsberichterstattung: Die Annahmen zum Wachstum wurden für die jeweiligen Sektoren bezogen auf die verwendete HFKW-Menge eingepflegt. In der Regel wird von einem geringen Wachstum in allen Sektoren ausgegangen, entsprechend dem Trend der letzten zehn Jahre (siehe Anhang B).

3.3 Alternativtechnologien und Marktdurchdringungsraten

Für die Projektionen wurden für die im Modell hinterlegten Kategorien an Kälte-Klima-Sektoren aktuell am Markt verfügbare bzw. vor der Markteinführung stehende Alternativen identifiziert. Diese sind in Tabelle 1 aufgelistet. Für diese Alternativtechnologien wurden anschließend potentielle Marktdurchdringungsraten bestimmt und im Expertengespräch abgesichert.

Tabelle 1: Übersicht der am Markt verfügbaren oder kurz vor der Markteinführung stehenden Alternativen

Kältemittel	GWP ¹	Sicherheitsklasse	(Potentielle) Anwendungen
HFKW			
R32	675	A2L	<u>Gewerbekälte:</u> Zentralanlagen <u>Stationäre Klimatisierung:</u> Flüssigkeitskühlsätze, Wärmepumpen, mobile Raumklimageräte, Single-Split-Geräte, Multi-Split/VRF
HFO			
R1233zd	4,5	A1	<u>Industriekälte</u> <u>Stationäre Klimatisierung:</u> Flüssigkeitskühlsätze
R1234yf	4	A2L	<u>Mobile Klimaanlagen:</u> PKW <u>Stationäre Klimatisierung:</u> Wärmepumpen <u>Transportkälte:</u> Kühlfahrzeuge < 7,5t
R1234ze	7	A2L	<u>Mobile Klimaanlagen:</u> Nutzfahrzeuge <u>Gewerbekälte:</u> Zentralanlagen, Verflüssigungssätze <u>Industriekälte</u> <u>Stationäre Klimatisierung:</u> Flüssigkeitskühlsätze

¹ Das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP₁₀₀) von Hydrofluorolephinen (HFO) wird im Bericht der [WMO (2010)] definiert, das der anderen Stoffgruppen im Bericht des [IPCC (2007)].

Kältemittel	GWP ¹	Sicherheitsklasse	(Potentielle) Anwendungen
HFKW-HFO-Gemische			
R448A	1387	A1	<u>Gewerbekälte:</u> Verflüssigungssätze
R449A	1397	A1	<u>Gewerbekälte:</u> Verflüssigungssätze
R450A	605	A1	<u>Mobile Klimaanlagen:</u> Nutzfahrzeuge, Schienenfahrzeuge <u>Industriekälte</u>
R452A	2140	A1	<u>Gewerbekälte:</u> Verflüssigungssätze
R452B	698	A2L	<u>Stationäre Klimatisierung:</u> Flüssigkeitskülsätze
R454B	466	A2L	<u>Stationäre Klimatisierung:</u> Flüssigkeitskülsätze, Wärmepumpen
R454C	148	A2L	<u>Gewerbekälte:</u> Steckerfertige Geräte, Verflüssigungssätze <u>Stationäre Klimatisierung:</u> Wärmepumpen, mobile Raumklimageräte, Single-Split-Geräte, Multi-Split/VRF
R455A	148	A2L	<u>Gewerbekälte:</u> Steckerfertige Geräte, Verflüssigungssätze <u>Stationäre Klimatisierung:</u> Flüssigkeitskülsätze, Wärmepumpen
R466A	733	A1	<u>Stationäre Klimatisierung:</u> Flüssigkeitskülsätze, Wärmepumpen
R513A	631	A1	<u>Mobile Klimaanlagen:</u> Nutzfahrzeuge, Schienenfahrzeuge, Busse <u>Transportkälte:</u> Kühlfahrzeuge > 7,5t und -anhänger, Külfahrzeuge < 7,5t <u>Gewerbekälte:</u> Steckerfertige Geräte, Verflüssigungssätze <u>Industriekälte</u> <u>Stationäre Klimatisierung:</u> Flüssigkeitskülsätze, Wärmepumpen
Natürliche Kältemittel			
R290 (Propan)	3	A3	<u>Industriekälte</u> <u>Gewerbekälte:</u> Steckerfertige Geräte, Zentralanlagen (Luftwärmepumpe), Verflüssigungssätze <u>Stationäre Klimatisierung:</u> Flüssigkeitskülsätze, mobile Raumklimageräte, Wärmepumpen, Single-Split-Geräte, Multi-Split/VRF
R717 (NH ₃)	0	B2L	<u>Industriekälte</u> <u>Stationäre Klimatisierung:</u> Flüssigkeitskülsätze
R718 (H ₂ O)	0		<u>Stationäre Klimatisierung:</u> Flüssigkeitskülsätze
R729 (Luft)	0		<u>Mobile Klimaanlagen:</u> Schienenfahrzeuge
R744 (CO ₂)	1	A1	<u>Mobile Klimaanlagen:</u> PKW, Nutzfahrzeuge, Schienenfahrzeuge, Busse <u>Transportkälte:</u> Külfahrzeuge > 7,5t und -anhänger, Külfahrzeuge < 7,5t <u>Gewerbekälte:</u> Steckerfertige Geräte, Verflüssigungssätze, Zentralanlagen <u>Industriekälte</u> <u>Stationäre Klimatisierung:</u> Flüssigkeitskülsätze, Wärmepumpen, Multi-Split/VRF
R1270 (Propen)	2	A3	<u>Industriekälte</u>

Die Marktdurchdringungsrate ist dabei definiert als das maximale Marktpotenzial einer technischen Alternative zum Ersatz von neuen HFKW-Produkten oder HFKW-Neuanlagen in einem spezifischen Sektor. Die Marktdurchdringungsrate kann für jede technische Alternative bestimmt werden und basiert grundsätzlich, aber nicht ausschließlich, auf der technischen Machbarkeit des Ersatzes von konventioneller HFKW-Technologie. Weitere Aspekte können die benötigte Zeit für den Aufbau von Produktionskapazitäten, Vertriebswegen, Fachkenntnissen und Test- und Genehmigungszyklen sein. Eine Marktdurchdringungsrate von 30 % im Jahr 2020 bedeutet, dass 30 % der HFKW-Neuanlagen, die im Jahr 2020 installiert werden, potentiell durch Anlagen mit der entsprechenden Alternativtechnologie substituiert werden könnten.

Bei der Abschätzung der Marktdurchdringungsraten wurden sowohl die relevanten Verbote der F-Gas-VO und der MAC-Richtlinie als auch die Reduktionsschritte des HFKW-Phase-down einbezogen.

Folgende Tabellen zeigen die Alternativtechnologien mit den jeweiligen Abschätzungen der künftigen Marktdurchdringungsraten für Neuanlagen der im Modell hinterlegten Kälte-Klimaanwendungen.

3.3.1 Mobile Kälte- und Klimaanwendungen

3.3.1.1 Mobile Klimatisierung – Pkw

In dieser Anwendung ist ab 2017 das Verbot für die Verwendung von Kältemitteln mit $GWP \geq 150$ in allen Neufahrzeugen (Pkw und Pkw-ähnliche Nutzfahrzeuge) zu beachten, außer für den Export (MAC-Richtlinie).

Die getroffenen Annahmen sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der mobilen Klimatisierung (Pkws) bis zum Jahr 2030

Verwendete Kältemittel in der mobilen Klimatisierung – Pkws	GWP [IPCC (2007)] / [WMO (2010)]	Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen [%]				
		2015	2018	2020	2025	2030
R134a	1430	100	0	0	0	0
R1234yf	4	0	99	95	90	80
R744 (CO ₂)	1	0	1	5	10	20

Für die zunehmende Marktdurchdringung von R744 (derzeit < 1% Marktanteil) spielt vor allem die Zielsetzung der Bundesregierung zur Elektromobilität [BMW (2018)] eine große Rolle, die zum Ziel hat bis 2020 einen Bestand von einer Million Elektrofahrzeuge in Deutschland zu erreichen. Nach dem neuesten Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität wird dies jedoch erst bis 2022 möglich sein [Nationaler Plattform Elektromobilität (2018)]. Bis 2025 soll in Deutschland ein Bestand von 2-3 Millionen (4-6,5 % Marktanteil) und bis 2030 von 4-7 Millionen Elektrofahrzeugen (10-15 % Marktanteil) zugelassen sein. Eine CO₂-Wärmepumpe stellt die derzeit energieeffizienteste Lösung zur Heizung und Klimatisierung von Elektrofahrzeugen dar.

Die Marktdurchdringungsrate für R744 steigt daher stetig an und erreicht 2030 einen geschätzten Anteil von 20 % der Neuzulassungen.

3.3.1.2 Mobile Klimatisierung – Nutzfahrzeuge

Derzeit besteht für Nutzfahrzeuge keine eigene Regelung unter der MAC-Richtlinie oder der F-Gas-VO. Wie in den Experteninterviews deutlich wurde, gibt es aktuell keine Alternative zu R134a. Nur wenige Unternehmen im Nutzfahrzeugbereich haben sich bisher mit der Einführung von Alternativen zu HFKW beschäftigt.

Die getroffenen Annahmen sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3: Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der mobilen Klimatisierung (Nutzfahrzeuge) bis zum Jahr 2030

Verwendete Kältemittel in der mobilen Klimatisierung – Nutzfahrzeuge	GWP [IPCC (2007)] / [WMO (2010)]	Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen [%]				
		2015	2018	2020	2025	2030
R134a	1430	100	80	80	10	0
R1234yf	4	0	20	15	80	90
R744 (CO ₂)	1	0	0	5	10	10

3.3.1.3 Mobile Klimatisierung – Schienenfahrzeuge

Auch für Schienenfahrzeuge existiert keine eigene Regelung unter der MAC-Richtlinie oder F-Gas-VO. Wie in den Experteninterviews deutlich wurde, sind europaweit bislang nur wenige Erfahrungen mit Alternativen zu HFKW gemacht worden. Die Deutsche Bahn setzt seit mehreren Jahren Luftkühlung in einigen ICE-Zügen ein, jedoch konnte sich diese Alternativtechnologie bisher nicht durchsetzen. Wegen der langen Lebensdauer von Schienenfahrzeugen sollte die Einführung von Alternativen zu HFKW zügig vorangetrieben werden.

Die getroffenen Annahmen für diese Anwendung sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der mobilen Klimatisierung (Schienenfahrzeuge) bis zum Jahr 2030

Verwendete Kältemittel in der mobilen Klimatisierung – Schienenfahrzeuge	GWP [IPCC (2007)] / [WMO (2010)]	Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen [%]				
		2015	2018	2020	2025	2030
R407C	1774	0	1	0	0	0
R134a	1430	100	98	99	0	0
R744 (CO ₂)	1	0	0	0	90	85
R729 (Luft)	0	0	1	1	10	15

3.3.1.4 Mobile Klimatisierung – Busse

Wie auch für Nutzfahrzeuge sind keine eigenen Regelungen für diese Anwendung in der MAC-Richtlinie oder der F-Gas-VO vorgesehen. Erste Erfahrungen mit der Anwendung von R513A und R744 liegen vor und bilden die Grundlage für die angenommenen Marktdurchdringungsraten. Die Lebensdauer wurde im Modell mit 15 Jahren angesetzt.

Die getroffenen Annahmen für diese Anwendung sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der mobilen Klimatisierung (Busse) bis zum Jahr 2030

Verwendete Kältemittel in der mobilen Klimatisierung – Busse	GWP [IPCC (2007)] / [WMO (2010)]	Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen [%]				
		2015	2018	2020	2025	2030
R134a	1430	100	99	80	10	0
R513A	631	0	1	15	50	30
R744 (CO ₂)	1	0	0	5	40	70

3.3.1.5 Transportkälte – Kühlfahrzeuge > 7,5 t und Kühlanhänger

Dieser Sektor unterliegt gemäß der F-Gas-VO und der ChemKlimaschutzV den Anforderungen zur Dichtheitskontrolle. Darüber hinaus sind keine weiteren anwendungsspezifischen Maßnahmen vorgesehen.

Die Einführung von Alternativen ist in dieser Anwendung bereits vorangeschritten und das noch vor wenigen Jahren gängige Kältemittel R404A wird in Neufahrzeugen kaum mehr verwendet. Allerdings wurden bisher vor allem Alternativen mit sehr hohen Treibhauspotenzialen eingeführt (z.B. R452A und R448A/R449A). Aufgrund des HFKW-Phase-down wird eine Umstellung auf Kältemittel mit deutlich niedrigerem Treibhauspotenzial in den nächsten Jahren erfolgen müssen.

Die getroffenen Annahmen für diese Anwendung sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der Transportkälte (Kühlfahrzeuge > 7,5 t und Kühlanhänger) bis zum Jahr 2030

Verwendete Kältemittel in der Transportkälte – Kühlfahrzeuge > 7,5 t und Kühlanhänger	GWP [IPCC (2007)] / [WMO (2010)]	Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen [%]				
		2015	2018	2020	2025	2030
R404A	3922	47	5	0	0	0
R452A	2140	6	65	70	0	0
R410A	2088	32	15	5	0	0
R134a	1430	15	10	5	0	0
R448A/R449A	1387/1397	0	5	0	0	0
R513A	631	0	0	15	10	10
Gemisch	< 300	0	0	0	70	60
R744 (CO ₂)	1	0	0	5	20	30

3.3.1.6 Transportkälte – Kühlfahrzeuge < 7,5 t

Auch diese Anwendung unterliegt gemäß der F-Gas-VO und der ChemKlimaschutzV den Anforderungen zur Dichtheitskontrolle. Darüber hinaus sind keine weiteren anwendungsspezifischen Maßnahmen vorgesehen.

In geringerem Umfang als bei den größeren Kühlfahrzeugen werden heute Alternativen eingesetzt. Der Anteil an Neuanlagen mit R404A als Kältemittel wurde für 2018 noch auf 20 % geschätzt. Als langfristige Kältemitteloptionen wurden neben R744 auch R513A und ein noch zu entwickelndes Gemisch mit R1234yf genannt.

Tabelle 7 zeigt die getroffenen Annahmen für Kühlfahrzeuge < 7,5 t.

Tabelle 7: Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der Transportkälte (Kühlfahrzeuge < 7,5 t) bis zum Jahr 2030

Verwendete Kältemittel in der Transportkälte – Kühlfahrzeuge < 7,5 t	GWP [IPCC (2007)] / [WMO (2010)]	Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen [%]				
		2015	2018	2020	2025	2030
R404A	3922	41	20	0	0	0
R452A	2140	0	20	40	10	0
R134a	1430	59	60	30	0	0
R513A	631	0	0	20	40	5
R1234yf, Gemisch	< 150	0	0	10	40	65
R744 (CO ₂)	1	0	0	0	10	30

3.3.1.7 Transportkälte – Kühlcontainer

Anders als Kühlfahrzeuge und Kühlanhänger fallen Kühlcontainer nicht in den Anwendungsbereich der F-Gas-VO. Wie Tabelle 8 zeigt, ist davon auszugehen, dass R134a ab 2020 durch das HFKW-HFO-Gemisch R513A ersetzt wird. Aufgrund des GWP wird jedoch erwartet, dass der Anteil von R513A sich perspektivisch verringert (30 % im Jahr 2030) und R744 und R1234yf (bzw. ein HFKW-HFO-Gemisch mit GWP < 150) Anwendung finden.

Tabelle 8: Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der Transportkälte (Kühlcontainer) bis zum Jahr 2030

Verwendete Kältemittel in der Transportkälte – Kühlcontainer	GWP [IPCC (2007)] / [WMO (2010)]	Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen [%]				
		2015	2018	2020	2025	2030
R404A	3922	15	10	5	0	0
R452A	2140	0	0	< 1	0	0
R410A	2088	0	5	< 1	0	0
R134a	1430	85	78	10	0	0
R448A/R449A	1387/1397	0	5	0	0	0
R513A	631	0	0	73	65	30
R1234yf, Gemisch	< 150	0	0	0	20	40
R744 (CO ₂)	1	0	2	10	15	30

3.3.2 Stationäre Kälte- und Klimaanwendungen

3.3.2.1 Gewerbekälte – steckerfertige Geräte

Für gewerbliche Kühl- und Gefriergeräte (hermetisch geschlossen) sieht die F-Gas-VO ab 2020 ein Verbot von Kältemitteln mit GWP ≥ 2500 und ab 2022 mit GWP ≥ 150 vor. Im Modell wird eine Lebensdauer von 10 Jahren für diese Geräte angenommen.

Wie Tabelle 9 zeigt, ist schon heute ein relevanter Anteil der Neugeräte mit R290 befüllt. Es wird erwartet, dass dieser Prozentsatz bis 2030 auf etwa 85 % ansteigt. Die restlichen Geräte könnten ab 2020 R455A oder R454C enthalten.

Tabelle 9: Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der Gewerbekälte (steckerfertige Geräte) bis zum Jahr 2030

Verwendete Kältemittel in der Gewerbekälte – steckerfertige Geräte	GWP [IPCC (2007)] / [WMO (2010)]	Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen [%]				
		2015	2018	2020	2025	2030
R404A	3922	19	10	0	0	0
R407C	1774	75	0	0	0	0
R134a	1430	6	40	25	0	0
R455A/R454C	148	0	0	15	15	15
R290 (Propan)	3	0	50	60	85	85

3.3.2.2 Gewerbekälte – Zentralanlagen (ohne Discounter)

Für Zentralanlagen sind zwei Verbote besonders relevant: Ab 2020 das Verbot von Kältemitteln mit $GWP \geq 2500$ für die Nachfüllung in Anlagen mit Füllmengen von über 40 t CO₂eq. (Nachfüllverbot) und ab 2022 das Verbot von Kältemitteln mit $GWP \geq 150$ (außer im Primärkreislauf bei Kaskaden, hier gilt ein GWP-Grenzwert von 1500).

Eine Lebensdauer von 14 Jahren ist im Modell hinterlegt.

Tabelle 10 zeigt die getroffenen Annahmen für Gewerbekälte-Zentralanlagen (ohne Discounter). Die bereits heute starke Stellung von R744 wird auch in Zukunft bestehen bleiben. Als neue Technologie wird der R290-Wärmepumpentechnologie vor allem in kleineren Ladenformaten ein relevanter Marktanteil eingeräumt.

Tabelle 10: Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der Gewerbekälte (Zentralanlagen – ohne Discounter) bis zum Jahr 2030

Verwendete Kältemittel in der Gewerbekälte – Zentralanlagen (ohne Discounter)	GWP [IPCC (2007)] / [WMO (2010)]	Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen [%]				
		2015	2018	2020	2025	2030
R404A	3922	31	0	0	0	0
R134a + R404A DX	3424	8	0	0	0	0
R134a + R744 (CO ₂) Kaskade subkritisch	1430	15	10	10	0	0
R1234ze + R744 (CO ₂) Kaskade subkritisch	7	0	0	3	10	10
R290 (Propan) Luftwärmepumpe	3	0	< 1	5	20	20
R744 (CO ₂) transkritisch	1	35	80	77	70	70
<u>Unter 40 kW: R410A</u>	2088	11	10	5	0	0

3.3.2.3 Gewerbekälte – Zentralanlagen im Discounter

Die Unterscheidung der Zentralanlagen in Discountern von Zentralanlagen in anderen Supermarktformaten ist im Modell fest angelegt und begründet sich dadurch, dass in Discountern die Zentralanlage ausschließlich für die Normalkühlung eingesetzt wird. Daher wird auch von einer Verwendung von R134a als Referenztechnologie ausgegangen (und nicht R404A wie bei anderen Zentralanlagen). Die Tiefkühlung erfolgt in Discountern durch steckerfertige Geräte innerhalb des Marktes und Verflüssigungssätze in Kühlräumen (zu 50 % dort eingerechnet). Für Discounter-Anlagen ist eine Lebensdauer von 10 Jahren im Modell hinterlegt.

Die oben genannten Verbote für Zentralanlagen sind natürlich auch in Discountern zu beachten: Zum einen das Wartungsverbot für Kältemittel mit $GWP \geq 2500$ in Anlagen mit Füllmengen von über 40 t CO₂ eq. (Nachfüllverbot) ab 2020 sowie ab 2022 das Verbot von Kältemitteln mit $GWP \geq 150$ (außer im Primärkreislauf bei Kaskaden, hier gilt ein GWP-Grenzwert von 1500).

Tabelle 11 fasst die Annahmen für Discounter zusammen. Wie bei den anderen Zentralanlagen werden hohe und weiter steigende Marktdurchdringungsraten für R744 und R290 angenommen.

Tabelle 11: Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der Gewerbekälte (Zentralanlagen – Discounter) bis zum Jahr 2030

Verwendete Kältemittel in der Gewerbekälte – Zentralanlagen Discounter	GWP [IPCC (2007)] / [WMO (2010)]	Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen [%]				
		2015	2018	2020	2025	2030
R134a	1430	80	30	5	0	0
R290 (Propan)	3	4	22	32	38	40
R744 (CO ₂) transkritisch	1	12	40	55	55	60
Unter 40 kW: R410A	2088	4	8	8	7	0

3.3.2.4 Gewerbekälte – Verflüssigungssätze

Für Verflüssigungssätze konnte sich bislang noch keine Alternative zu den konventionellen HFKW (R404A, R407C, R134a) klar durchsetzen. Zwar werden bereits einige Neuanlagen mit HFKW-HFO-Gemischen mit niedrigerem GWP installiert (R448A/R449A, R452A, R513A), jedoch werden diese Kältemittel aufgrund ihres immer noch hohen Treibhauspotenzials nicht langfristig zur Verfügung stehen. Daher wurde mit einer verstärkten Anwendung von ungesättigten HFKW als Reinstoffe (R1234ze) sowie R290 und R744 ausgegangen. Allerdings wurde in der Expertendiskussion auch deutlich, dass diese Annahmen als unsicher eingeschätzt wurden. Weitere Fachdiskussionen und Forschungsarbeiten werden empfohlen.

Die Annahmen zu Verflüssigungssätzen sind Tabelle 12 aufgeführt.

Tabelle 12: Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der Gewerbekälte (Verflüssigungssätze) bis zum Jahr 2030

Verwendete Kältemittel in der Gewerbekälte – Verflüssigungssätze	GWP [IPCC (2007)] / [WMO (2010)]	Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen [%]				
		2015	2018	2020	2025	2030
R404A	3922	45	8	0	0	0
R452A	2140	0	10	5	0	0
R407C	1774	15	10	5	0	0
R134a	1430	40	50	20	10	0
R448A/R449A	1387/1397	0	10	15	10	10
R513A	631	0	10	30	15	5
R454C/R455A	148	0	0	5	10	5
R1234ze	7	0	0	5	5	10
R290 (Propan) indirekt	3	0	0	5	20	30
R744 (CO ₂)	1	0	2	10	30	40

3.3.2.5 Industriekälte

Für Industriekälteanlagen ist eine Lebensdauer von 30 Jahren im Modell angesetzt. Es handelt sich um besonders große Anlagen, vor allem zur Prozesskühlung in verschiedenen Industrien, wobei die Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie einen Schwerpunkt darstellt.

Tabelle 13 zeigt die getroffenen Annahmen für die Marktdurchdringung der Alternativen in Neuinstallationsen bis 2030. Bereits heute werden zahlreiche Ammoniakanlagen (R717) installiert, mit steigender Tendenz. Die bereits stattfindende Einführung von Gemischen mit niedrigerem GWP (R450A, R513A) wird nach Experteneinschätzungen im niedrigen Prozentbereich bleiben. Die Anwendung von R1234zd und R1234ze wird in lediglich geringem Umfang stattfinden, der Einsatz von R290 könnte ab 2025 relevant werden. Der Anteil an natürlichen Kältemitteln könnte nach Expertenschätzungen 2030 bei über 85 % der Neuinstallationsen liegen.

Tabelle 13: Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der Industriekälte bis zum Jahr 2030

Verwendete Kältemittel in der Industriekälte	GWP [IPCC (2007)] / [WMO (2010)]	Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen [%]				
		2015	2018	2020	2025	2030
R404A	3922	40	5	0	0	0
R134a	1430	10	36	10	3	0
R449A	1397	0	0	10	0	0
R450A/R513A	604/631	0	5	6	10	0
R1234ze	7	0	1	0	5	8
R1233zd	4,5	0	1	2	5	5
R290 (Propan)/R1270 (Propen)	3/2	0	< 1	1	5	10
R744 (CO ₂)	1	0	1	5	7	2
R717 (Ammoniak)	0	50	50	66	65	75

3.3.2.6 Stationäre Klimatisierung – Flüssigkeitskühlsätze (Chiller), klein

In dieser Kategorie werden Flüssigkeitskühlsätze mit Kälteleistungen unter 100 kW betrachtet. Wie in Tabelle 14 aufgeführt, hat sich derzeit noch keine Alternative zu den konventionellen HFKW-Kältemitteln (R410A, R407C, R134a) für diese Anwendung durchgesetzt. Vielen Alternativen wurden gewisse Marktchancen und damit anteilige Marktdurchdringungsraten eingeräumt, wobei zukünftig mit einer starken Rolle von R290 gerechnet wird (von 15 % im Jahr 2018 auf 50 % im Jahr 2030).

Tabelle 14: Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der stationären Klimatisierung (Flüssigkeitskülsätze – klein) bis zum Jahr 2030

Verwendete Kältemittel in der stationären Klimatisierung – Flüssigkeitskülsätze (klein)	GWP [IPCC (2007)] / [WMO (2010)]	Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen [%]				
		2015	2018	2020	2025	2030
R410A	2088	50	41	27	0	0
R407C	1774	40	27	7	0	0
R134a	1430	10	7	7	0	0
R32	675	0	0	15	15	14
R513A/R452B	631/698	0	5	5	5	1
R454B	466	0	0	7	10	10
R455A	148	0	0	0	3	5
R1234ze	7	0	0	0	15	5
R290 (indirekt)	3	0	15	22	40	50
R717	0	0	1	5	5	5
R718 (H ₂ O)	0	< 1	3	5	7	10

3.3.2.7 Stationäre Klimatisierung – Flüssigkeitskülsätze (Chiller), groß

Diese Kategorie umfasst Flüssigkeitskülsätze mit Kälteleistungen über 100 kW bis etwa 1500 kW, für die eine Lebensdauer von 15 Jahren angenommen wird.

Im Unterschied zu den Flüssigkeitskülsätzen im kleinen Leistungsbereich spielt in dieser Anwendungskategorie das Kältemittel R717 (NH₃) bereits heute eine relevante Rolle, die in Zukunft noch wichtiger werden wird. Auch für das Kältemittel R718 (H₂O) wird ein deutliches Wachstum der Marktdurchdringungsrate geschätzt. Wie in Tabelle 15 dargestellt, könnten im Jahr 2030 bis zu 75 % der Neuinstallationen mit natürlichen Kältemitteln befüllt sein und weitere 15 % mit ungesättigten HFKW (R1234zd und R1234ze).

Tabelle 15: Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der stationären Klimatisierung (Flüssigkeitskühlsätze – groß) bis zum Jahr 2030

Verwendete Kältemittel in der stationären Klimatisierung – Flüssigkeitskühlsätze (groß)	GWP [IPCC (2007)] / [WMO (2010)]	Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen [%]				
		2015	2018	2020	2025	2030
R410A	2088	50	20	5	0	0
R407C	1774	40	5	5	0	0
R134a	1430	10	40	15	0	0
R32	675	0	0	5	10	0
R513A/R452B	631/698	0	5	20	15	0
R454B	466	0	0	3	5	5
R455A	148	0	0	0	5	5
R1234ze	7	0	2	5	7	10
R1233zd	4,5	0	< 1	2	3	5
R290 (Propan)	3	0	2	5	10	10
R744 (CO ₂)	1	0	0	5	5	5
R717 (Ammoniak)	0	0	22	25	30	40
R718 (Wasser)	0	0	3	5	10	20

3.3.2.8 Stationäre Klimatisierung – Flüssigkeitskühlsätze mit Turboverdichter (> 1500 kW)

In dieser Kategorie werden sehr große Flüssigkeitskühlsätze mit einer Kälteleistung ab 1500 kW behandelt, für die eine Lebensdauer von 25 Jahren im Modell angenommen wird.

Tabelle 16 zeigt die geschätzten Marktdurchdringungsraten. Es wird davon ausgegangen, dass sich in diesem Leistungsbereich ungesättigte HFKW (R1234zd und R1234ze) als Kältemittel durchsetzen und bereits 2025 in allen Neuinstallationen eingesetzt werden.

Tabelle 16: Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der stationären Klimatisierung (Flüssigkeitskühlsätze mit Turboverdichter > 1500 kW) bis zum Jahr 2030

Verwendete Kältemittel in der stationären Klimatisierung – Flüssigkeitskühlsätze mit Turboverdichter (> 1500 kW)	GWP [IPCC (2007)] / [WMO (2010)]	Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen [%]				
		2015	2018	2020	2025	2030
R134a	1430	93	60	30	0	0
R1234ze	7	7	30	40	50	50
R1233zd	4,5	0	10	30	50	50

3.3.2.9 Stationäre Klimatisierung – Wärmepumpen

Unter der Anwendung der Wärmepumpen werden nur Heizwärmepumpen verstanden, die einen Wasserkreislauf erhitzen. Geräte zur direkten Innenlufterwärmung zählen im Modell zu den Raumklimageräten und sind daher hier nicht abgedeckt. Drei Typen von Wärmepumpen werden einbezogen:

- Erdreich (Sole)-Wasser-Wärmepumpen (Kältemittel-Füllmenge: 2,5 kg)
- Erdreich (Wasser)-Wasser-Wärmepumpen (Kältemittel-Füllmenge: 2,5 kg))
- Luft-Wasser-Wärmepumpen (Kältemittel-Füllmenge: 4 kg)

Für alle Anlagetypen wird eine Lebensdauer von 15 Jahren angenommen.

Tabelle 17 listet die geschätzten Marktdurchdringungsraten auf: Noch über 2020 hinaus wird für Neuanlagen ein relevanter Anteil von HFWK geschätzt (55 % in 2020). Daneben wird R32 eine wichtige Marktstellung eingeräumt, mit einer Marktdurchdringung von 30 % im Jahr 2025, dann allerdings rückläufig auf 12 %. Für die R410A-Ersatzkältemittel R454B, R454C und R455A wird für 2030 eine Marktdurchdringung von 50 % geschätzt, für R290 30 % und nur 3 % für R744.

Tabelle 17: Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der stationären Klimatisierung (Wärmepumpen) bis zum Jahr 2030

Verwendete Kältemittel in Wärmepumpen	GWP [IPCC (2007)] / [WMO (2010)]	Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen [%]				
		2015	2018	2020	2025	2030
R410A	2088	40	45	35	0	0
R407C	1774	54	40	20	0	0
R134a	1430	6	6	0	0	0
R466A	733	0	0	0	2	2
R32	675	0	< 1	20	30	12
R513A	631	0	0	2	5	3
R454C/R455A/R454B	148/466	0	0	12	35	50
R290 (Propan)	3	0	7	10	25	30
R744 (CO ₂)	1	0	< 1	< 1	3	3

3.3.2.10 Stationäre Klimatisierung – Mobile Raumklimageräte

Für diese Anwendung wird eine Lebensdauer von 10 Jahren angenommen. Zu beachten ist ab 2020 ein Inverkehrbringungsverbot von Geräten, die Kältemittel mit $GWP \geq 150$ enthalten. Wie in Tabelle 18 dargestellt, wird bereits heute für R290 eine Marktdurchdringungsrate von 25 % angesetzt. Dieser Anteil wird bis 2050 weiter ansteigen. Expertenschätzungen sehen außerdem eine Marktdurchdringung von 15 % der Neugeräte für das Kältemittel R454C im Jahr 2025, ansteigend auf 20 % im Jahr 2030.

Tabelle 18: Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der stationären Klimatisierung (mobile Raumklimageräte) bis zum Jahr 2030

Verwendete Kältemittel in der stationären Klimatisierung – mobile Raumklimageräte	GWP [IPCC (2007)] / [WMO (2010)]	Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen [%]				
		2015	2018	2020	2025	2030
R410A	2088	68	60	0	0	0
R407C	1774	32	5	0	0	0
R32	675	0	10	0	0	0
R454C	148	0	0	0	15	20
R290 (Propan)	3	0	25	100	85	80

3.3.2.11 Stationäre Klimatisierung – Single-Split-Geräte

Single-Split-Klimageräte sind ab 2025 von einem Verbot von Kältemitteln mit einem GWP ≥ 750 (HFKW-Füllmenge < 3 kg) betroffen.

Für die nächsten Jahre wird mit einer starken Zunahme der Marktdurchdringung von R32 gerechnet, bis auf 90 % im Jahr 2020. Wie Tabelle 19 zeigt, führt erst die Einführung von Alternativen mit niedrigerem GWP wie R454C und R290 (hier jeweils gleichberechtigt angenommen) ab 2025 zu einer Verringerung des Anteils von R32.

Tabelle 19: Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der stationären Klimatisierung (Single-Split-Geräte) bis zum Jahr 2030

Verwendete Kältemittel in der stationären Klimatisierung – Single-Split-Geräte	GWP [IPCC (2007) / WMO (2010)]	Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen [%]				
		2015	2018	2020	2025	2030
R410A	2088	70	75	10	0	0
R407C	1774	30	5	0	0	0
R32	675	0	20	90	80	50
R454C	148	0	0	0	10	25
R290 direkt	3	0	0	0	10	25

3.3.2.12 Stationäre Klimatisierung – Multi-Split/VRF

Multi-Split-Anlagen (Kältemittel-Füllmenge: 6 kg) und VRF-Anlagen (Kältemittel-Füllmenge: 13 kg) sind im Modell in einer Kategorie zusammengefasst, wobei die Lebensdauer für beide Anlagentypen mit 13 Jahren angesetzt ist.

Tabelle 20 fasst die angenommenen Marktdurchdringungsraten zusammen. Es zeigt sich, dass für HFKW-Kältemittel (R410A und R32) bis 2030 eine hohe Marktdurchdringungsrate von zusammen 95 % geschätzt wird. Geringe Anteile wurden für R744 angenommen (2030 5 %).

Tabelle 20: Annahmen zu Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen in der stationären Klimatisierung (Multi-Split-Anlagen/VRF) bis zum Jahr 2030

Verwendete Kältemittel in der stationären Klimatisierung (Multi-Split/VRF)	[IPCC (2007)] / [WMO (2010)]	Marktdurchdringungsraten bei Neuanlagen [%]				
		2015	2018	2020	2025	2030
R410A	2088	95	95	75	50	25
R407C	1774	5	0	0	0	0
R32	675	0	5	25	50	70
R454C	148	0	0	0	0	0
R290 (Propan) indirekt	3	0	0	0	0	0
R744 (CO ₂) direkt	1	0	0	0	<1	5

3.4 SOLL- und IST-Szenario

Im Modell wurden zwei neue Szenarien integriert, die nachfolgend erläutert werden. Grundlage der Berechnungen ist das deutsche F-Gas-Modell für die Emissionsberichtserstattung.

3.4.1 SOLL-Szenario

Das **SOLL-Szenario** zeigt die Implementierung der F-Gas-VO in Deutschland. Die Anforderungen des EU HFKW-Phase down für Deutschland wurden mit Hilfe des deutschen F-Gas-Modells und den darin berechneten Verwendungsmengen für Deutschland dargestellt. Die dem Modell zugrundeliegende Ausgangsmenge (Baseline: 100 %) für Deutschland beträgt 18,9 Mt CO₂ (siehe Kapitel 4.1). Analog zur Herangehensweise auf EU-Ebene wurde ein Durchschnitt der in den Jahren 2009 – 2012 verwendeten HFKW-Mengen gebildet. Auf diese Ausgangsmenge wurden dann die Reduktionsschritte des HFKW-Phase-down angewandt. Dieser Vorgehensweise liegt die Annahme zugrunde, dass der Anteil der in Deutschland zur Verfügung stehenden HFKW-Mengen im Zeitverlauf in der EU gleich groß bleibt. Tatsächlich findet keine Zuweisung von Kontingenten an ein Land statt.

3.4.2 IST-Szenario

Außerdem wurde ein **IST-Szenario** modelliert: Dieses Szenario bildet den gegenwärtigen Stand der Verwendung von F-Gasen und Alternativen zu HFKW ab. Es umfasst die historischen Daten aus der Emissionsberichterstattung bis zum Jahr 2017 zur aktuellen Umsetzung und Projektionen bis zum Jahr 2030 auf Basis der getroffenen Annahmen für die Marktdurchdringung der Alternativen. Während Verbote gemäß der F-Gas-VO ab einem festen Datum gelten, das in die Annahmen integriert wurde, wurden die Annahmen für die Marktdurchdringung der Alternativen für die Jahre 2018, 2020, 2025 und 2030 in den Tabellen 2 bis 20 interpoliert.

Andere für die Modellierung relevante Größen wie Füllmengen, Lebensdauer, Emissionsfaktoren und Rückgewinnungsraten der Kältemittel wurden aus dem deutschen F-Gas-Modell übernommen und nicht geändert. Details können dem nationalen Inventarbericht [Umweltbundesamt (2018)] entnommen werden. Die Nachfüllmengen werden anhand dieser Daten im Modell berechnet, sofern keine Umrüstungen von Bestandsanlagen eingetragen werden.

Umrüstungen sind beispielsweise in Gewerbekälte-Zentralanlagen seit einigen Jahren relevant. Hintergrund ist das ab 2020 geltende Nachfüllverbot mit Kältemitteln mit GWP ≥ 2500. Betroffen sind etwa Gewerbekälte-Zentralanlagen mit R404A als Kältemittel, die vor allem auf die Kältemittel R448A oder R449A umgerüstet werden. Im Modell wurde angenommen, dass ab 2020 keine Umrüstungen von R404A-Anlagen auf R448A oder R449A mehr stattfinden, da dann der Durchschnitts-GWP² der verwendeten Kältemittel geringer ist. Durch den zu erwartenden relativ hohen Preis von R448A bzw. R449A, ist damit zu rechnen, dass die Anwender zum Austausch der Anlagen tendieren.

Die Annahmen zur Einführung von Alternativtechnologien bei Neuanlagen fließen automatisch in die Berechnung des späteren Anlagenbestands und der benötigten Nachfüllmengen ein.

² Durchschnitts-GWP der verwendeten Kältemittel (ab 2021 unter GWP 1000): Berechnet sich anhand der während des Referenzzeitraums verwendeten CO₂-Äquivalenten in Deutschland in den betrachteten Sektoren, auf die die HFC-Phase-down Schritte prozentual angewandt werden.

4 Ergebnisse der Modellierung

4.1 HFKW-Verwendungsmengen im SOLL- und IST-Szenario

Die in den beiden Szenarien errechneten HFKW-Verwendungsmengen werden im Folgenden gegenübergestellt. Die Mengen bis 2017 basieren auf historischen Daten aus der Emissionsberichterstattung. Ab 2018 wurden die Verwendungsmengen entsprechend der im IST-Szenario für die Projektionen getroffenen Annahmen modelliert. Betrachtet werden in allen Berechnungen nur die folgenden Sektoren, die im Referenzzeitraum 2009 – 2012 (Durchschnittsmengen = Baseline 100%) ungefähr 90 % der Verwendungsmengen (ausgedrückt in CO₂ eq.) ausmachten:

- Mobile Klima- und Kälteanwendungen
- Stationäre Klima- und Kälteanwendungen

Für dieses Szenario wurden die Reduktionsschritte des EU HFKW-Phase-down auf die für Deutschland berechnete Ausgangsmenge von 18,8 Mt CO₂ eq. für 2015 bezogen. In der Folge ergeben sich die in Tabelle 21 aufgeführten Verwendungsmengen für Deutschland.

Tabelle 21: HFKW-Verwendungsmengen für Deutschland im SOLL-Szenario (Mt CO₂ eq.) nach Jahren und gemäß den Reduktionsschritten der EU F-Gas-Verordnung

Jahr	Reduktionsschritt [%]	SOLL-HFKW-Verwendungsmenge für Deutschland [Mt CO ₂ eq.]
2015	100	18,8
2016-2017	93	17,5
2018-2020	63	11,8
2021-2023	45	8,5
2024-2026	31	5,9
2027-2029	24	4,5
2030	21	4,0

Abbildung 1 stellt den Verlauf des SOLL-Szenarios (SOLL-Nachfrage) den Projektionen des IST-Szenarios gegenüber. Es wird ersichtlich, dass die Verwendungsmengen im IST-Szenario (IST & IST-Projektion) entsprechend der getroffenen Annahmen allmählich reduziert werden. Verbote der F-Gas-VO und die zu erwartenden technologischen Verlagerungen hin zu Alternativen mit geringerem GWP aufgrund schwieriger oder mangelnder Verfügbarkeit der etablierten HFKW-Kältemittel flossen in die Annahmen mit ein. Dem technologischen Fortschritt und der geringen Verfügbarkeit von Hoch-GWP-Kältemitteln wurde außerdem durch geringere Leckageraten bei den entsprechenden Anwendungen Rechnung getragen.

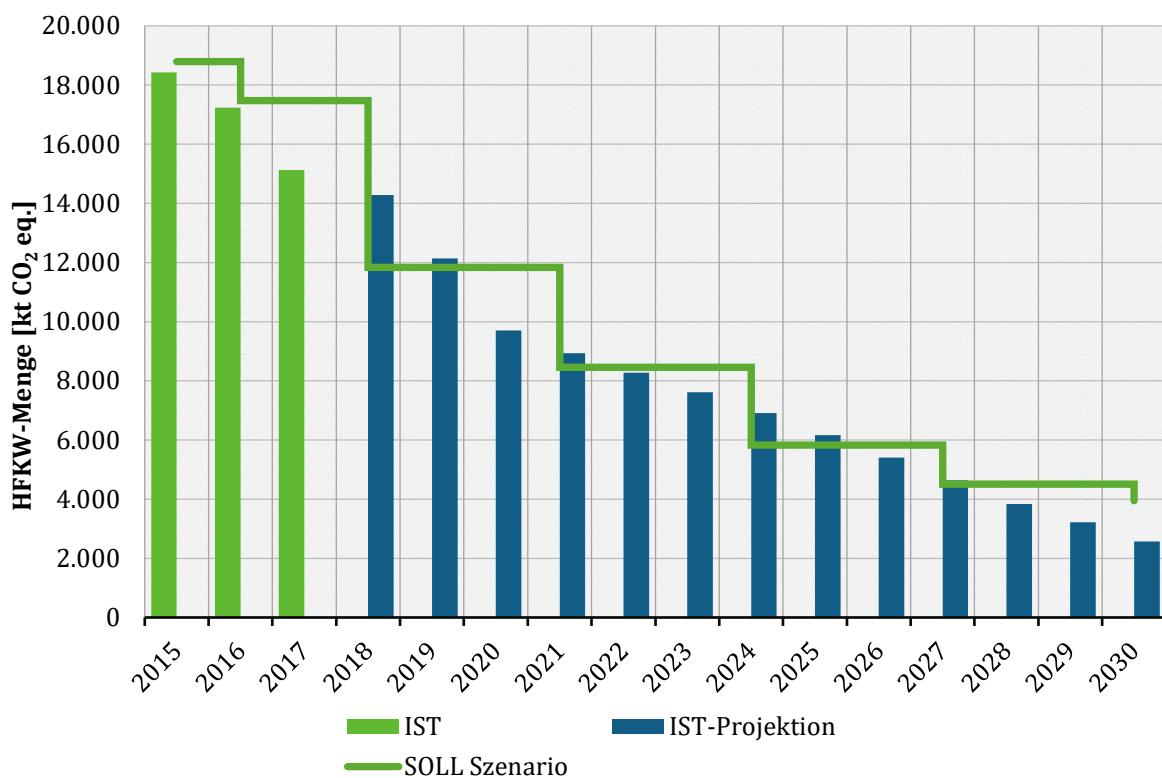
Abbildung 1: Vergleich der HFKW-Verwendungsmengen in Deutschland im SOLL- und IST-Szenario auf Grundlage des deutschen F-Gas-Modells (in kt CO₂ eq.)

Tabelle 22 vergleicht die dem SOLL-Szenario zugrundeliegenden durchschnittlichen Verwendungsmengen in den Jahren 2009 bis 2012 in Deutschland (Baseline: 100 % = 18,8 Mt CO₂ eq.) und die im jeweiligen Jahr verwendeten HFKW-Mengen, wobei andere Anwendungen als mobile und stationäre Kälte- und Klimatechnik in dieser Darstellung nicht berücksichtigt sind.

Es ist zu beachten, dass die Verwendungsmengen im IST-Szenario auf Annahmen basieren, die mit Ungenauigkeiten behaftet sind, die in den späteren Jahren des betrachteten Zeitraums größer sind als für die Jahre 2018-2020. Daher sollten Abweichungen im kleinen Prozentbereich eher als Unsicherheiten der Modellierung betrachtet werden, denn als signifikante Abweichung vom SOLL-Szenario.

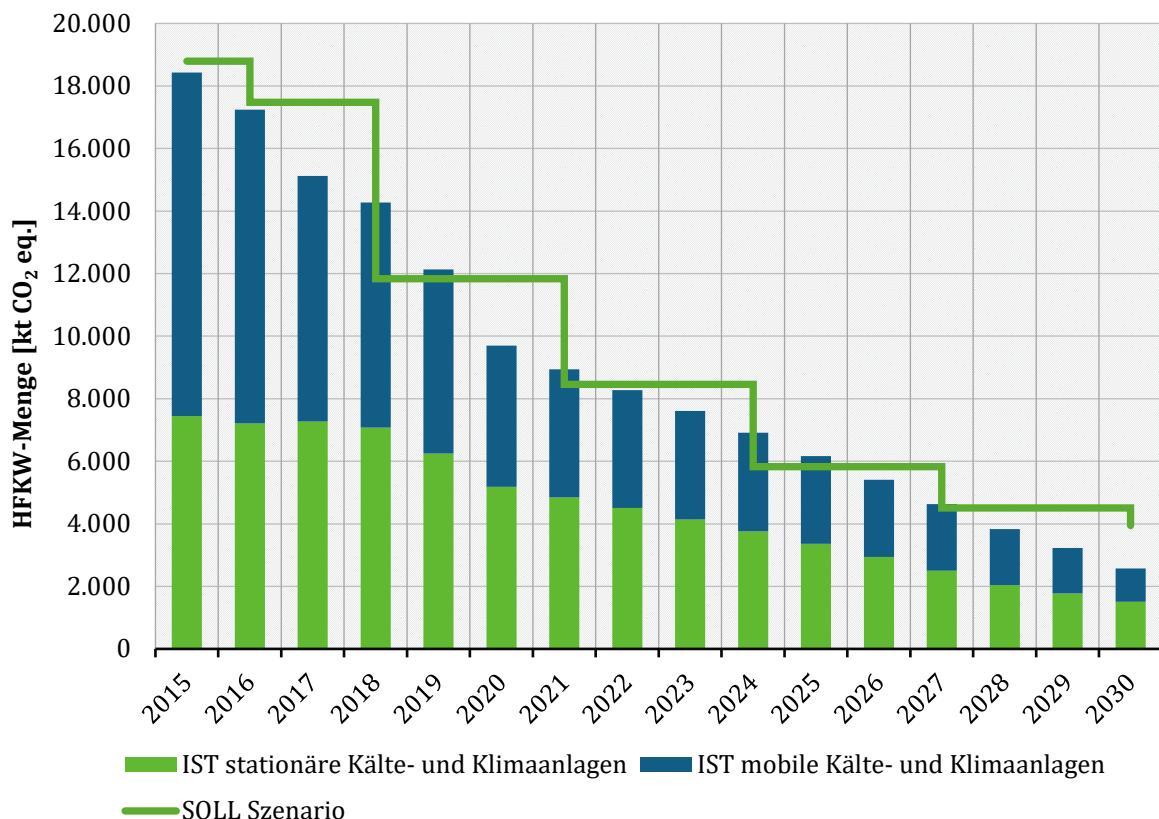
Tabelle 22: Prozentuale Darstellung der HFKW-Verwendungsmengen im SOLL- und IST-Szenario von 2015 bis 2030

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
SOLL-Szenario	100 %	93 %	93 %	63 %	63 %	63 %	45 %	45 %
IST-Szenario	98 %	92 %	80 %	76 %	65 %	52 %	48 %	44 %
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
SOLL-Szenario	45 %	31 %	31 %	31 %	24 %	24 %	24 %	21 %
IST-Szenario	41 %	37 %	33 %	29 %	25 %	20 %	17 %	14 %

Es zeigt sich, dass in einigen Jahren gemäß der Modellierung die zur Verfügung stehenden Verwendungsmengen durch die betrachteten Kälte-Klimaanwendungen vollständig verbraucht und zum Teil deutlich überschritten werden. Wie oben ausgeführt, sind andere Anwendungen hier nicht berücksichtigt.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Aufteilung der errechneten Verwendungsmengen im IST-Szenario mit Unterteilung in mobile und stationäre Kälte- und Klimaanwendungen. Entsprechend der getroffenen Annahmen sinken die Verwendungsmengen stetig, wobei eine erste starke Reduzierung bereits zwischen 2017 und 2018 in den mobilen Anwendungen erfolgte. Diese erklärt sich durch die Umstellung der Klimaanlagen in neuen Pkw auf vorwiegend R1234yf und in geringem Umfang R744 (CO₂). Eine weitere deutliche Reduzierung wird für 2020 in den stationären Kälteanwendungen erwartet, wenn Verbote der F-Gas-VO für die Neuinstallation von steckerfertigen Geräten mit Hoch-GWP-Kältemitteln und für die Nachfüllung von Supermarkt-Kälteanlagen (Wartung von Bestandsanlagen mit Füllmenge ≥ 40 t CO₂ eq.) in Kraft treten. Ab 2020 zeigt die Modellierung einen gleichmäßigen Rückgang der HFKW-Verwendungsmengen, wobei die Nachfrage der stationären Anwendungen die in den mobilen Anwendungen bis 2030 stets übersteigt.

Abbildung 2: Aufteilung der HFKW-Verwendungsmengen nach stationären und mobilen Kälte- und Klimaanwendungen im IST-Szenario (in kt CO₂ eq.)

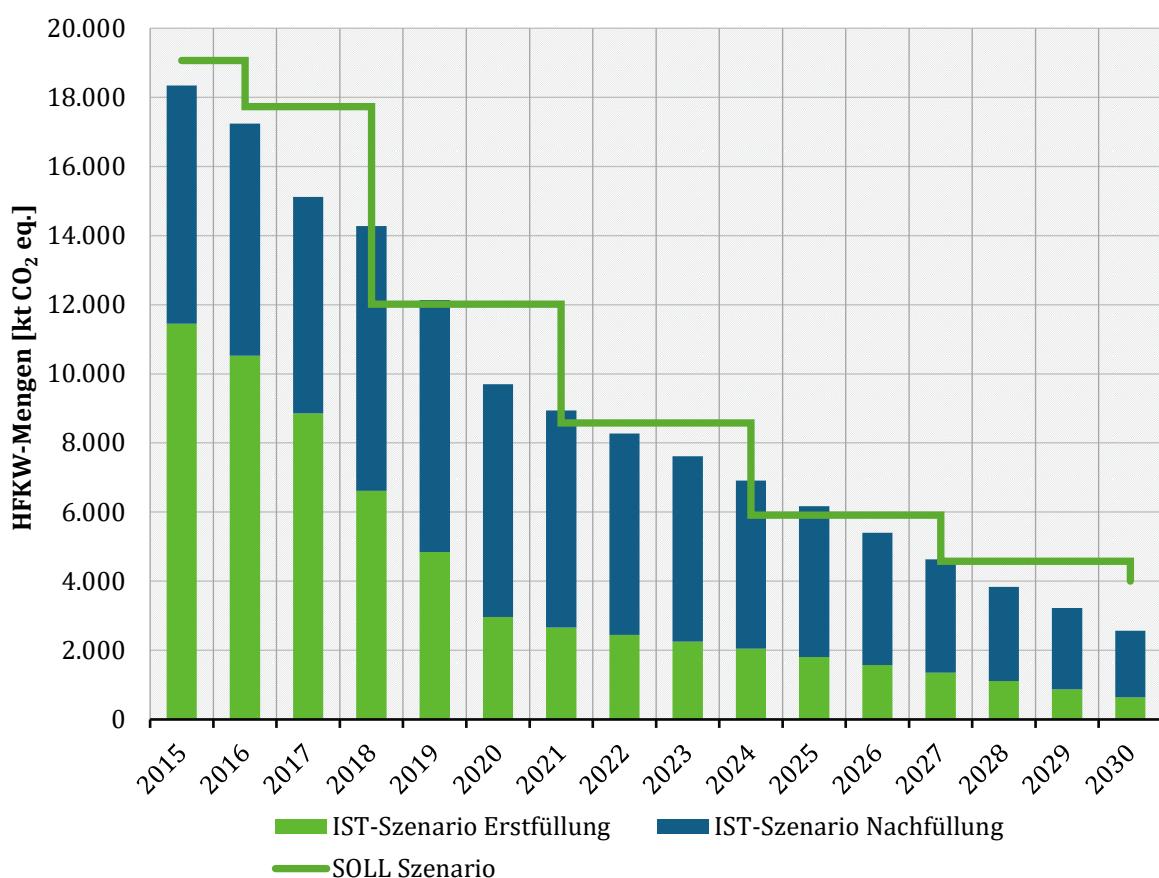


4.2 HFKW-Verwendungsmengen nach Neu- und Bestandsanlagen im IST-Szenario

Betrachtet man die im IST-Szenario voraussichtlich zu erwartenden Verwendungsmengen (in CO_2 eq.) für Neuanlagen (Erstfüllung) und Bestandsanlagen (Nachfüllung), so wird deutlich, dass die Wartung der Bestandsanlagen ab 2018 den größeren Anteil darstellt (siehe Abbildung 3).

Der starke Anstieg bei der Wartung von Bestandsanlagen in den Jahren 2018 bis 2020 wird hauptsächlich durch Anwendungen der Gewerbekälte verursacht (ca. 30% aller Nachfüllungen in diesen Jahren), wobei wegen des Verwendungsverbotes von HFKW mit $\text{GWP} \geq 2500$ ab 2020 Anlagen mit R404A umfassend auf Alternativen mit niedrigerem GWP (v.a. R448A und R449A) umgerüstet werden. Gleichzeitig sinken die HFKW-Verwendungsmengen für die Erstfüllung, da die Nutzung von nachhaltigen Alternativen mit niedrigerem GWP in Neuanlagen kontinuierlich zunimmt (z.B. R744). Zu beachten ist an dieser Stelle, dass ein relativ großer Sprung von 2016 (10,5 Mt CO_2 eq.) auf 2017 (8,9 Mt CO_2 eq.) und auf 2018 (7,6 Mt CO_2 eq.) zu verzeichnen ist: zurückzuführen auf die Einführung von R1234yf (GWP 4) in der PKW-Klimatisierung.

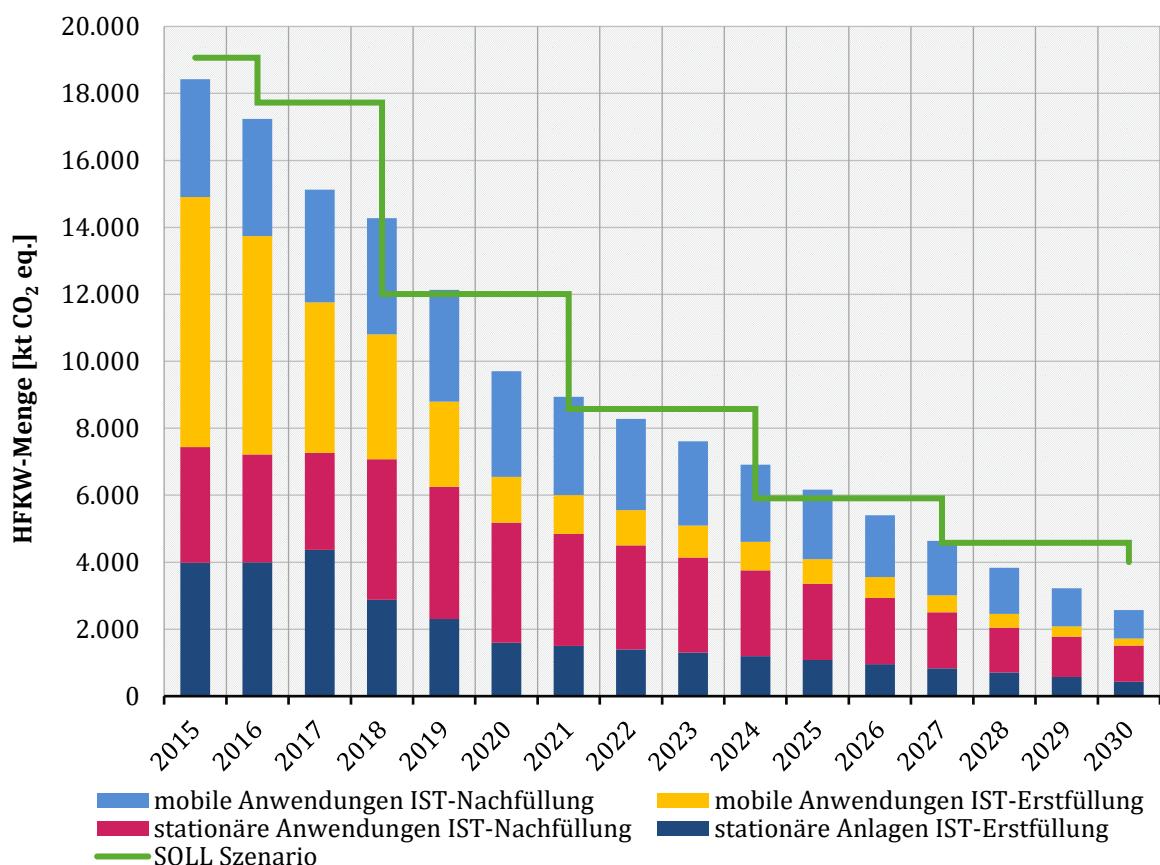
Abbildung 3: Aufteilung der HFKW-Verwendungsmengen nach Neuanlagen (Erstfüllung) und Bestandsanlagen (Nachfüllung) im IST-Szenario (in kt CO_2 eq.)



In Abbildung 4 sind die Anteile der benötigten Verwendungsmengen in CO_2 -Äquivalenten für Neuanlagen (Erstfüllung) und Bestandsanlagen (Nachfüllung) in den jeweiligen Anwendungen dargestellt. Dabei bezeichnen stationäre Anlagen stationäre Kälte- und Klimaanlagen. Entsprechend versteht man unter mobilen Anlagen mobile Kälte- und Klimaanlagen. Dabei machen Neuanlagen in mobilen Anwendungen zunächst 2015 den größten Anteil mit 41 % aus. Diese sinken

zwischen 2016 und 2018 rapide ab (von 6,5 auf 3,7 Mt CO₂-Äquivalenten), was insbesondere auf das ab Januar 2017 geltende Verbot der Neufüllung von PKW-Klimaanlagen mit einem Kältemittel mit GWP > 150 zurückzuführen ist. Insgesamt ist in diesem Bereich die größte Reduktion an CO₂-Äquivalenten zu verzeichnen: von 7,5 im Jahr 2015 auf 0,2 Mt CO₂-Äquivalente im Jahr 2030. Ab 2018 übersteigen die benötigten HFKW-Mengen im stationären Bereich die der im mobilen Sektor für Neu- und Bestandsanlagen verwendeten Mengen.

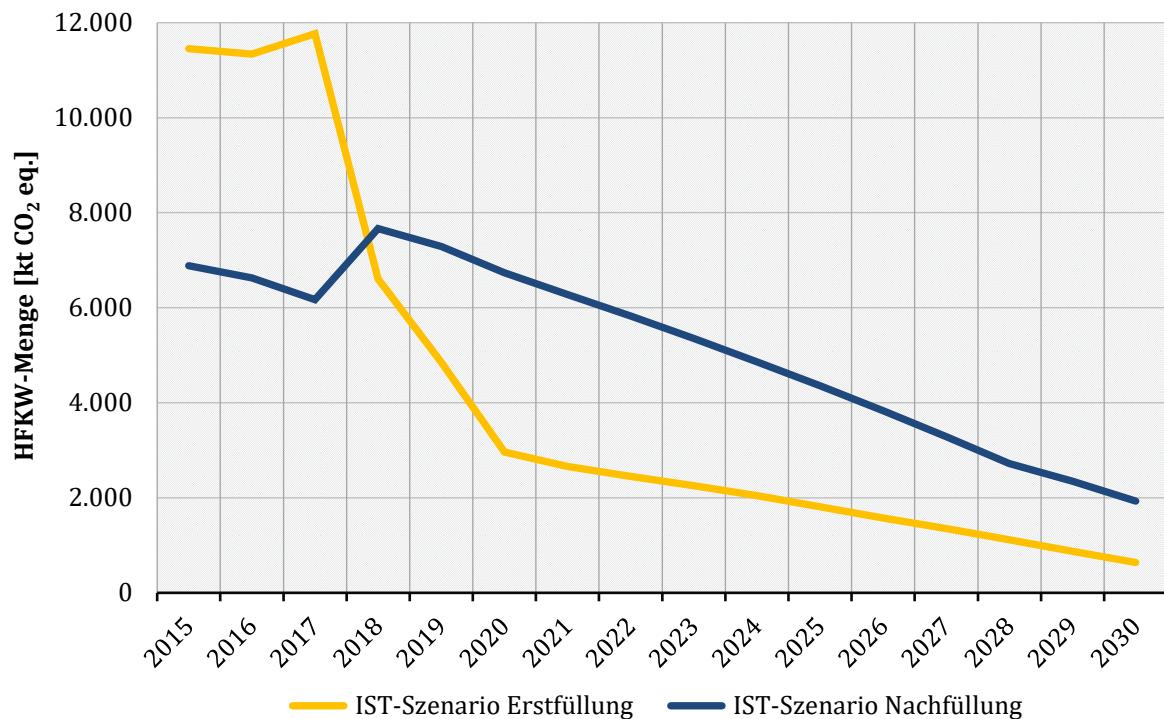
Abbildung 4: Aufteilung der HFKW-Verwendungsmengen nach Neuanlagen (Erstfüllung) und Bestandsanlagen (Nachfüllung) im IST-Szenario nach Art der Anwendung (in kt CO₂ eq.)



In Abbildung 5 sind die Anteile der benötigten Verwendungsmengen in CO₂-Äquivalenten für Neuanlagen (Erstfüllung) und Bestandsanlagen (Nachfüllung) im Vergleich dargestellt. Es wird deutlich, dass für die Wartung von Kälte-Klima-Bestandsanlagen 2018 schon 53% der Menge an CO₂-Äquivalenten, die im IST-Szenario zur Verfügung stehen, benötigt werden. Im Jahr 2020 steigt dieser Anteil auf fast 70% und nimmt kontinuierlich bis 75% im Jahr 2030 zu. Diese Entwicklung ist durch die sich noch im Bestand befindlichen Anlagen mit Hoch-GWP-Kältemitteln wie R404A (bis 2020), R449A und R448A (ab 2020) oder R134a zu erklären. Entsprechend wird der Anteil der für die Nachfüllung von Bestandsanlagen benötigten Mengen in CO₂-Äquivalenten ansteigen, sobald Alternativen mit geringerem GWP neu eingeführt werden. Die Bestandsanlagen werden entweder bis zum Ende ihrer Lebensdauer weiter betrieben oder nach Inkrafttreten von Verboten bzw. infolge mangelnder Verfügbarkeit des notwendigen (Hoch-) GWP-Kältemittels (oder einer geeigneten Drop-in-Lösung) stillgelegt. Je schneller demnach der Bestand ausgetauscht wird, desto schneller ist auch eine Reduzierung der für die Nachfüllung benötigten HFKW-Verwendungsmengen (in CO₂ eq.) umsetzbar.

Die Verwendung von wiederaufbereiteten Kältemitteln ist derzeit noch nicht stark verbreitet, nimmt aber langsam zu und könnte einen Teil der langfristig benötigten Verwendungsmengen abdecken. 2017 wurden EU-weit 1.659 t bzw. 3,9 Mt CO₂ eq. aufbereitet [EEA (2018)]. Dies entspricht einem Anteil von rund 2 % an der gesamten verfügbaren HFKW-Verwendungsmenge in 2017 (gemessen in CO₂ eq.).

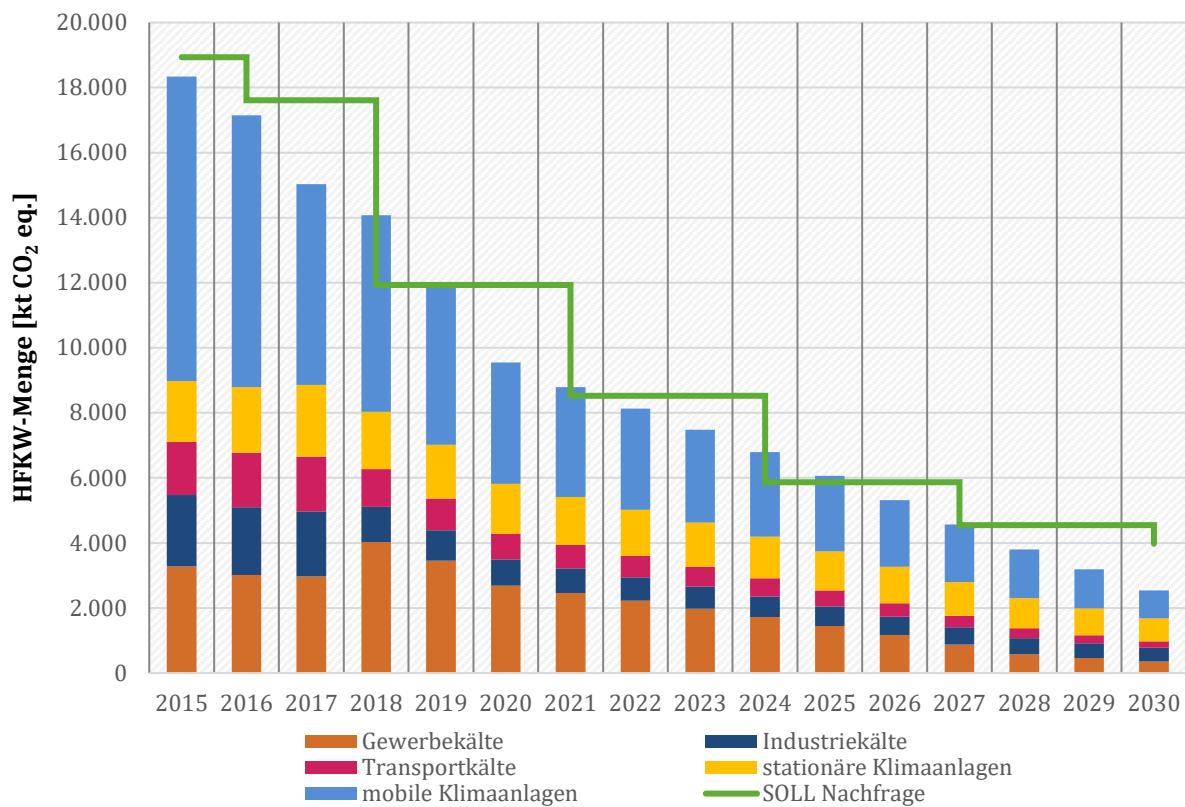
Abbildung 5: Entwicklung der IST-HFKW-Verwendungsmengen in Neuanlagen (Erstfüllung) und Bestandsanlagen (Nachfüllung) (in kt CO₂ eq.)



4.3 HFKW-Verwendungsmengen nach Sektoren im IST-Szenario

Dieser Abschnitt gibt eine Übersicht über die in den verschiedenen Sektoren benötigten HFKW-Mengen (angegeben in CO₂ eq.).

Abbildung 6: Entwicklung der IST-HFKW-Verwendungsmengen nach Sektoren im Vergleich zum SOLL-Szenario (in kt CO₂ eq.)



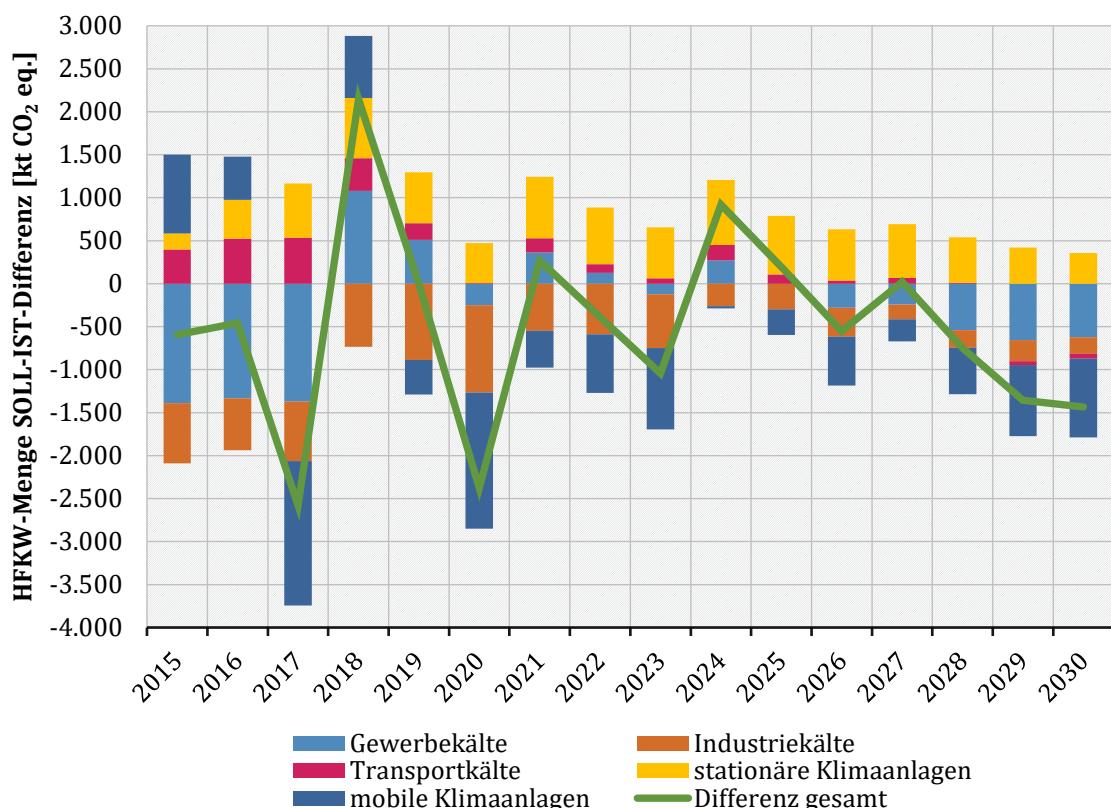
Sowohl im SOLL- als auch im IST-Szenario erfolgte die Berechnung entsprechend des Ansatzes des Gesamtmodells (Kapitel 3.4). Um die zur Verfügung stehenden Verwendungsmengen in CO₂-Äquivalenten für den jeweiligen Sektor bis 2030 zu erhalten, wurden im SOLL-Szenario die im Durchschnitt in den Jahren 2009 bis 2012 verwendeten Mengen des jeweiligen Sektors als Baseline herangezogen und entsprechend die Reduktionsschritte angewandt. Hier liegt die Annahme zugrunde, dass der Anteil der Sektoren bezogen auf den gesamten HFKW-Markt konstant bleibt. Im IST-Szenario flossen für jeden Sektor der angenommene Kältemittel-Mix sowie die projizierten Mengen an HFKW in die Berechnung ein. Die angenommenen HFKW-Mengen basieren auf dem F-Gas-Modell für die Emissionsberichtserstattung: In den meisten Sektoren ist ein leichtes Wachstum zu verzeichnen, mit ein paar wenigen Ausnahmen, in denen kein Wachstum (mobile Klimatisierung der PKW) oder ein sehr starkes Wachstum (Haushaltswärmepumpen) angenommen wird.

Abbildung 6 zeigt die Emissionen, ausgedrückt in CO₂-Äquivalenten, nach Sektoren. Der in den Jahren 2015 – 2017 mit Abstand wichtigste Sektor sind die mobilen Klimaanlagen. 2017 vollzieht sich in diesem Sektor ein erster starker Reduktionsschritt, der auf die Verpflichtung aus der MAC-Richtlinie zur Verwendung eines Kältemittels mit GWP < 150 bei PKW-Neufahrzeugen zurückzuführen ist. Dieser Trend setzt sich 2018 fort. In der Gewerbekälte ist ein Anstieg der

HFKW-Menge im Jahr 2018 zu verzeichnen: Grund dafür ist eine intensivierte Umrüstung von R404A-Bestandsanlagen, deren Lebensdauer noch nicht erreicht ist. Ab 2020 gilt ein Verbot für neue ortsfeste Kälteanlagen mit $GWP \geq 2500$ sowie ein Verbot der Wartung von Bestandsanlagen mit Kältemitteln, deren $GWP \geq 2500$ ist, ab einer Füllmenge von 40 Tonnen CO_2 -Äquivalente. In allen weiteren Sektoren ist von einer kontinuierlichen Reduktion der benötigten HFKW-Mengen auszugehen.

Eine andere Visualisierung der HFKW-Mengen der unterschiedlichen Szenarien zeigt Abbildung 7: entsprechend den im jeweiligen Sektor vorhandenen Reduktionsschritten gemäß HFKW-Phase-down (SOLL-Szenario des jeweiligen Sektors) und den jeweiligen im Sektor benötigten HFKW-Mengen in CO_2 -Äquivalenten wird entsprechend die positive sowie negative Abweichung dargestellt.

Abbildung 7: Darstellung der Abweichung der HFKW-Verwendungsmengen zwischen SOLL- und IST-Szenario nach Sektoren (in kt CO_2 eq.)



Das gesamt SOLL-Szenario ist in dieser Grafik die „0-Linie“. Abweichungen in den positiven Bereich bedeuten einen Mehrverbrauch. Findet sich die Säule des Sektors oder die Gesamtschlange im negativen Bereich, so wurde weniger verbraucht als im SOLL-Szenario dem jeweiligen Sektor zugerechnet wird – also theoretisch zur Verfügung steht. Diesen Berechnungen liegt die Annahme zugrunde, dass in jedem Sektor gleich große Mengen reduziert werden (in CO_2 eq.). Als Referenz dient pro Sektor eine Baseline (Durchschnitt der Verwendungsmengen aus dem Referenz-

zeitraum 2009 – 2012), die entsprechend der HFKW-Phase-down Schritte über den Zeitverlauf minimiert wird.

Zunächst fällt auf, dass im Bereich der mobilen Klimaanlagen im Jahr 2017 die dem Sektor zugerechnete HFKW-Menge bei Weitem nicht benötigt wird. Dies ist, wie schon erwähnt, auf die Nutzung von R1234yf in Neufahrzeugen zurückzuführen: gegenüber R134a (GWP 1430) hat R1234yf (GWP 4) ein stark reduziertes GWP. Gleichzeitig wird deutlich, dass diese technische Neuerung für den Reduktionsschritt von 2018 nicht ausreicht. Erst zeitverzögert kann der Sektor der mobilen Klimaanlagen die Vorgaben des HFKW-Phase-down erfüllen.

Bei stationären Klimaanlagen ist die Situation anders gelagert: Über den gesamten Zeitverlauf bis 2030 ist es unter den getroffenen Annahmen in diesem Sektor nicht möglich, die vom HFKW-Phase-down begrenzten Mengen einzuhalten. Hier sind technische Neuerungen für den Einsatz von Niedrig-GWP-Kältemitteln dringend erforderlich.

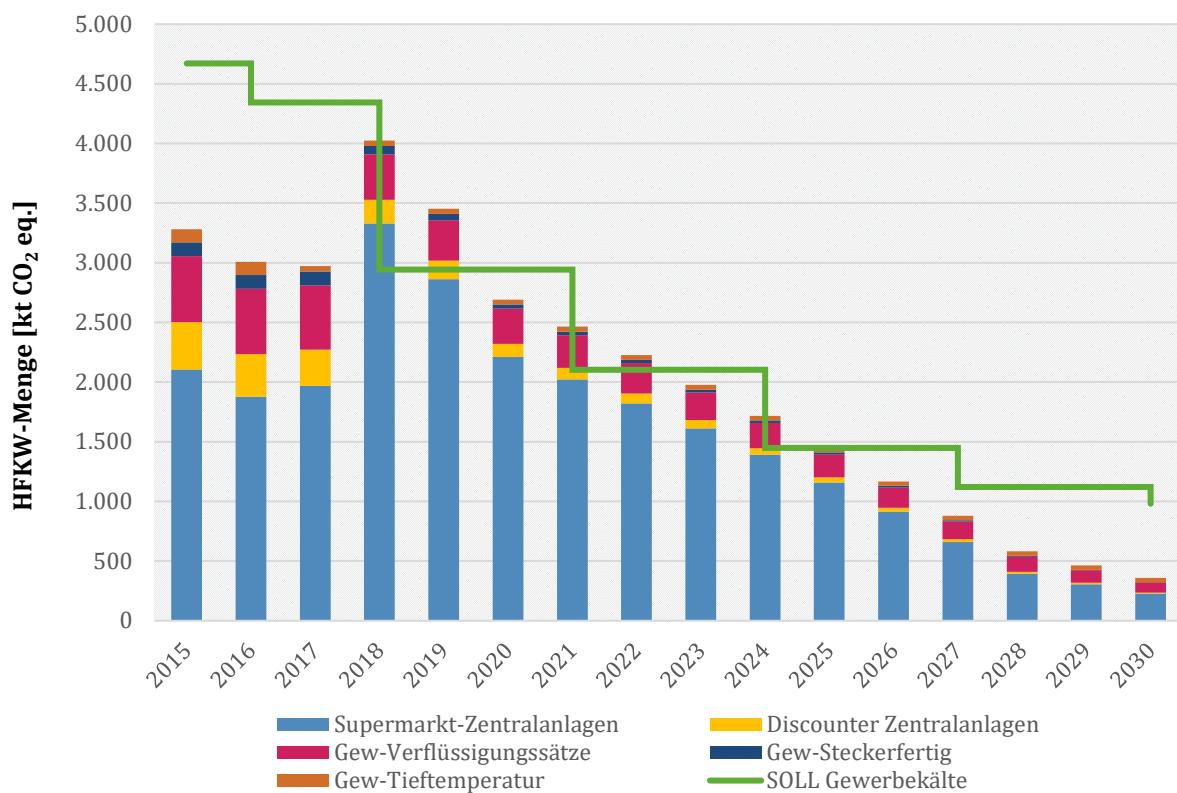
Im Bereich der Transportkälte wird erst in späteren Jahren die Vorgabe des HFKW-Phase-down erfüllt.

Der einzige Sektor, der über den gesamten Zeitverlauf weniger HFW-Mengen benötigt, als im Phase-down vorgesehen, ist die Industriekälte.

4.3.1 Gewerbekälte

Die Verwendungsmengen reduzieren sich im Zeitverlauf nicht in allen Bereichen. In der Gewerbekälte unterliegen die Verwendungsmengen insbesondere bei den Zentralanlagen Schwankungen. Dies ist auf die Verbote von Kältemitteln mit $GWP \geq 2.500$ in Neuanlagen und in Anlagen mit $\geq 40t \text{ CO}_2\text{-Äquivalente}$ zur Nachfüllung ab 2020 zurückzuführen, wie im Folgenden ausgeführt.

Abbildung 8: Entwicklung der IST-HFKW-Verwendungsmengen in der Gewerbekälte nach Verwendungsart im Vergleich zum SOLL-Szenario (in kt CO₂ eq.)



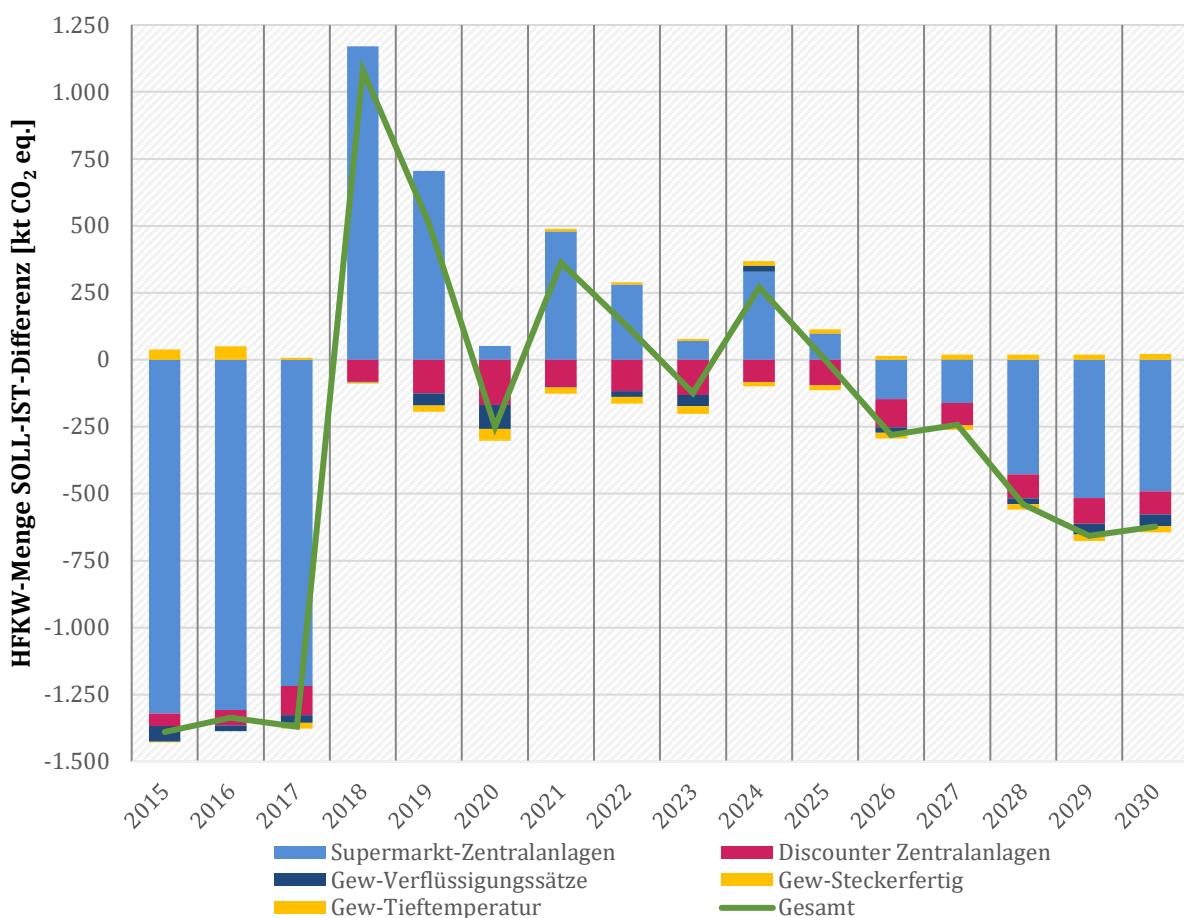
Betroffen ist hier R404A (GWP 3922), das durch die Drop-in-Lösungen R448A (GWP 1387) und R449A (GWP 1397) in Bestandsanlagen ersetzt werden kann. Aufgrund dessen wurden seit 2016 R404A-Anlagen auf diese Kältemittel umgerüstet, so dass dieser Anstieg in der Verwendungsmenge (ca. 12-fache Menge der metrischen Tonnen im Jahr 2017 im Vergleich zu 2015) die Reduktion der Verwendungsmenge von R404A überkompensierte. Vor diesem Hintergrund wurde für die Jahre 2018 und 2019 der Trend der Jahre 2016 und 2017 in metrischen Tonnen angenommen. Ab der Wirkung des Verbots 2020 sinken die Mengen in metrischen Tonnen wieder auf das Niveau vor der Umrüstung (Trend der Jahre 2005 – 2015), da hier davon ausgegangen wird, dass nur noch sehr wenige Umrüstungen stattfinden. Zu diesem Zeitpunkt liegt das durchschnittliche GWP aller HFKW im Phase-down (2021 – 2023: GWP 880) unterhalb dem der beiden Drop-in-Lösungen.³

³ Berechnung des durchschnittlichen GWP der Baseline anhand der in den Jahren der Baseline verwendeten metrischen Tonnen und das GWP der verwendeten Kältemittel. Um das durchschnittliche GWP für die

In CO₂-Äquivalenten ausgedrückt schlägt sich diese Entwicklung folgendermaßen nieder: Die gesamte Verwendungsmenge reduzierte sich in den Jahren 2015 von 2,1 Mt CO₂ eq. auf 1,9 Mt CO₂ eq. in 2016. Seit 2017 (2,0 Mt CO₂ eq.) steigt diese wieder an und ist in den Jahren 2018 (3,3 Mt CO₂ eq.) und 2019 (2,9 Mt CO₂ eq.) am höchsten. Die Überkompensation von R404A findet also erst 2017 in der gesamten Verwendungsmenge statt, auch wenn in 2016 bereits umgerüstet wurde. Nach 2020 sinkt die verwendete HFKW-Menge dann kontinuierlich bis 2030.

Bei den steckerfertigen Geräten erklärt sich der geringere Bedarf an HFKW-Verwendungsmengen im IST- Szenario durch die mittlerweile weit verbreitete Nutzung von Propan. Dieser Trend setzt sich bis 2030 fort und ersetzt schrittweise R407C, R134a und R404A.

Abbildung 9: Darstellung der Abweichung der HFKW-Verwendungsmengen zwischen SOLL- und IST-Szenario in der Gewerbekälte nach Verwendungsart (in kt CO₂ eq.)



In Discouter-Zentralanlagen zeigt sich dank der Verbreitung von niedrig-GWP-Kältemitteln eine stetige Unterschreitung der im SOLL-Szenario diesem Bereich zugerechneten CO₂-Äquivalente. Bei Supermarkt-Zentralanlagen ist ein deutlicher Sprung vom Verbrauch von weniger CO₂-Äquivalenten als im SOLL-Szenario 2017 zugerechnet zu einem deutlichen Überschreiten im Jahr 2018 zu verzeichnen. Zwei Entwicklungen sind Grund dafür: Einerseits die schon erwähnten

folgenden Jahre zu erhalten, wurden die Reduktionsschritte des Phase-Down auf das durchschnittliche GWP der Baseline angewandt.

zahlreichen Umrüstungen von R404A-Anlagen auf R448A/R449A-Anlagen. Andererseits auch der Reduktionsschritt, der gemäß des HFKW-Phase-down nur noch 63% der Referenzmenge im Jahr 2018 vorsieht.

Diskussionsbedarf

Der Ersatz von R23 in Tieftemperaturanwendungen wird diskutiert, allerdings zeichnet sich derzeit keine klare Alternative ab. Die Verwendung von wiederaufbereiteten Kältemitteln kann nur vorübergehend einen Lösungsansatz darstellen.

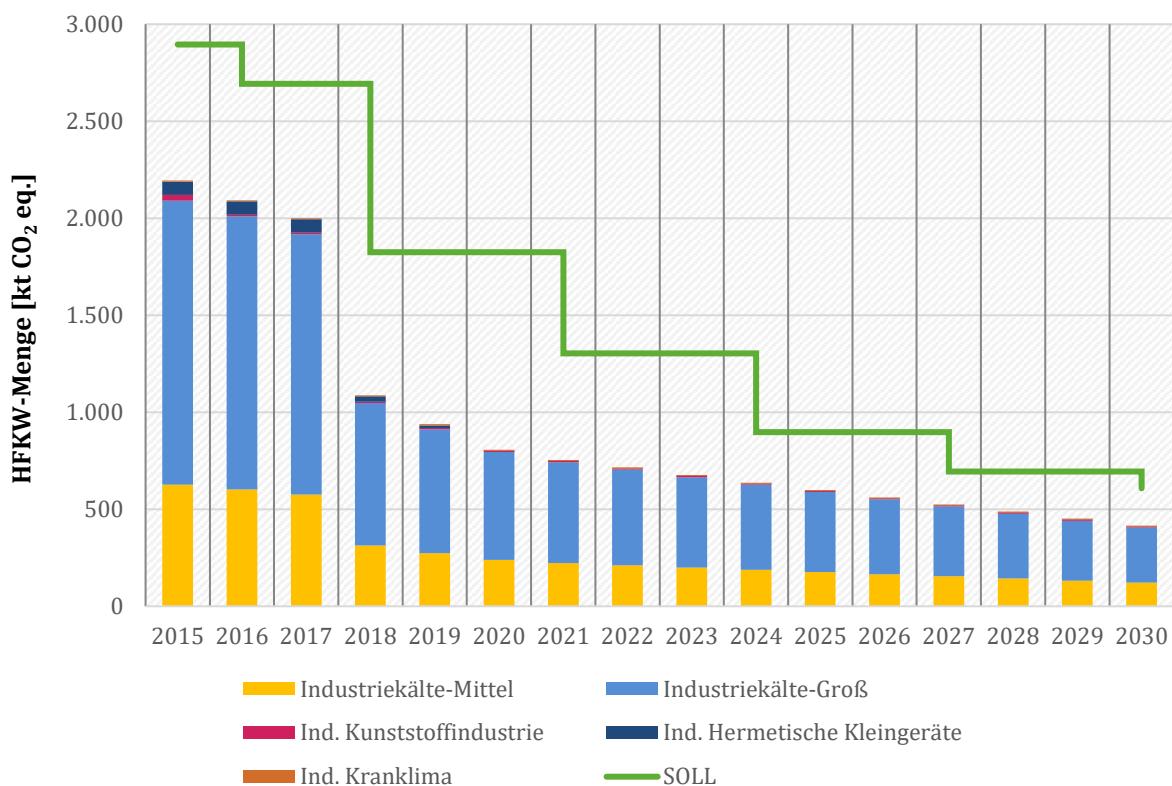
Bei Verflüssigungssätzen ist aktuell eine Vielzahl an Kältemitteln im Einsatz, bei denen nicht klar ist, auf welche sich die Branche perspektivisch konzentrieren wird. Es ist aus zweierlei Gründen eher unwahrscheinlich, dass langfristig sämtliche Alternativen am Markt bestehen: Zum einen wäre es für Hersteller zu aufwändig und kostenintensiv alle Komponenten so zu produzieren, dass sie für die unterschiedlichen Eigenschaften der Kältemittel anwendbar sind (brennbar/ nicht brennbar, unterschiedliche Drucklagen, etc.). Andererseits sind einige Kältemittel zwar mit relativ niedrigem GWP (z.B. R454C/R455A) als Ersatz für Hoch-GWP-Kältemittel (wie R404A) in Anlagen durch Austausch einiger Komponenten einsetzbar. Im Verlauf des HFKW-Phase-down und den damit verbundenen Preissteigerungen kann es jedoch in absehbarer Zeit zur Verdrängung einzelner hochpreisiger Kältemittel kommen.

4.3.2 Industriekälte

In diesem Bereich werden Zentralanlagen und hermetische Kleingeräte, die in der Industrie eingesetzt werden, betrachtet. Außerdem sind Sonderanwendungen wie Baukräne, die mit R227ea klimatisiert sind, und Prozesse in der Pharmaindustrie eingeschlossen.

Es zeigt sich, dass dieser Sektor am besten die SOLL-Vorgaben aller Sektoren erfüllt bzw. unterschreitet. Dies ist vor allem auf die frühe Verwendung von natürlichen Kältemitteln mit niedrigem GWP zurück zu führen. Insbesondere in großen und mittelgroßen Industriezentralanlagen ist der vermehrte Einsatz von Ammoniak (R717) zu beobachten, das in Neuanlagen als Ersatz für R22 verstärkt eingeführt wurde. Dieser Trend zu natürlichen Kältemitteln wird bis 2030 fortgesetzt und durch Propan (R290) ergänzt. Hinzu kommt, dass in der Industriekälte der Verbrauch in den Jahren 2009 bis 2012 relativ hoch war und somit die Referenzmenge entsprechend hoch ist. Die Verwendungsmenge reduzierte sich stetig seit 2012 bis 2017.

Abbildung 10: Entwicklung der IST-HFKW-Verwendungsmengen in der Industriekälte nach Verwendungsart im Vergleich zum SOLL-Szenario (in kt CO₂ eq.)

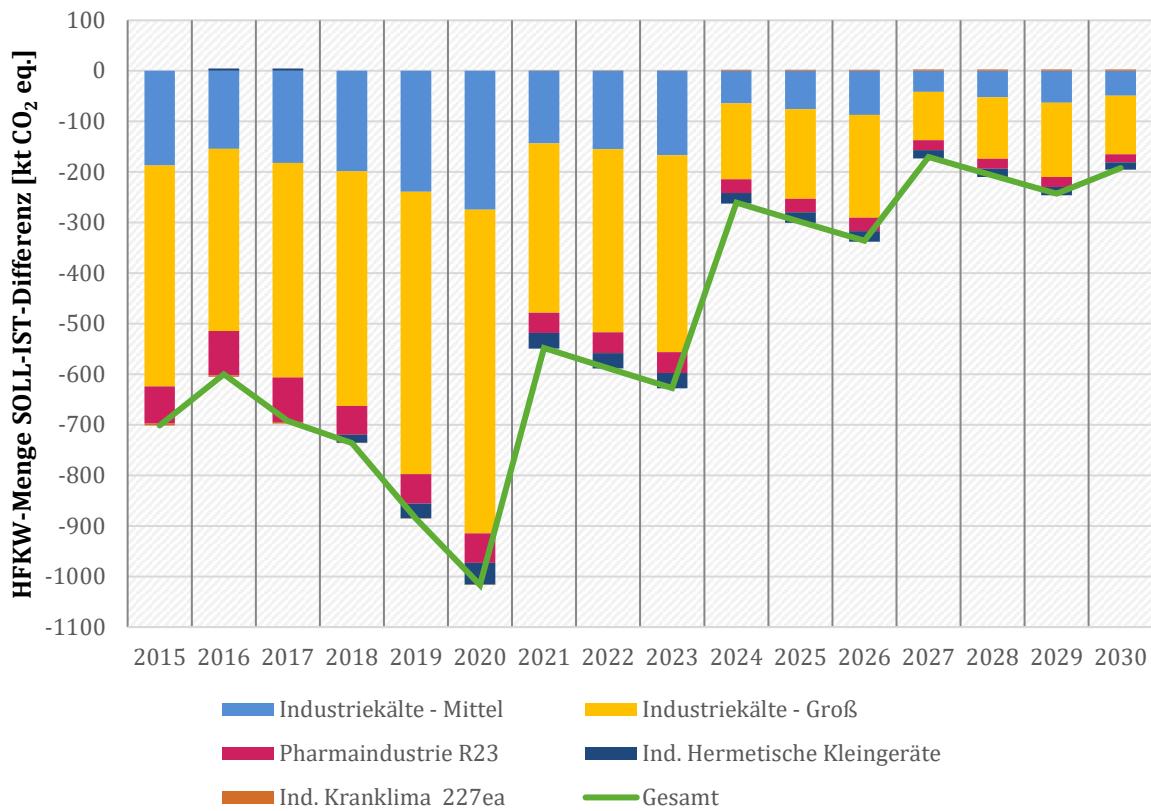


Wie in der vorherigen Grafik abgebildet, vollzieht sich im IST-Szenario von 2017 (berichtete Daten) auf 2018 (modellierte Daten) ein deutlicher Reduktionsschritt, der darauf zurückzuführen ist, dass bei großen und mittelgroßen Industriezentralanlagen davon ausgegangen wird, dass sich Ammoniak schneller durchsetzt und Hoch-GWP Kältemittel (wie R134a sowie R404A) durch Installation von Neuanlagen schneller ablöst.

In der folgenden Grafik wird deutlich, dass die Differenz zwischen SOLL- und IST-Verwendungsmengen in CO₂-Äquivalenten sich stetig verringert und die theoretisch zusätzlich zur Verfügung stehenden CO₂-Äquivalente 2030 nur noch 192 kt CO₂ eq. betragen. Der Reduktionsschritt im Jahr 2018 verringert die benötigten CO₂-Äquivalente mit 912 kt CO₂ eq. um fast die Hälfte und ist

beachtlich. An dieser Stelle kann zu bedenken gegeben werden, dass auch in der Industriekälte die Möglichkeit eines Überschreitens der Mengen besteht, sollten sich natürlich Kältemittel nicht so stark durchsetzen, wie erwartet.

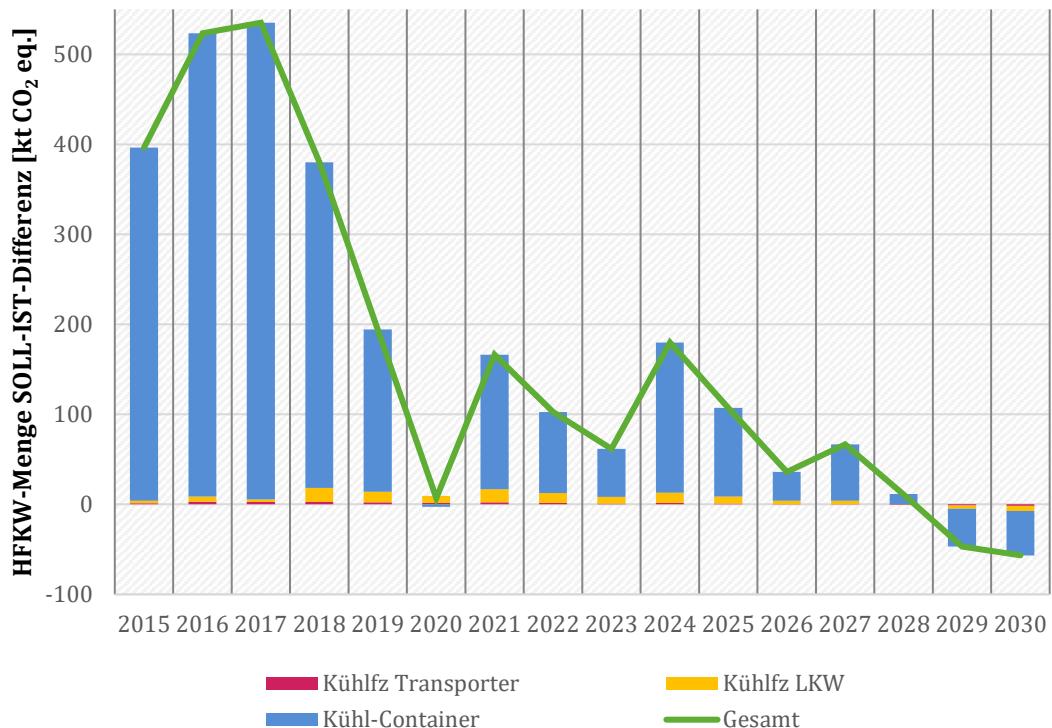
Abbildung 11: Darstellung der Abweichung der HFKW-Verwendungsmengen zwischen SOLL- und IST-Szenario in der Industriekälte nach Verwendungsart (in kt CO₂ eq.)



4.3.3 Transportkälte

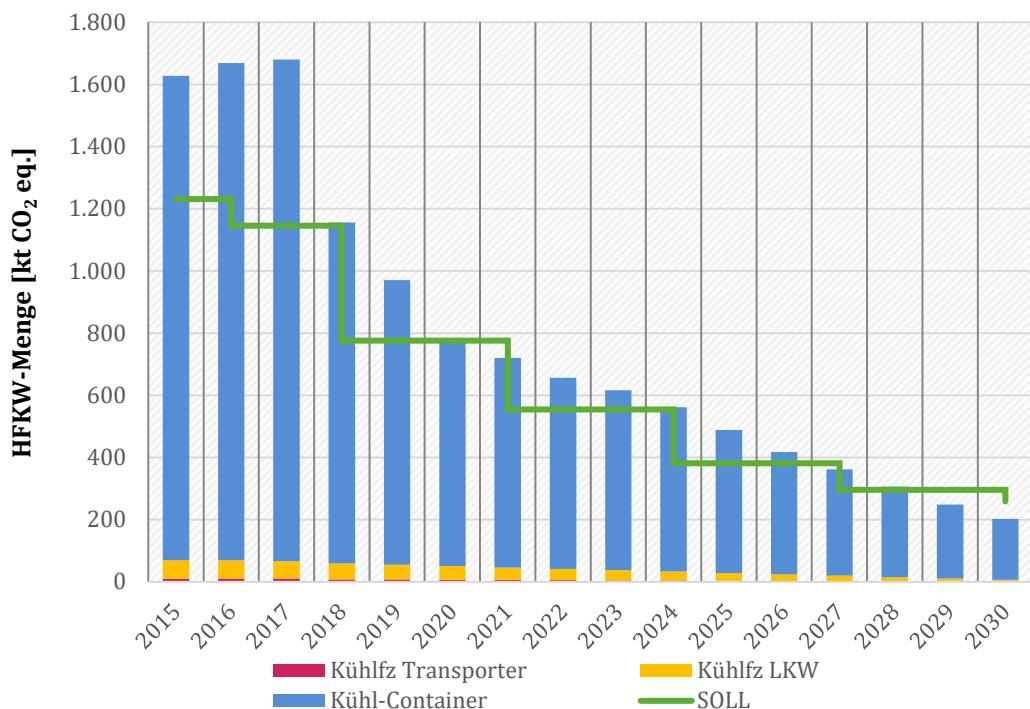
In diesem Sektor, der Kühlfahrzeuge aller Größenklassen sowie Kühlcontainer umfasst, zeigt sich, dass über (fast) den gesamten Zeitverlauf des HFKW-Phase-down die Verwendungsmengen in CO₂-Äquivalenten im IST-Szenario höher liegen als im SOLL-Szenario.

Abbildung 12: Darstellung der Abweichung der HFKW-Verwendungsmengen zwischen SOLL- und IST-Szenario in der Transportkälte nach Verwendungsart (in kt CO₂ eq.)



Erst im Jahr 2029 liegt die zu erwartende Menge unterhalb des Reduktionsschrittes im SOLL-Szenario. Hintergrund dafür sind erstens die steigenden Mengen der zu transportierenden Güter. Zweitens sind in diesem Sektor aktuell Niedrig-GWP-Alternativen noch nicht verfügbar, sodass ein Umstieg auf diese erst später im Zeitverlauf vollzogen werden kann. Dem wurde in der Schätzung der Marktdurchdringungsraten Rechnung getragen.

Abbildung 13: Entwicklung der IST-HFKW-Verwendungsmengen in der Transportkälte nach Verwendungsart im Vergleich zum SOLL-Szenario (in kt CO₂ eq.)



Diskussionsbedarf

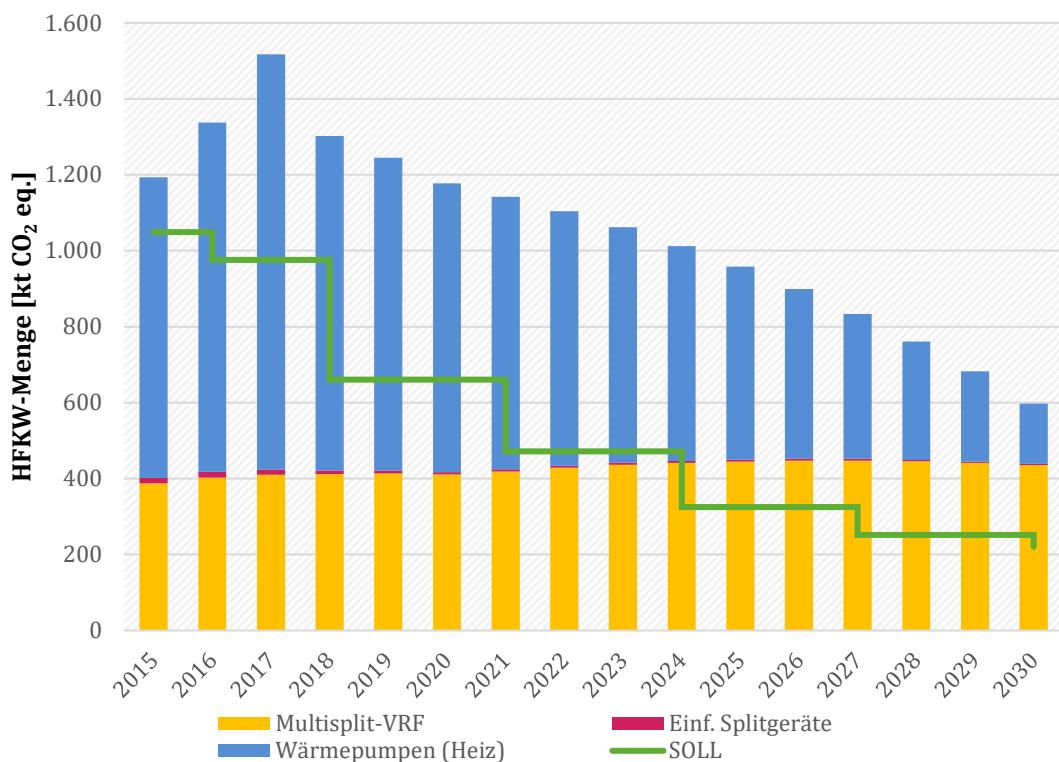
Diskussionsbedarf besteht bei Kühlfahrzeugen aller Größenklassen, da aktuell noch keine Kältemittelalternative mit einem GWP < 300 (bzw. GWP < 150) für Tiefkühlung auf dem Markt verfügbar ist.

Für die weniger verbreitete Normalkühlung könnte R1234yf (GWP 4) eine Alternative zu R134a sein. Jedoch muss hier beachtet werden, dass dieses Kältemittel schon in der Autoklimatisierung eingesetzt wird, weshalb dessen Verfügbarkeit und Durchsetzung in diesem Sektor grundsätzlich fraglich ist und die Brennbarkeit von manchen Herstellern kritisch gesehen wird. Die gleichen Fragen stellen sich auch für den Bereich der Kühlcontainer.

4.3.4 Stationäre Klimatisierung

Die zu diesem Sektor zugehörigen mobilen Raumklimageräte sind für die HFKW-Verwendungsmengen in Deutschland nicht relevant, da deren Produktion und Befüllung im Ausland erfolgt und auch keine Nachfüllung in Deutschland stattfindet. Aus diesem Grund sind diese hier nicht aufgeführt.

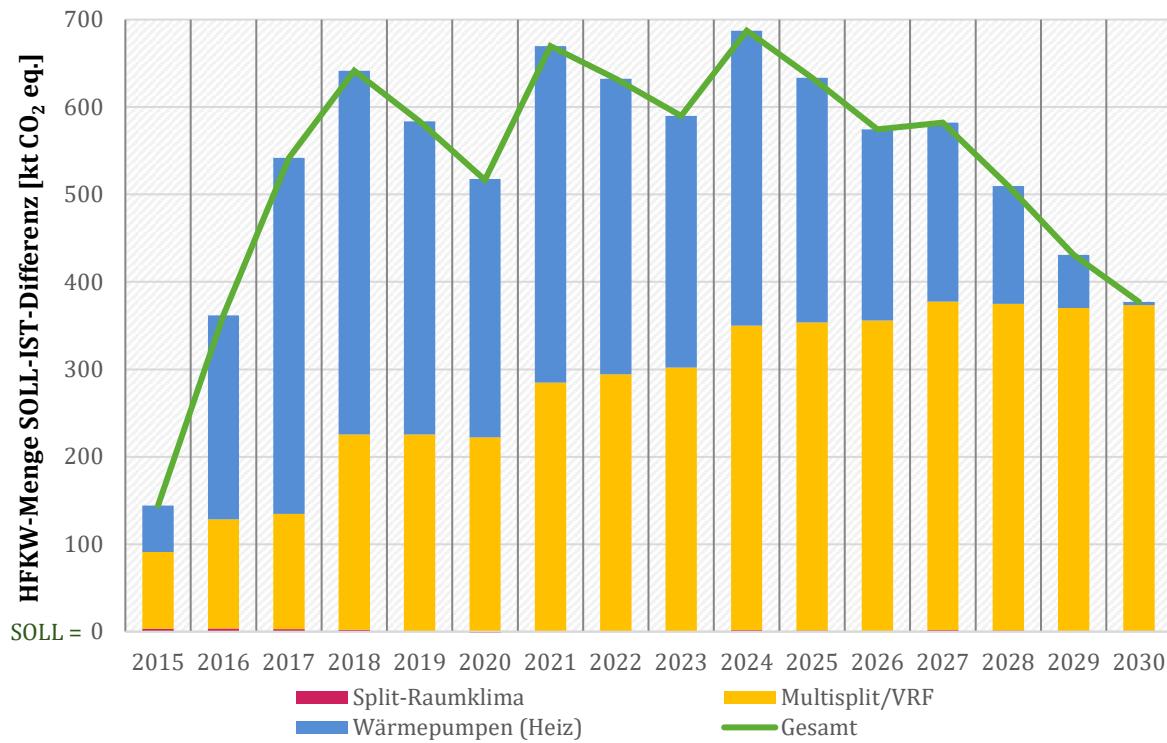
Abbildung 14: Entwicklung der IST-HFKW-Verwendungsmengen in der stationären Klimatisierung (ohne Flüssigkeitskühlsätze) nach Verwendungsart im Vergleich zum SOLL-Szenario (in kt CO₂ eq.)



Für **Single-Split-Klimageräte** liegen die IST-Verwendungsmengen bis 2017 deutlich über dem SOLL-Szenario, und zwar 2015 um 3 kt CO₂ eq., 2016 um 4 kt CO₂ eq. und 2017 um 3 kt CO₂ eq. Im Jahr 2018 sinken diese dann stark (um 31 %), da die Verbreitung von R32-Anlagen rasch zunimmt. Der durch den Einsatz von R32 erzielte Effekt der Reduktion der verwendeten HFKW-Mengen in CO₂-Äquivalenten wird ab 2021 durch das in diesem Anwendungssektor erwartete Wachstum überkompensiert: Die 2020 weniger verbrauchten 1 kt CO₂ eq. steigen wieder an, so dass 2021 1 kt CO₂ eq. mehr verwendet wird. Bis 2030 pendelt sich die IST-Verwendungsmenge bei 1-2 kt CO₂ eq. über der im SOLL-Szenario zugerechneten Menge ein.

Im Bereich der **Haushaltswärmepumpen** ist ein relativ starker Anstieg der HFKW-Verwendungsmengen in den Jahren 2015 (791 kt CO₂ eq.) bis 2017 (1.093 kt CO₂ eq.) festzustellen. Ab 2018 (881 kt CO₂ eq.) sinken die in dieser Anwendung benötigten Mengen wieder, obwohl ein relativ starkes Sektorwachstum (130% von 2015 bis 2030) angenommen wird. Erreicht wird dies dank der angenommenen breiten Einführung von natürlichen Kältemitteln (R290, R744). Allerdings bleiben in diesem Sektor bis 2030 einige fluorierte Kältemittel mit mittleren Treibhauspotenzialen zu 67% bei Neuanlagen in Verwendung (R32, R513A, R466, R454C bzw. R455A).

Abbildung 15: Darstellung der Abweichung der HFKW-Verwendungsmengen zwischen SOLL- und IST-Szenario in der stationären Klimatisierung nach Verwendungsart (in kt CO₂ eq.)



Multi-Split-Systeme und VRF-Anlagen benötigen über den gesamten Zeitverlauf eine deutliche größere HFKW-Menge (in CO₂ eq.) als gemäß HFKW-Phase-down diesem Sektor zugerechnet. Es findet sogar ein leichter Anstieg der erforderlichen HFKW-Verwendungsmengen von 2015 (387 kt CO₂ eq.) bis 2030 (435 kt CO₂ eq.) statt. Zurückzuführen ist dies sowohl auf ein relativ starkes Wachstum dieser Anwendungen (2015 bis 2030 um ca. 100%) als auch auf die Annahme, dass R32 (GWP 675) 2030 noch in 70 % und R410A (GWP 2088) noch in 25 % der Neuanlagen eingefüllt werden.

Diskussionsbedarf

Es zeigt sich deutlich, dass in Multi-Split-Systemen und VRF-Anlagen große Potenziale zur Verringerung der Verwendungsmengen vorliegen. Bislang werden die Brennbarkeit von Kohlenwasserstoffen und die entsprechenden Restriktionen in den Sicherheitsstandards als Barrieren für den Einsatz dieser Alternativen wahrgenommen. Daneben könnten wiederaufbereitete Kältemittel zumindest (teilweise) vorübergehend eingesetzt werden.

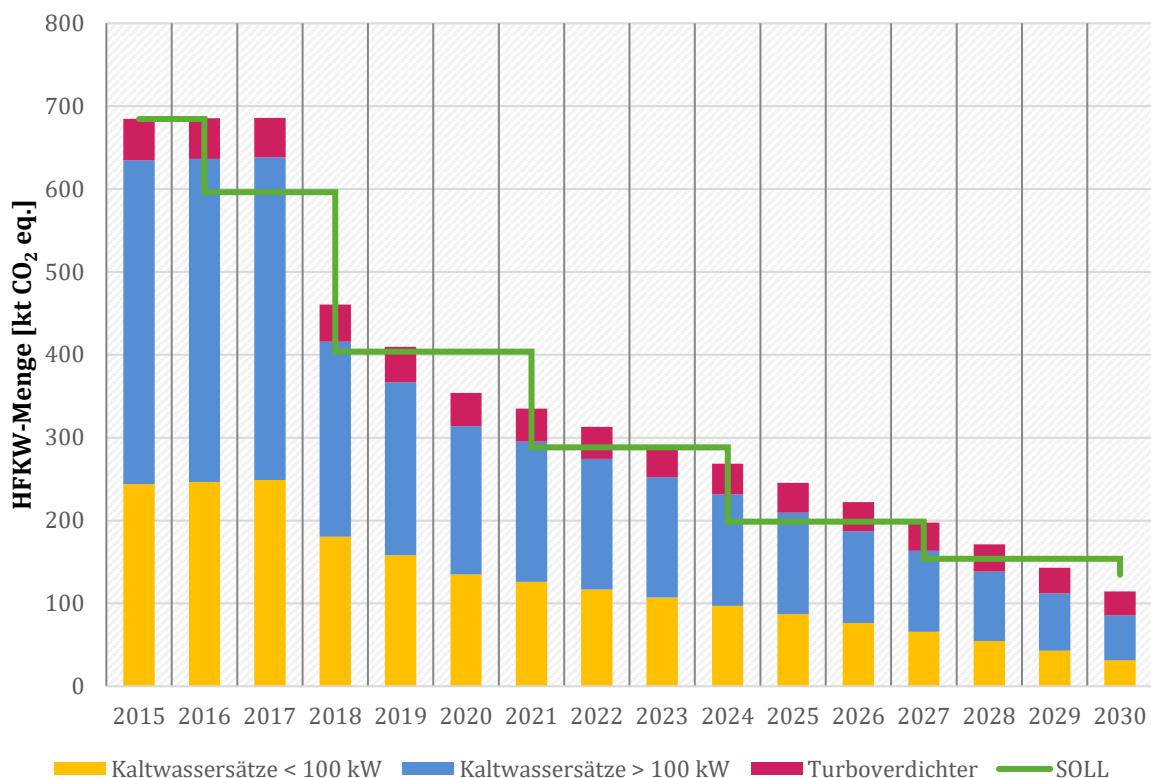
4.3.5 Flüssigkeitskühlsätze

Hier werden alle Flüssigkeitskühlsätze, d.h. über das gesamte Kälteleistungsspektrum und sämtliche Anwendungen (auch Industrieanwendungen) hinweg, betrachtet.

In den Jahren 2015 bis 2017 bewegen sich die HFKW-Verwendungsmengen auf gleichem Niveau (685 kt CO₂ eq.) und deutlich über den im SOLL-Szenario dem Sektor zugerechneten Mengen

(2015: 641 kt CO₂ eq./2017: 596 kt CO₂ eq.). Nur in den Jahren 2020, 2029 (143 kt CO₂ eq.) und 2030 liegt die zu erwartende, notwendige HFKW-Menge unterhalb der im SOLL-Szenario berechneten Menge.

Abbildung 16: Entwicklung der IST-HFKW-Verwendungsmengen bei Flüssigkeitskühlsätzen nach Verwendungsart im Vergleich zum SOLL-Szenario (in kt CO₂ eq.)



Da die modellierten HFKW-Mengen im Jahr 2018 33 % unterhalb der im Jahr 2017 berichteten Mengen liegen, kann für diesen Sektor perspektivisch mit einem noch größeren „Überschreiten“ der Mengen gerechnet werden. Grund für diese Differenz ist, dass im Modell schon 2018 von einem anderen Kältemittel-Mix bei Neuanlagen ausgegangen wird, der mehr Kältemittel mit mittlerem oder niedrigem GWP berücksichtigt (R32/R454B) und natürliche Kältemittel einschließt, die nicht dem HFKW-Phase-down unterliegen (R290/R718).

Diskussionsbedarf

Diskussionsbedarf besteht bei den Flüssigkeitskühlsätzen – wie bei den Verflüssigungssätzen der Gewerbekälte – mit Blick auf die Kältemittel, die sich am Markt durchsetzen werden. Anders als in anderen Sektoren steht eine Vielzahl an Kältemitteln grundsätzlich als Alternativen zu den bisher verwendeten HFKW zur Verfügung. Insbesondere bei den Kältemitteln im mittleren GWP-Bereich (zum Beispiel R513A (GWP 631) oder R452B (GWP 698)), die aufgrund des GWP wohl nur als Zwischenlösung fungieren können, ist unklar, welche sich durchsetzen werden. Dieser Aspekt ist für die vorliegende Betrachtung nachrangig, da die CO₂-Äquivalente kaum differieren und entsprechend gemittelt wurden. Allerdings ist für die Entwicklung der Komponenten der Anlagen und für den Ausbau der Marktpräsenz einzelner Hersteller die Wahl des Kältemittels von Belang, da deren unterschiedliche Eigenschaften bei der Entwicklung und Herstellung der Komponenten berücksichtigt werden müssen.

Bezüglich der Verfügbarkeit von R32 für Flüssigkeitskühlsätze besteht Unsicherheit, da bislang nur ein Hersteller R32 in großem Umfang in Split-Geräten und VRF-Anlagen einsetzt. Für die prognostizierte Marktdurchdringungsrate von 5 bis 15 % müsste im Falle mangelnder Verfügbarkeit ein neues, bisher noch nicht bekanntes Kältemittel eingesetzt werden, das den technischen Anforderungen entspricht und ein niedrigeres GWP aufweist.

Die Frage, ob sich R1233zd oder R1234ze in den Flüssigkeitskühlsätzen mit einer Kälteleistung > 100 kW durchsetzen wird, ist nicht nur mit Blick auf das GWP und die technischen Komponenten relevant, sondern auch hinsichtlich des ozonabbauenden Potenzials (ODP). R1233zd, das aktuell bereits eingesetzt wird und laut Recherchen künftig einen größeren Anteil am Markt erhalten wird (bis 5 % der Neuanlagen in 2030), weist durch seinen Bestandteil an Trifluoriodmethan (CF₃I) ein geringes ODP von 0,00034 auf [WMO (2014)].

4.3.6 Mobile Klimatisierung – PKW

In diesem Abschnitt wird die Autoklimatisierung betrachtet. Aufgrund der Richtlinie zur PKW-Klimatisierung werden seit 2017 alle Neufahrzeuge für den europäischen Markt mit dem Niedrig-GWP-Kältemittel R1234yf (GWP 4) ausgestattet. Die so schon stark verringerte Menge an CO₂-Äquivalenten wird zusätzlich durch die Annahme eines Nullwachstums für diesen Sektor begünstigt. So bleibt die benötigte Menge an metrischen Tonnen für Autoklimaanlagen konstant und die Verwendung von Neuanlagen, die mit R1234yf (GWP 4) oder R744 (GWP 1) betrieben werden, zeigt schneller einen Effekt.

Abbildung 17: Darstellung der Abweichung der HFKW-Verwendungsmengen zwischen SOLL- und IST-Szenario in der Pkw-Klimatisierung (in kt CO₂ eq.)

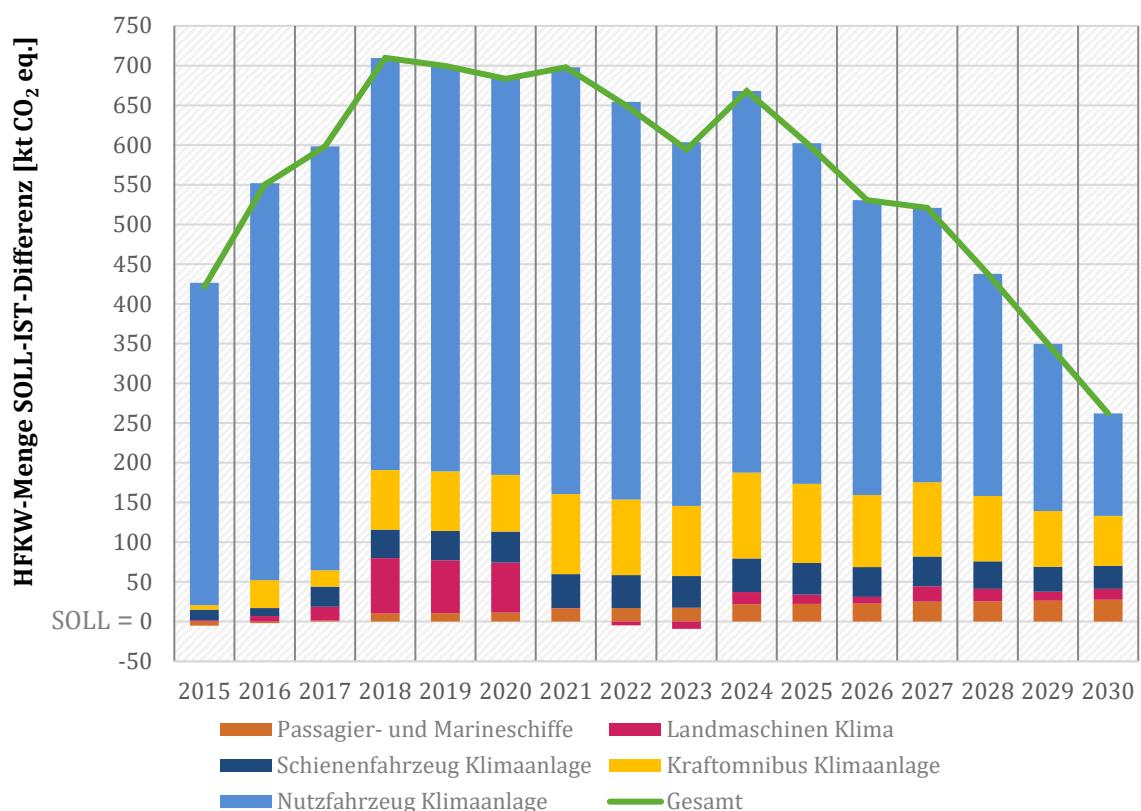


4.3.7 Mobile Klimatisierung – Sonstige

Die hier betrachtete Klimatisierung in Nutzfahrzeugen, Bussen, Schienenfahrzeugen, Landmaschinen und Schiffen fasst die wichtigsten Bereiche der mobilen Klimatisierung außerhalb des PKW-Bereiches zusammen.

In allen Bereichen liegen die HFKW-Verwendungsmengen im IST-Szenario weit über den im SOLL-Szenario dem Sektor zugerechneten Mengen. Grund hierfür sind vor allem die fehlenden Alternativen für Kältemittel mit hohem GWP. Trotz der Annahme, dass der Bedarf an metrischen Tonnen in einigen Bereichen (Busse, Schienenfahrzeuge, Landmaschinen, Schiffe) zukünftig konstant bleibt oder gar geringere Mengen als in den Jahren 2015 bis 2017 benötigt werden (Nutzfahrzeuge), scheint es in diesen Anwendungen nicht möglich zu sein, die Reduktions-schritte des HFKW-Phase-down zu erfüllen.

Abbildung 18: Darstellung der Abweichung der HFKW-Verwendungsmengen zwischen SOLL- und IST-Szenario in der mobilen Klimatisierung (ohne Pkw) (in kt CO₂ eq.)



Diskussionsbedarf

Der im vorangegangenen Kapitel beschriebene Sachverhalt wiegt umso gewichtiger, da trotz aktuell teilweise noch fehlender technischer Umsetzbarkeit (z. Bsp. R744 im Schienenverkehr), die Durchsetzung von Niedrig-GWP-Kältemitteln für die Jahre nach 2025 bei Neuanlagen angenommen wurden, wie in Kapitel 3.3.1) dargelegt. Diese Annahme basiert auf Marktrecherchen, Erfahrungen und Expertenwissen hinsichtlich technischer Machbarkeit, Genehmigungsprozessen und Ähnlichem. An dieser Stelle ist die zeitliche Verzögerung der Reduktion der CO₂-Äquivalente nicht zu unterschätzen, da der Austausch der Anlagen bei einer Lebensdauer von 25 Jahren

den Ersatz des Bestandes verzögert und keine Drop-in-Lösungen für das aktuell hauptsächlich verwendete R134a verfügbar sind.

Für die Klimatisierung von Bussen wurde aufgrund der Brennbarkeit von R1234yf und den großen Füllmengen dieses Kältemittel nicht als Alternative gesehen. Vielmehr wird davon ausgegangen, dass bis 2030 der Großteil (70 %) der Neuanlagen mit R744 betrieben werden (siehe Kapitel 3.3.1.4). Dies wurde im Zusammenhang mit der Verbreitung der Elektroantriebe bei Bussen gesehen. Für die noch mit Verbrennungsmotoren betriebenen Reisebusse (aufgrund der Reichweite) wurde die Verwendung von R513A angenommen. Zu berücksichtigen ist hier die späte Einführung der Alternativen (R744 im Jahre 2015 nur 5 %) und die dementsprechend erst zeitverzögert sinkenden CO₂-Äquivalente.

Bei der Klimatisierung von Nutzfahrzeugen wird von einer umfassenden Umstellung auf R1234yf ausgegangen (90 % im Jahre 2030). Aufgrund des (aktuell) hohen Preises von R1234yf und etwaiger Engpässe bei der Verfügbarkeit (da in Konkurrenz zur Automobilklimatisierung) setzt dieser Umstieg gemäß den Experten auch erst spät ein und liegt 2020 bei 15 % (Kapitel 3.3.1.2). Die Alternative mit R744 macht 2020 erst 5 % bei den Neuanlagen aus und R134a ist noch zu 80 % vertreten. Grund für den hohen Anteil von R134a ist hier der Mangel an verfügbaren Alternativen.

Zur Klimatisierung von Landmaschinen wird der Ersatz von R134a zu 100 % mit R1234yf bis 2021 angenommen, ungeachtet des hohen R1234yf-Preises, da es hier aktuell keine geeignete Alternative gibt.

Auch für Schienenfahrzeuge ist dringender Handlungsbedarf in der Umstellung auf Niedrig-GWP-Alternativen geboten. Zwar werden Tests mit R744 und R729 (Luft) durchgeführt, allerdings ist nicht vor 2022 mit einer Marktreife der Alternativen zu rechnen. In diesem Anwendungsbereich tragen zudem sowohl die lange Lebensdauer (25 Jahre) als auch lange Entwicklungszyklen dazu bei, dass die Reduktion der HFKW-Mengen durch neu eingeführte Niedrig-GWP-Kältemittel erst stark zeitverzögert sichtbar wird.

Bei der Klimatisierung von Schiffen wird aktuell keine Alternative zu R134a gesehen.

5 Schlussfolgerungen

In einigen Sektoren werden bereits in großem Umfang nachhaltige und langfristig verfügbare Kältemittel eingesetzt, vor allem R717 in der Industriekälte und R744 in Zentralanlagen, besonders in der Supermarktkälte. In anderen Sektoren wird derzeit eine Vielzahl an Kältemitteln eingeführt, wobei die Treibhauspotenziale dieser Kältemittel, meist Gemische aus gesättigten und ungesättigten HFKW, oft noch zu hoch sind, um unter dem HFKW-Phase-down über die nächsten fünf bis zehn Jahre hinaus in ausreichenden Mengen verfügbar zu sein. Diese Situation ist zurzeit zum Beispiel bei den Flüssigkeitskühlsätzen gegeben.

In anderen Sektoren werden langfristige Alternativen zu den herkömmlichen HFKW derzeit nur zögerlich in den Markt eingeführt, wobei Sicherheitsaspekte sowie die mangelnde Verfügbarkeit von Kältemitteln mit niedrigem GWP und Komponenten oft eine Rolle spielen. Auch stellt der Mangel an Standards und Normen zum Einsatz von brennbaren und/oder toxischen Kältemitteln ein Hemmnis bei der Einführung von manchen Alternativen zu HFKW dar.

Dies ist in folgenden Sektoren der Fall:

- Mobile Klimatisierung
 - Nutzfahrzeuge
 - Busse
 - Landmaschinen, Baumaschinen
 - Schienenfahrzeuge
 - Schiffe
- Mobile Kälte
 - Kühlfahrzeuge
 - Kühlcontainer
- Stationäre Klimatisierung
 - Single-Split-Geräte
 - Multi-Split- und VRF-Anlagen

Die im Rahmen dieses Gutachtens befragten Industrievertreter und anderen Fachexperten betonten den immer noch bestehenden Nachholbedarf an Information und Aufklärung hinsichtlich der Implikationen des HFKW-Phase-down auf die Kälte-Klima-Branche, vor allem in Nischenanwendungen. Auch der Bedarf an Forschung und technischen Weiterentwicklungen sowie aktualisierten Standards und Normen wurde hervorgehoben.

Der Vergleich von IST- und SOLL-Szenario zeigt, dass die tatsächlichen Verwendungsmengen in den hier betrachteten Anwendungen der Kälte und Klimatisierung ab 2018 höher liegen als im IST-Szenario modelliert: Die in verschiedenen Sektoren auftretenden starken Reduktionsschritte von 2017 (das letzte Jahr der berichteten Daten) auf 2018 (das erste Jahr der Modellierung) deuten darauf hin. Konkret geht es um folgende Sektoren:

- Gewerbekälte
- Steckerfertige Geräte
- Verflüssigungssätze
- Flüssigkeitskühlsätze (außer Turboverdichter)
- Wärmepumpen (Heizung)

- Single-Split-Klimageräte
- PKW
- Kühlcontainer

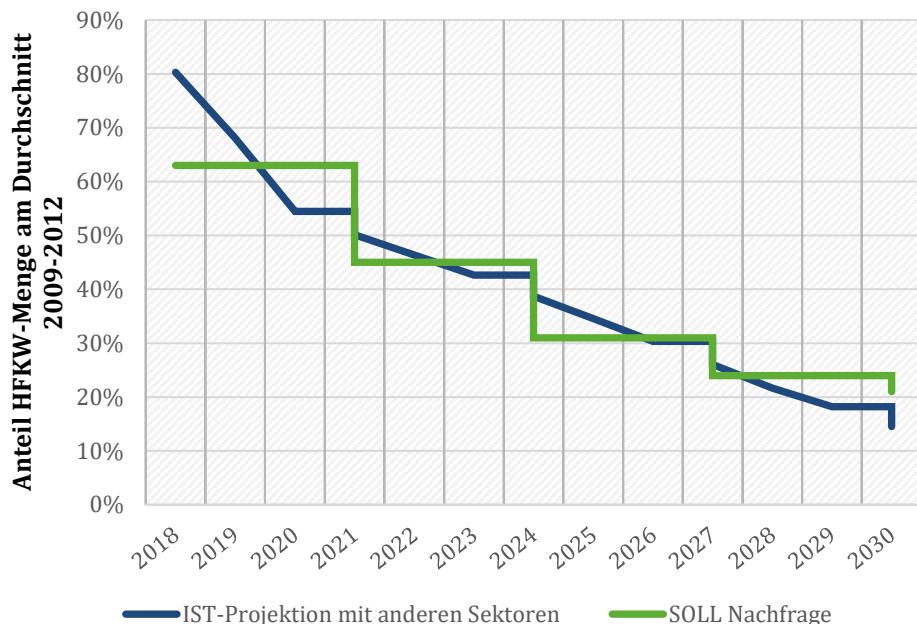
Betrachtet man die gesamten zu erwartenden HFKW-Verwendungsmengen in Deutschland in den Jahren bis 2030, müssen auch die in dem vorliegenden Vorhaben nicht betrachteten Sektoren mitgerechnet werden. Gemeint sind hier vor allem Treibmittel in Schäumen und Aerosolen sowie Feuerlöschmittel und weitere Nischenanwendungen von HFKW, die im Referenzzeitraum zusammen ca. 8% der Verwendungsmengen ausmachten. Wir schätzen konservativ, dass der Anteil der Sektoren an der Gesamtmenge im SOLL-Szenario gleichbleibt, und addieren daher 8% als Annäherung an die zu erwartenden Verwendungsmengen für diese Anwendungen ab 2018.

Tabelle 23 zeigt die Jahre, in denen die nach dem SOLL-Szenario modellierten Verwendungsmengen in Deutschland nach dem EU-HFKW-Phase-down überschritten werden. Die Prozentangaben beziehen sich immer auf die Baseline der Jahre 2009 – 2012, deren Durchschnittswert 100% bildet. Vor allem der nächste Reduktionsschritt zum Jahr 2021 wäre demnach mit einer starken Überschreitung verbunden. Gemäß den getroffenen Annahmen würde Deutschland zunächst jeweils im letzten Jahr eines Reduktionsschrittes und in den Jahren 2028 – 2030 die Reduktionsschritte des EU-HFKW-Phase-down erfüllen. Dementsprechend kommt es zu einer Nichterfüllung des Reduktionsschemas in etwas mehr als der Hälfte der Jahre bis 2030 (7 von 13).

Tabelle 23: Darstellung der zu erwartenden HFKW-Verwendungsmengen in Deutschland über alle Sektoren mit prozentualem Aufschlag gemäß Baseline für die in diesem Vorhaben nicht modellierten Sektoren 2018 - 2030

	2018	2019	2020	2021	2022	2023
SOLL-Szenario	63%	63%	63%	45%	45%	45%
IST-Szenario inklusive „Nicht Kälte- & Klimasektoren“	82%	70%	56%	51%	48%	44%
	2024	2025	2026	2027	2028	2029
SOLL-Szenario	31%	31%	31%	24%	24%	24%
IST-Szenario inklusive „Nicht Kälte- & Klimasektoren“	40%	35%	31%	27%	22%	19%
						15%
						2030

Abbildung 19: Zu erwartende HFKW-Verwendungsmengen in Deutschland über alle Sektoren mit prozentualem Aufschlag gemäß Baseline für die in diesem Vorhaben nicht modellierten Sektoren 2018 - 2030



Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Umsetzung des EU HFKW-Phase-down in Deutschland verzögert erfolgt und nicht mit dem vorgegebenen Reduktionsschema einhergehen wird, sofern keine weiteren Anstrengungen unternommen werden, um die Marktdurchdringung von Alternativen mit niedrigen Treibhauspotenzialen zu verstärken.

6 Quellenverzeichnis

BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2018): Elektromobilität in Deutschland.

<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/elektromobilitaet.html> (22.01.2019)

EEA - European Environment Agency [Hrsg] (2018): Fluorinated greenhouse gases 2018. Data reported by companies on the production, import, export and destruction of fluorinated greenhouse gases in the European Union, 2007-2017. EEA Report No 21/2018, Publications Office of the European Union, Luxemburg, S. 54

Europäische Kommission (2006): RICHTLINIE 2006/40/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 17. Mai 2006 über Emissionen aus Klimaanlagen in Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG des Rates. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX%3A32006L0040&from=de> (17.12.2018)

Europäische Kommission (2014): Verordnung (EU) Nr. 517/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517&from=EN> (17.12.2018)

Gschrey, B.; Schwarz, W.; Kimmel, T.; Zeiger, B.; Jörß, W.; Schumacher, K.; Cludius, J. (2015): Maßnahmen zur Verbesserung der Marktdurchdringung klimafreundlicher Technologien ohne halogenierte Stoffe vor dem Hintergrund der Revision der Verordnung (EG) Nr. 842/2006.

Martens, K. (2018): HFKW-Verbrauch in Deutschland. Informationsveranstaltung zur F-Gas-Verordnung, Umweltbundesamt Dessau, 02.02.2018, Dessau

Nationale Plattform Elektromobilität (2018): Erfahren Sie mehr über Motivation und Ziele. Was ist die Vision für die Zukunft? Aus welchen Bausteinen besteht das System Elektromobilität? <http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/hintergrund/die-ziele/> (27.11.2018)

Schwarz, W.; Gschrey, B.; Leisewitz, A.; Herold, A.; Gores, S.; Papst, I.; Usinger, J.; Oppelt, D.; Croiset, I.; Pedersen, P.H.; Colbourne, D.; Kauffeld, M.; Kaar, K.; Lindborg, A. (2011): Preparatory study for a review of Regulation (EC) No. 842/2006 on certain fluorinated greenhouse gases. Im Auftrag der EU Kommission (DG CLIMA).

Umweltbundesamt [Hrsg.] (2018): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2018. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2016. Climate Change 12/2018, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

WMO - World Meteorological Organization (2014): Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 55, Genf, S. 416 ff.

WMO - World Meteorological Organization (2010): Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 52, Genf, Schweiz

IPCC – International Panel on Climate Change (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, S. 996 ff.

A Hintergrundinformationen nach Anwendungssektoren

A.1 Gewerbekälte

Frederico Bisco: Kältemittel mit niedrigem Treibhauspotenzial, Es gibt sehr viel zu tun; Die Kälte und Klimatechnik, KK 10/2018, Oktober 2018, 71. Jahrgang, Gentner Verlag, S. 40-43.

- R448A (26 % R32 / 26 % R125 / 21 % R134a / 20 % R1234yf / 7 % R1234ze; GWP 1387; A1) und R449A (24.3 % R32 / 24.7 % R125 / 25.7 % R134a / 25.3 % R1234yf; GWP 1397; A1):

Cooling Post (2016): Mexichem to distribute Honeywell's R445A in the EU.

<https://www.coolingpost.com/world-news/mexichem-to-distribute-honeywells-r448a-in-the-eu/> (07.06.2019)

Cooling Post (2017): Tesco to convert 1200 stores to R448A. <https://www.coolingpost.com/world-news/tesco-to-convert-1200-stores-to-r448a/> (07.06.2019)

Cooling Post (2017): Dorin approves more refrigerants. <https://www.coolingpost.com/world-news/dorin-approves-more-refrigerants/> (07.06.2019)

Cooling Post (2016): Harp announces availability of R449A. <https://www.coolingpost.com/uk-news/harp-announces-availability-of-r449a/> (07.06.2019)

- R407A (20 % R32 / 40 % R125 / 40 % R134a; GWP 2107; A1) und R407F (30 % R32 / 30 % R125 / 40 % R134a; GWP 1825; A1)

Danfoss (o.D.): R407A/F: Low-GWP alternative to R404A in commercial refrigeration systems.

<https://www.danfoss.com/en/about-danfoss/our-businesses/cooling/refrigerants-and-energy-efficiency/refrigerants-for-lowering-the-gwp/r407af/> (07.06.2019)

- R452A (11 % R32 / 59 % R125 / 30 % R1234yf; GWP 2140; A1):

Cooling Post (2015): Tecumseh backs R452A as R404A alternative. <https://www.coolingpost.com/world-news/tecumseh-backs-r452a-as-r404a-alternative/> (07.06.2019)

- R454A (35 % R32 / 65 % R1234yf; GWP 239; A2L):

Grupp, R. (2018): Das Kältemittel R454A. https://www.cci-dialog.de/wissensportal/technikwissen/kaeltetechnik/das_kaeltemittel_r454a.html (07.06.2019)

Cooling Post (2018): Dawsongroup selects Opteon XL40. <https://www.coolingpost.com/features/dawsongroup-selects-opteon-xl40/> (07.06.2019)

Cooling Post (2016): Chemours offers new low GWP blends. <https://www.coolingpost.com/world-news/chemours-offers-new-low-gwp-blends/> (07.06.2019)

- R454C (21.5 % R32 / 78.5 % R1234yf; GWP 148; A2L):

Cooling Post (2016): Chemours offers new low GWP blends. <https://www.coolingpost.com/world-news/chemours-offers-new-low-gwp-blends/> (07.06.2019)

Cooling Post (2016): R454C brings a chill o R404A cabinet. <https://www.coolingpost.com/world-news/r454c-brings-a-chill-to-r404a-cabinet/> (07.06.2019)

- R455A (21.5 % R32 / 75.5 % R1234yf / 3 % CO2; GWP 148; A2L)

Cooling Post (2016): Honeywell releases low GWP R404A option. <https://www.coolingpost.com/world-news/honeywell-releases-low-gwp-r404a-option/> (07.06.2019)

De Bernardi, J. (2018): Solstice L40X (R455A) Brief. https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/wp-content/uploads/2018/12/Chillventa-2018_Honeywell_Solstice-L40X-R455A-Brief.pdf (07.06.2019)

- R513A (44 % R134a / 56 % R1234yf; GWP 631; A1):

Cooling Post (2017): Embraco sees R513A as R134a transitional. <https://www.coolingpost.com/world-news/embraco-sees-r513a-as-r134a-transitional/> (07.06.2019)

Steckerfertige Geräte:

Hanslik, F.; Suess, J.; Köhler, J.: Wassergekühlte Kühlmöbel kombiniert mit einer R718-Kompressionskälteanlage; KI Kälte-, Luft-, Klimatechnik No 1-2/2019, pp.42; Huethig Verlag.

- R290 (Propan; GWP 3; A3):

McLaughlin, C. (2016): AHT has installed 70,000 R290 cabinets in France.

http://hydrocarbons21.com/articles/7156/aht_has_installed_70_000_r290_cabinets_in_france (07.06.2019)

Cooling Post (2017): Tecumseh to offer full line of R449A units. <https://www.coolingpost.com/world-news/tecumseh-to-offer-full-line-of-r449a-units/> (07.06.2019)

Carrier (o.D.): Commercial Refrigeration – Products. <https://www.carrier.com/commercial-refrigeration/en/cz/products/> (07.06.2019)

Liebherr (2017): Commercial Food Service Refrigerators and Freezers.

<https://home.liebherr.com/media/hau/brochures/ncsa/commercial-appliances-usa/pdf/liebherr-commercial-food-service-refrigerators-and-freezers.pdf> (07.06.2019)

Cooling Post (2015): Eco-Cool displays high efficiency. <https://www.coolingpost.com/products/eco-cool-displays-high-efficiency/> (07.06.2019)

- R452A (11 % R32 / 59 % R125 / 30 % R1234yf; GWP 2140; A1):

Juka (o.D.): Refrigerated cabinets. <http://juka.com.pl/en/products/refrigerated-cabinets/228-vienna-z> (07.06.2019)

Bisco, F. (o.D.): Sanhua accepts the challenge of new low-GWP refrigerants.

<https://www.zjshc.com/static/uploads/files/news/sanhua-accepts-the-challenge-of-new-low-gwp-refrigerants-pdf-1542291379.pdf> (07.06.2019)

Verflüssigungssätze:

- R452A (11 % R32 / 59 % R125 / 30 % R1234yf; GWP 2140; A1):

Cooling Post (2015): Tecumseh backs R454A as R404A alternative. <https://www.coolingpost.com/world-news/tecumseh-backs-r452a-as-r404a-alternative/> (07.06.2019)

Cooling Post (2017): Fischer adds R452A units. <https://www.coolingpost.com/world-news/fischer-adds-r452a-units/> (07.06.2019)

Cooling Post (2016): Danfoss plans for new low GWP alternatives. <https://www.coolingpost.com/world-news/danfoss-plans-for-new-low-gwp-alternatives/> (07.06.2019)

- R448A (26 % R32 / 26 % R125 / 21 % R134a / 20 % R1234yf / 7 % R1234ze; GWP 1387; A1) und R449A (24.3 % R32 / 24.7 % R125 / 25.7 % R134a / 25.3 % R1234yf; GWP 1397; A1)

Cooling Post (2016): Danfoss plans for new low GWP alternatives. <https://www.coolingpost.com/world-news/danfoss-plans-for-new-low-gwp-alternatives/> (07.06.2019)

Cooling Post (2017): Marstair MRC+ cleared for R448A/R449A. <https://www.coolingpost.com/uk-news/marstair-mrc-cleared-for-r448ar449a/> (07.06.2019)

- R513A (44 % R134a / 56 % R1234yf; GWP 631; A1)

Cooling Post (2017): Embraco sees R513A as R134a transitional. <https://www.coolingpost.com/world-news/embraco-sees-r513a-as-r134a-transitional/> (07.06.2019)

- R744 (CO₂; GWP 1; A1)

Carrier (o.D.): MICROCO₂OL. <https://www.carrier.com/commercial-refrigeration/en/eu/products/systems/microco2ol/> (07.06.2019)

Cooling Post (2018): Panasonic launches 15kW CO₂ unit. <https://www.coolingpost.com/products/panasonic-launches-15kw-co2-unit/> (07.06.2019)

Cooling Post (2018): Latest CO₂ condensing unit in UK. <https://www.coolingpost.com/products/latest-co2-condensing-unit-uk/> (07.06.2019)

Cooling Post (2017): MHI launches 20hp CO₂ condensing unit. <https://www.coolingpost.com/products/mhi-launches-20hp-co2-condensing-unit/> (07.06.2019)

- R290 (Propan; GWP 3; A3)

Cooling Post (2017): Emerson US launches R290 condensing units.

<https://www.coolingpost.com/products/emerson-us-launches-r290-condensing-units/> (07.06.2019)

Verbundanlagen:

- R448A (26 % R32 / 26 % R125 / 21 % R134a / 20 % R1234yf / 7 % R1234ze; GWP 1387; A1) und R449A (24.3 % R32 / 24.7 % R125 / 25.7 % R134a / 25.3 % R1234yf; GWP 1397; A1) (Umrüstung)

Cooling Post (2017): Tesco to convert 1200 stores to R448A. <https://www.coolingpost.com/world-news/tesco-to-convert-1200-stores-to-r448a/> (07.06.2019)

Cooling Post (2016): Romanian retailer opts for R448A as drop-in.

<https://www.coolingpost.com/features/romanian-retailer-opts-for-r448a-as-drop-in/> (am 07.06.2019)

Cooling Post (2016): R449A retrofit brings 8% energy savings. <https://www.coolingpost.com/world-news/r449a-retrofit-brings-8-energy-savings/> (07.06.2019)

- R455A (21.5 % R32 / 75.5 % R1234yf / 3 % CO₂; GWP 148; A2L)

"R455A als Umweltfreundliches Kältemittel in der Gewerbekälte, Hybridsystem für einen Discounter"; Die Kälte und Klimatechnik, KK 3/2018, März 2018, 71. Jahrgang, Gentner Verlag, S. 18-19.

- R513A (44 % R134a / 56 % R1234yf; GWP 631; A1) (Umrüstung)

Cooling Post (2016) Aldi opts for R513A in Spanish store. <https://www.coolingpost.com/features/aldi-opts-for-r513a-in-spanish-store/> (07.06.2019)

A.2 Industriekälte

- R1234ze (GWP 7; A2L)

Daikin (2018): Daikin's new chiller ranges with R-1234ze(E) refrigerant. https://www.daikin-ce.com/en_us/press-releases/2018/new_chiller_ranges_R-1234ze.html (07.06.2019)

Stulz (2018): Kaltwassersatz mit R-1234ze Kältemittel im Leistungsbereich von 300 – 1000 kW ab sofort verfügbar. <https://www.stulz.de/de/newsroom/pressemitteilung/stulz-stellt-cybercool-2-ze-chiller-als-low-gwp-variante-vor-1685/> (07.06.2019)

CTA (2017): Besser fürs Klima – Kältemaschinen mit zukunftsweisenden HFO-Kältemitteln.

<https://www.cta.ch/file/file/Downloadbereich/DE/K%C3%A4lte/Verkaufsdokumente/Brosch%C3%BCren/HFO-Maschinen-der-CTA.pdf> (07.06.2019)

- R1233zd (GWP 4,5; A1)

Cooling Post (2016): HFO chillers to cool the Channel Tunnel. <https://www.coolingpost.com/world-news/hfo-chillers-to-cool-the-channel-tunnel/> (07.06.2019)

- R290 (Propan; GWP 3; A3)

Herunter, J.; Dujardin, K. (2017): Water- and Air Cooled Chiller with Propane R-290.

http://www.eurammon.com/sites/default/files/attachments/09_eurammon_symposium_2017_herunter_dujardin_f3.pdf (07.06.2019)

Futron (o.D.): Kälteanlagen mit natürlichen Kältemitteln – Kältetechnik der Zukunft. <https://www.futron-gmbh.de/> (07.06.2019)

Euroklimat (o.D.): Product catalogue. <http://euroklimat.it/prodotti.php> (07.06.2019)

- R744 (CO₂; GWP 1; A1)

McLaughlin, C. (2018): CO₂, ammonia competition shaking up industrial refrigeration.

http://www.r744.com/articles/8692/co2_ammonia_competition_shaking_up_industrial_refrigeration (07.06.2019)

Sabroe (2018): Sabroe CAFP – CO₂/NH₃ low-temperature chiller. https://www.johnsoncontrols.com/fi_fi-/media/jci/be/finland/industrial-refrigeration/files/bts_catalogue_page_cafp_chiller_en_eu.pdf (07.06.2019)

Maratoum A.; Masson, N. (o.D.): Examples of NH₃/CO₂ secondary systems for cold store operators. http://www.shecco.com/files/news/guide_nh3-final.pdf (07.06.2019)

Germanus, J.; Feja, S.; Junk, M.; Hanzelmann, C. (ILK Dresden): R744A, ein (fast) unbekanntes Tieftemperaturkältemittel; KI Kälte-, Luft, Klimatechnik, No 10/2018, Hüthig Verlag.

A.3 Transportkälte

Kühlfahrzeuge:

- R452A (11 % R32 / 59 % R125 / 30 % R1234yf; GWP 2140; A1):

Cooling Post (2015): Carrier Transicold announces R452A option. <https://www.coolingpost.com/world-news/carrier-transicold-announces-r452a-option/> (07.06.2019)

Themo King (2015): Transportkälte mit R452A. https://www.kka-online.info/artikel/kka_Transportkaelte_mit_R452A_2471149.html (07.06.2019)

- R744 (CO₂; GWP 1; A1):

Cooling Post (2015): Carrier Transicold views a CO₂ future. <https://www.coolingpost.com/world-news/carrier-transicold-views-a-co2-future/> (07.06.2019)

Cooling Post (2017): Early success with CO₂ trailer. <https://www.coolingpost.com/world-news/early-success-with-co2-trailer/> (07.06.2019)

Kühlcontainer:

- R513A (44 % R134a / 56 % R1234yf; GWP 631; A1)

Cooling Post (2017): Hapag-Lloyd orders 1,000 R513A reefers. <https://www.coolingpost.com/features/hapag-lloyd-orders-1000-r513a-reefers/> (07.06.2019)

Cooling Post (2018): Hapag-Lloyd orders 8,600 R513A reefers. <https://www.coolingpost.com/features/maersk-orders-8600-r513a-ready-reefers/> (07.06.2019)

A.4 Stationäre Klimatisierung

Bisco, F.: Kältemittel mit niedrigem Treibhauspotenzial, Es gibt sehr viel zu tun; Die Kälte und Klimatechnik, KK 10/2018, Oktober 2018, 71. Jahrgang, Gentner Verlag, S. 40-43.

Frommann, A.: Trügerische Ruhe bei R410A-Umstellung, cci Zeitung 05/2018, 27.04.2018, 52. Jahrgang, S. 5-6.

- R452B (67 % R32 / 7 % R125 / 26 % R1234yf; GWP 676; A2L)

Cooling Post (2018): Honeywell launches A2L competitor to R32. <https://www.coolingpost.com/world-news/honeywell-launches-a2l-competitor-to-r32/> (07.06.2019)

Cooling Post (2016): Chemours R410A replacement to be R452B. <https://www.coolingpost.com/world-news/chemours-r410a-replacement-to-be-r452b/> (07.06.2019)

- R454B (67 % R32 / 7 % R125 / 26 % R1234yf; GWP 676; A2L)

<https://www.coolingpost.com/world-news/chemours-offers-new-low-gwp-blends/> (zuletzt aufgerufen am 07.06.2019)

- R466A (49 % R32 / 11.5 % R125 / 39.5 % CF3I (ODP 0,01 – 0,02); GWP 733; A1)

Cooling Post (2016): Chemours offers new low GWP blends. <https://www.coolingpost.com/world-news/secret-of-honeywells-new-refrigerant/> (07.06.2019)

Cooling Post (2019): Approved of R466A continues, says ASHRAE. <https://www.coolingpost.com/world-news/approval-of-r466a-continues-says-ashrae/> (07.06.2019)

Cooling Post (2018): R466A has close performance to R410A. <https://www.coolingpost.com/world-news/r466a-has-close-performance-to-r410a/> (07.06.2019)

Single-Split-Geräte:

- R32 (GWP 675; A2L)

Gelbke, A.: R32: Höhere Volumetrische Kälteleistung - Niedriger GWP, Mehr als eine Notlösung; Die Kälte und Klimatechnik, KK 11/2018, November 2018, 71. Jahrgang, Gentner Verlag, p. 36-37.

- R290 (Propan; GWP 3; A3) bislang nicht in Europa angeboten.

Multi-Split/VRF-Systeme:

- R32 (GWP 675; A2L)

Cooling Post (2019): R32 Hybrid wins sustainability award. <https://www.coolingpost.com/uk-news/r32-hybrid-wins-sustainability-award/> (07.06.2019)

Mitsubishi Electric (o.D.): The world's only Hybrid VRF system. <http://www.mitsubishi-electric.co.nz/citymulti/hvrf.aspx> (07.06.2019)

Haushaltswärmepumpen:

Frommann, A.: Deutsche WP-Marktpotentiale, cci Zeitung 11/2018, 05 October 2018, S. 17.

- R290 (Propan; GWP 3, A3)

Frauenhofer-Gesellschaft (2018): Umweltfreundlich und effizient.

<https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2018/September/propan-waermepumpe-umweltfreundlich-und-effizient.html> (07.06.2019)

Wolf (2019): Luft/Wasser-Wärmepumpen Monoblock.

https://www.wolf.eu/fileadmin/Wolf_Daten/Dokumente/Technische_Dokus/Heating/4801289_201904_Waermeppumpe_CHA-Monoblock_und_Waermepumpcenter_CHC-Monoblock.pdf (07.06.2019)

- R32 (GWP 675, A2L)

Cooling Post (2018): Daikin first R32 domestic heat pump. <https://www.coolingpost.com/world-news/daikin-first-r32-domestic-heat-pump/> (07.06.2019)

LG Business Solution (o.D.): THERMA V R32 Monoblock.

<https://www.lg.com/de/business/klimaanlagen/heizung/monobloc> (07.06.2019)

Cooling Post (2019): Panasonic to launch R32 Aquarea heat pump.

<https://www.coolingpost.com/products/panasonic-to-launch-r32-aquarea-heat-pump/> (07.06.2019)

ACR Journal (2018): Grant has launched a 12 kW model of its Aerona air source heat pump using R32 refrigerant. <http://www.acrjournal.uk/heat-pumps/grant-launches-r32-heat-pump> (07.06.2019)

- R513A (44 % R134a / 56 % R1234yf; GWP 631; A1):

Der Hersteller Ochsner kündigte für März 2019 sein Model "Ochsner Air Hawk" (2-8 kW) mit R513A als Kältemittel an.

- R454C (21.5 % R32 / 78.5 % R1234yf; GWP 148; A2L)

Cooling Post (2018): MHI develops heat pump for R454C: <https://www.coolingpost.com/world-news/mhi-develops-heat-pump-r454c/> (07.06.2019)

Tecalor (2019): Zukunftssicheres Kältemittel in neuen Wärmepumpen.

<https://www.tecalor.de/de/unternehmen/presse-aktuelles/pressemeldungen/2018-11235.html> (07.06.2019)

A.5 Mobile Klimatisierung – Pkw:

- R1234yf (GWP 4; A2L)

Umweltbundesamt (2017): Autoklimaanlagen mit fluorierten Kältemitteln.

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/fluorierte-treibhausgase-fckw/anwendungsbereiche-emissionsminderung/autoklimaanlagen-fluorierten-kaeltemitteln#textpart-1> (07.06.2019)

- R744 (CO₂; GWP 1; A1)

Wille, J. (2018): Schub für CO₂-Klimaanlagen. <https://www.fr.de/wirtschaft/schub-co2-klimaanlagen-10958759.html> (07.06.2019)

A.6 Flüssigkeitskühlsätze

- R290 (Propan; GWP 3; A3), R1270

Cooltherm (o.D.): Propane (R290) Chillers. <https://www.cooltherm.co.uk/propane-chillers> (07.06.2019)

Cooling Post (2018): Tecumseh launches propane mini-chiller.

<https://www.coolingpost.com/products/tecumseh-launches-propane-mini-chiller/> (07.06.2019)

Cooling Post (2018): Green Cooling adds hydrocarbon chillers. <https://www.coolingpost.com/uk-news/green-cooling-adds-hydrocarbon-chillers/> (07.06.2019)

Secon (o.D.): Flüssigkeitskühler mit R290. https://secon-gmbh.com/assets/uploads/dateien/downloads/03_16-09_R290_Fl%C3%BCssigkeitsk%C3%BChler.pdf (07.06.2019)

- R717 (Ammoniak; NH₃; GWP 0; B2L)

Cooling Post (2018): Semi-hermetic NH₂ screw compressor. <https://www.coolingpost.com/products/semi-hermetic-nh3-screw-compressor/> (07.06.2019)

Secon (o.D.): NH₃ chiller. <https://secon-gmbh.com/kaltwassersaetze/nh3-chiller.html> (07.06.2019)

Secon (o.D.): Aquachill (R717). [https://secon-gmbh.com/kaltwassersaetze/aquachill-\(r717\).html](https://secon-gmbh.com/kaltwassersaetze/aquachill-(r717).html) (07.06.2019)

Frigopol (o.D.): Air-cooled and water-cooled chillers with natural refrigerants. <http://www.frigopol.com/en/air-cooled-and-water-cooled-chillers-with-natural-refrigerants/> (07.06.2019)

- R32 (GWP 675; A2L)

<https://www.coolingpost.com/products/daikin-first-with-r32-chiller/> (80-700 kW); (zuletzt aufgerufen am 07.06.2019)

Cooling Post (o.D.): Search result for: R32 chiller. <https://www.coolingpost.com/?s=R32+chiller> (07.06.2019)

- R513A (44 % R134a / 56 % R1234yf; GWP 631; A1)

Cooling Post (2018): Engie's Quantum chillers now on R513A. <https://www.coolingpost.com/world-news/engies-quantum-chillers-now-r513a/> (07.06.2019)

Cooling Post (2019): Engie set to launch redesigned Quantum chiller.

<https://www.coolingpost.com/products/engie-set-to-launch-redesigned-quantum-chiller/> (07.06.2019)

Cooling Post (2018): Carrier chillers are R513A compatible. <https://www.coolingpost.com/world-news/carrier-chillers-r513a-compatible/> (07.06.2019)

Cooling Post (2018): Trane's new chiller for R513A. <https://www.coolingpost.com/products/tranes-new-chiller-r513a/> (07.06.2019)

<https://www.coolingpost.com/world-news/york-chillers-compatible-with-r513a/> (zuletzt aufgerufen am 07.06.2019)

- R1234ze (GWP 7; A2L)

Cooling Post (2019): Trane adds smaller XStream 1234ze chillers.

<https://www.coolingpost.com/products/trane-adds-smaller-xstream-1234ze-chillers/> (07.06.2019)

Cooling Post (2019): Engie set to launch redesigned Quantum chiller.

<https://www.coolingpost.com/products/engie-set-to-launch-redesigned-quantum-chiller/> (07.06.2019)

Frigopol (o.D.): Air-cooled and water-cooled chillers with natural refrigerants. <http://www.frigopol.com/en/air-cooled-and-water-cooled-chillers-with-natural-refrigerants/> (07.06.2019)

- R1233zd (GWP 4.5; A1)

Cooling Post (2017): German agency seeks ban on R1233zd. <https://www.coolingpost.com/world-news/german-agency-seeks-ban-on-r1233zd/> (07.06.2019)

Miyoshi, N.; Suemitsu, R.; Togano, Y.; Kanki, Y.; Hasegawa, Y. (2016): Centrifugal chiller HFO-1233zd(E). http://conf.montreal-protocol.org/meeting/oewg/oewg-39/presession/Japan_submissions/JRAIA-Symposium2016_0804_centrifugal_chiller_E.pdf (07.06.2019)

Cooling Post (2014): Trane first with 1233zd chiller. <https://www.coolingpost.com/world-news/trane-first-with-1233zd-chiller/> (07.06.2019)

Cooling Post (2018): Tunnel vision proves R1233zd efficiency. <https://www.coolingpost.com/features/tunnel-vision-proves-r1233zd-efficiency/> (07.06.2019)

Cooling Post (2017): Carrier launches R1233zd(E) chiller. <https://www.coolingpost.com/world-news/carrier-launches-r1233zde-chiller/> (07.06.2019)

Cooling Post (2015): MHI announces 1233zd(E) chiller. <https://www.coolingpost.com/world-news/mhi-announces-1233zde-chiller/> (07.06.2019)

- R452B (67 % R32 / 7 % R125 / 26 % R1234yf; GWP 676; A2L)

Cooling Post (2019): R452B offered on Clint chillers. <https://www.coolingpost.com/products/r452b-offered-on-clint-chillers/> (07.06.2019)

Grupp, R. (2019): R452B auf dem Vormarsch. https://www.cci-dialog.de/branchenticker/2019/kw13/02/luekk_r452b_auf_dem_vormarsch_cci_branchenticker.html?backLink=/branchenticker/?date=26.03.2019 (07.06.2019)

- R718 (Wasser; GWP 0)

Efficient Energy (2018): The eChiller product range – chilled water units with the safety refrigerant Water (R718) and simple plug'n'play integration. <https://www.datacentreworld.de/press-releases/the-echiller-product-range-chilled-water-units-with-the-safety-refrigerant-water-r718-and-simple-plug-n-play-integration> (07.06.2019)

Süß, J. (2017): A novel air conditioning system with pure water as the refrigerant.

http://ccacoalition.org/sites/default/files/2017_technology-airconditioning-workshop_SessionIII_Suess.pdf (07.06.2019)

Kawasaki (o.D.): Water-Refrigerant Centrifugal Chiller –MiZTURBO-.
<https://global.kawasaki.com/en/energy/equipment/mizutorbo/index.html> (07.06.2019)

A.7 Mobile Klimatisierung – Sonstige

- R744 (CO₂; GWP 1; A1):

Huth, P.; Maier, U. (2015): Nachhaltige Klimatisierung bei Bussen. <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-30576.pdf> (07.06.2019)

Konvekta (o.D.): Klimatisiert mit dem Kältemittel CO₂ (R-744) – ein erster Schritt in eine saubere Zukunft.
<https://www.konvekta.de/produkte/busklima/forschung-projekte/kaeltemittel-co2.html> (07.06.2019)

Konvekta (o.D.): CO₂ Wärmepumpe für Elektrobusse. http://www.eliptic-project.eu/sites/default/files/07_20171205_ELIPTIC_Bremen_Konvekta-CO2%20W%C3%A4rmepumpe-Stefan%20Faust.pdf (07.06.2019)

Siemens Mobility GmbH (2018) Erster Mireo-Zug für das Rheintal vorgestellt.
[https://www.siemens.com/press/de/pressemitteilungen/2018/mobility/pr2018120096mode.htm?content\[\]=%20MO](https://www.siemens.com/press/de/pressemitteilungen/2018/mobility/pr2018120096mode.htm?content[]=%20MO) (07.06.2019)

- Kaltluft

Umweltbundesamt (2018): Neue Bahn-Klimaanlagen mit Kaltluft im Praxistest.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/neue-bahn-klimaanlagen-kaltluft-im-praxistest> (07.06.2019)

Liebherr (2018): Luftgestützte, umweltfreundliche Bahn-Klimaanlage von Liebherr in Felddatenanalyse erfolgreich. <https://www.liebherr.com/de/deu/aktuelles/news-pressemitteilungen/detail/luftgest%C3%BCtzte-umweltfreundliche-bahn-klimaanlage-von-liebherr-in-felddatenanalyse-erfolgreich.html> (07.06.2019)

B Annahmen für die Berechnung

B.1 Annahmen zum Sektorwachstum im IST-Szenario 2018 - 2030

Um die CO₂-Äquivalente im jeweiligen Sektor berechnen zu können, sind Mengenangaben pro verwendetem Kältemittel notwendig. Für die Jahre bis einschließlich 2017 liegen Emissionsberichtsdaten vor, die entsprechend die Mengen beinhalten [Umweltbundesamt (2018)]. Für das in den jeweiligen Sektoren angenommene Wachstum ab 2018 wurden die Entwicklungen im jeweiligen Markt der zehn vorgelagerten Jahre herangezogen (2007 – 2017). Dieser Trend im Markt wurde dann entsprechend interpoliert für die Jahre 2018 – 2030. Das Wachstum bezieht sich hier immer auf die Kältemittelmenge im Sektor, unabhängig der Stückzahlen.

Beachtet werden muss an dieser Stelle, dass im Modell kältemittelspezifische Wachstumsfaktoren je Verwendungsbereich im Sektor angewendet wurden, um den spezifischen Entwicklungen im Markt und den unterschiedlichen GWP-Werten der Kältemittel Rechnung zu tragen. In der folgenden Tabelle wurde aufgrund von Übersichtlichkeit ein gewichteter Mittelwert pro Sektor gebildet.

Tabelle 24: Annahmen zu Wachstumsfaktoren für die Projektion von IST-HFKW-Verwendungsmengen für alle Sektoren bis zum Jahr 2030

Sektor	Wachstumsfaktor 2018 – 2030	Sektor	Wachstumsfaktor 2018 – 2030
Gewerbekälte	0,39	Stationäre Klimatisierung	1,49
Industriekälte	0,90	Flüssigkeitskühlsätze	1,10
Transportkälte	0,80	Mobile Klimatisierung – PKW	0,97
		Mobile Klimatisierung – Sonstige	1,09

Dabei entspricht ein Wachstumsfaktor von 0,39 einem negativen Wachstum: 2030 wird 61% weniger HFKW-Menge verwendet als 2015.

Bei den beiden Sektor-Bereichen Gewerbekälte-Zentralanlagen und mobile Klimatisierung-PKW wurden außerdem besondere Entwicklungen berücksichtigt. Die zahlreiche Umrüstung von R404A-Anlagen auf R449A/R448A führte zu einem Mehrverbrauch an diesen Kältemitteln bzw. einer anderen Verteilung der Mengen auf die Kältemittel in den Jahren 2018/2019. In der PKW-Klimatisierung schlägt sich mit dem Einsatz von R1234yf in Neufahrzeugen seit 2017 ein verringerter Verbrauch an R134a in dem Wachstumsfaktor < 1 nieder: Da R1234yf nicht Teil des HFKW-Phase-down ist, werden die Mengen für Neufahrzeuge hier nicht mitgerechnet.

B.2 Emissionsfaktoren pro Sektor

Tabelle 25: Darstellung der im Modell verwendeten Emissionsfaktoren gemäß NIR 2018 (Tabelle 198, S. 373)

	QG	Methode	Schadstoff		Lebensdauer [Jahre]	Herstellung Emissionsfaktor (dimensionslos)	Anwendung Emissionsfaktor (dimensionslos)	Entsorgung	
			HFKW	FKW				Restfüllstand (dimensionslos)	Rückgewinnungsrate (dimensionslos)
Kälte- und Klimaanlagen	2.F.1								
Gewerbekälte	2.F.1a								
- Steckerfertige Geräte		Tier 2a	HFKW		10 (D)	0,005 (D)	0,01 - 0,014 (D)	0,90 (CS)	0,326 - 0,52 (D)
- Verflüssigungssätze					12 (D)	0,01 (D)	0,057 - 0,097 (CS)	0,85 (D)	0,475 - 0,72 (D, CS)
- Zentralanlagen			FKW		10 - 14 (D)	0,01 (D)	0,094 - 0,195 (D)	0,875 (D)	0,429 - 0,771 (D, CS)
Haushaltskälte	2.F.1b	Tier 2a	HFKW		15 (D)	NO	0,003 (D)	0,955 (CS)	0,733 (CS)
Industriekälte	2.F.1c								
- Steckerfertige Geräte		Tier 2a	HFKW		10 (CS)	0,005 (D)	0,01 - 0,014 (CS)	0,9 (D)	0,337 - 0,52 (D)
- Großkälteanlagen				FKW	10 - 30 (CS, D)	0,01 (D)	0,053 - 0,088 (CS, D)	0,85 (D)	0,45 - 0,78 (D)
Transportkälte	2.F.1d								
- Kühlfahrzeuge		Tier 2a	HFKW	FKW	10 (CS)	5 g/Anlage (CS, D)	0,15 - 0,3 (D)	0,875 (CS)	0,657 (D)
- Kühlcontainer					14 (CS)	NO	0,1 (CS)	0,875 (CS)	0,657 (D)
Mobile Klimaanlagen	2.F.1e								
- Lkw		Tier 2a	HFKW		15 (D)	5 g/Anlage (CS, D)	0,15 (D)	0,34 (D)	0,38 - 0,447 (D)
- PKW					15 (D)	3 g/Anlage (CS, D)	0,1 (D)	0,34 (D)	0,38 - 0,447 (D)
- Busse					15 (D)	50 g/Anlage (D)	0,15 (D)	0,34 (D)	0,38 (D)
- Schiffe					25 (CS)	0,01 (CS)	0,1 - 0,3 (CS)	NO	NO
- Schienenfahrzeuge					25 (CS)	0,005 (D)	0,06 (CS)	NO	NO
- Landmaschinen					10 (CS)	5 g/Anlage (CS)	0,15 - 0,25 (CS)	0,34 (CS)	0,117 (CS)
- Flugzeuge					-	-	0,05 (CS)	NO	NO
Stationäre Klimaanlagen	2.F.1f								
- Großklimaanlagen		Tier 2a	HFKW		15 - 25 (D)	0,005 (D)	0,033 - 0,06 (D)	0,9 (D)	0,658 - 0,78 (D)
- Wärmepumpen					15 (D)	0,005 (D)	0,02 - 0,025 (D)	0,75 (D)	0,5 - 0,59 (D)
- Wärmepumpentrockner					15 (CS)	0,005 (CS)	0,003 (CS)	NO	NO
- mob. Raumklimageräte					10 (D)	NO	0,025 - 0,034 (D)	0,75 (D)	0,242 - 0,34 (D)
- Single-Split-Geräte					10 (D)	0,1 (CS)	0,05 - 0,069 (D)	0,875 (CS)	0,379 - 0,52 (D)
- Multi-Split-Geräte					13 (D)	0,01 (D)	0,049 - 0,079 (D)	0,875 (CS)	0,62 - 0,72 (D)
- VRF-Geräte					13 (D)	0,01 (D)	0,057 - 0,081 (D)	0,875 (CS)	0,72 (D)

C Berechnete Ergebnisse

C.1 Verbrauchstabellen nach Sektoren

Hier werden für die Jahre 2020, 2025 und 2030 die im IST-Szenario berechneten, voraussichtlich zu erwartenden, Verwendungsmengen nach Sektoren aufgeführt. Das SOLL-Szenario stellt dar, welche Mengen dem jeweiligen Sektor und Verwendungsbereich theoretisch zur Verfügung stehen.

Hierbei wurde die Annahme getroffen, dass die Sektoren und Verwendungsbereiche sich in ihrer Größe nicht verändern im Vergleich zum Referenzzeitraum 2009 – 2012. So konnte die in diesem Zeitraum im Durchschnitt verwendete Menge als Referenzgröße für die HFKW-Phase-down Schritte verwendet werden (analog der Vorgehensweise für Deutschland als Teil der EU). In Wirklichkeit gibt es keine Zuteilung zu einzelnen Sektoren oder Ländern innerhalb der EU.

C.1.1 Gewerbekälte

Tabelle 26: Darstellung der HFKW-Verwendungsmengen in der Gewerbekälte nach Verwendungsart im IST- und SOLL-Szenario (in kt CO₂ eq.)

Gewerbekälte (in Kilotonnen CO ₂ eq.)	2020	2025	2030
Zentralanlagen ohne Discounter			
SOLL-Szenario	2.159	1.062	720
IST-Szenario	2.210	1.159	228
Zentralanlagen Discounter			
SOLL-Szenario	280	138	93
IST-Szenario	112	43	7
Verflüssigungssätze			
SOLL-Szenario	384	189	128
IST-Szenario	295	190	85
Steckerfertige Geräte			
SOLL-Szenario	74	36	25
IST-Szenario	33	18	2
Gewerbe-Tieftemperatur			
SOLL-Szenario	46	22	15
IST-Szenario	42	38	37

C.1.2 Industriekälte

Tabelle 27: Darstellung der HFKW-Verwendungsmengen in der Industriekälte im IST- und SOLL-Szenario (in kt CO₂ eq.)

Verwendungsmengen Industriekälte (in Kilotonnen CO ₂ eq.)	2020	2025	2030
SOLL-Szenario	1.824	898	608
IST-Szenario	1.603	1.187	821

C.1.3 Transportkälte

Tabelle 28: Darstellung der HFKW-Verwendungsmengen in der Transportkälte im IST- und SOLL-Szenario (in kt CO₂ eq.)

Verwendungsmengen Transportkälte (in Kilotonnen CO ₂ eq.)	2020	2025	2030
SOLL-Szenario	776	382	259
IST-Szenario	783	489	202

C.1.4 Stationäre Klimatisierung

Tabelle 29: Darstellung der HFKW-Verwendungsmengen in der stationären Klimatisierung für Single-Split-, Multi-Split- und VRF-Anlagen im IST- und SOLL-Szenario (in kt CO₂eq.)

Verwendungsmengen Single-Split, Multi-Split und VRF-Anlagen (in Kilotonnen CO ₂ eq.)	2020	2025	2030
Single-Split-Anlagen			
SOLL-Szenario	7	4	2
IST-Szenario	6	5	3
Multi-Split- und VRF-Anlagen			
SOLL-Szenario	189	93	63
IST-Szenario	411	445	435

Tabelle 30: Darstellung der HFKW-Verwendungsmengen in der stationären Klimatisierung für Haushaltswärmepumpen im IST- und SOLL-Szenario (in kt CO₂ eq.)

Verwendungsmengen Wärmepumpen (in Kilotonnen CO ₂ eq.)	2020	2025	2030
SOLL-Szenario	465	229	155
IST-Szenario	761	509	159

C.1.5 Flüssigkeitskühlsätze

Tabelle 31: Darstellung der HFKW-Verwendungsmengen in der stationären Klimatisierung für Flüssigkeitskühlsätze im IST- und SOLL-Szenario (in kt CO₂ eq.)

Verwendungsmengen Flüssigkeitskühlsätze (in Kilotonnen CO ₂ eq.)	2020	2025	2030
SOLL-Szenario	404	199	135
IST-Szenario	354	246	114

C.1.6 Mobile Klimatisierung – PKW

Tabelle 32: Darstellung der HFKW-Verwendungsmengen in der mobilen Klimatisierung für PKWs im IST- und SOLL-Szenario (in kt CO₂ eq.)

Verwendungsmengen Pkws (in Kilotonnen CO ₂ eq.)	2020	2025	2030
SOLL-Szenario	4.715	2.320	1.572
IST-Szenario	2.449	1.421	391

C.1.7 Mobile Klimatisierung – Sonstige

Tabelle 33: Darstellung der HFKW-Verwendungsmengen in der mobilen Klimatisierung für sonstige Bereiche im IST- und SOLL-Szenario (in kt CO₂ eq.)

Verwendungsmengen sonstige Bereiche (in Kilotonnen CO ₂ eq.)	2020	2025	2030
Nutzfahrzeuge			
SOLL-Szenario	316	156	105
IST-Szenario	815	584	234
Busse			
SOLL-Szenario	121	60	40
IST-Szenario	193	159	103
Schienenfahrzeuge			
SOLL-Szenario	19	10	6
IST-Szenario	58	50	36
Landmaschinen			
SOLL-Szenario	131	64	44
IST-Szenario	194	76	58

Verwendungsmengen sonstige Bereiche (in Kilotonnen CO ₂ eq.)	2020	2025	2030
Schiffe			
SOLL-Szenario	17	9	6
IST-Szenario	29	31	33